การปรับสภาพน้ำ สำหรับอุตสาหกรรม

ณรงค์ วุฑธเสถียร

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

การปรับสภาพน้ำ
สำหรับอุตสาหกรรม

โดย

ณรงค์ บุญธเสถียร

จัดทำโดย

โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

270.-

ISBN : 974-8324-76-1

การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม

นรงค์ วุทธเสถียร

ราคา 270 บาท

พิมพ์ครั้งที่ 1 กรกฎาคม 2540 จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม

สงวนลิขสิทธิ์โดย

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย–ญี่ปุ่น)

[illegible]

ติดต่อจำหน่าย

บริษัท ดวงกมลสมัย จำกัด

[illegible]

"ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง หรือนำส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือไปใช้ก่อนได้รับอนุญาต"

พิมพ์ที่ บริษัท สามเจริญพาณิช จำกัด

[illegible]

คำนำนายกสมาคม

สมาคมสยามญี่ปุ่นศึกษา (ไทย-ญี่ปุ่น) ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี พ.ศ. ๒๕๓๐ โดยความร่วมมือร่วมใจกันของคนไทยและคนญี่ปุ่นที่มีความสนใจในการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับประเทศญี่ปุ่น โดยได้รับความอนุเคราะห์จากมูลนิธิ The Japan-Thailand Economic Cooperation Society ในการให้ความช่วยเหลือด้านการเงินในการดำเนินกิจกรรมของสมาคมฯ ซึ่งประกอบด้วยการจัดการบรรยายและสัมมนา การจัดนิทรรศการ การจัดกิจกรรมทางวัฒนธรรม การศึกษาดูงานในประเทศญี่ปุ่น การจัดตั้งห้องสมุดสมาคมฯ การจัดทำวารสารและหนังสือ ตลอดจนการประสานงานกับองค์กรต่างๆ ทั้งในประเทศไทยและประเทศญี่ปุ่น เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ความเข้าใจอันถูกต้องซึ่งกันและกัน ในการพัฒนาวัฒนธรรมของประเทศทั้งสอง อันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวัฒนธรรมโลกโดยส่วนรวม

ปัจจุบัน สมาคมฯ มีจำนวนสมาชิกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากจำนวนเริ่มแรกที่ก่อตั้งขึ้นมาเพียงไม่กี่ร้อยคน และหนังสือเล่มนี้ก็เป็นผลงานชิ้นหนึ่งของสมาคมฯ ในการดำเนินกิจกรรมที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเนื้อหาของหนังสือเล่มนี้ ประกอบไปด้วยบทความที่น่าสนใจหลายเรื่องด้วยกัน ทั้งในแง่ของการศึกษาวิจัยและงานเขียนทั่วไป ซึ่งผู้เขียนบทความแต่ละท่านล้วนแต่เป็นผู้ที่มีความรู้ความสามารถในสาขาวิชาที่ตนเองถนัดเป็นอย่างดี และจากผลการศึกษาวิจัยต่างๆ ที่ได้นำมาใช้ในการเขียนบทความนี้ ก็ล้วนแต่เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนในสาขาวิชาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับประเทศญี่ปุ่นเป็นอย่างยิ่ง ทั้งในระดับมหาวิทยาลัยและในระดับโรงเรียนทั่วไป ตลอดจนเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างประเทศไทยและประเทศญี่ปุ่นในด้านต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

ท้ายนี้ ในนามของสมาคมฯ ขอขอบคุณมูลนิธิ The Japan-Thailand Economic Cooperation Society เป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้การสนับสนุนทางด้านการเงินในการจัดพิมพ์หนังสือเล่มนี้ขึ้นมา ตลอดจนขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านที่ได้ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการจัดทำหนังสือเล่มนี้ขึ้นมา และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดพิมพ์หนังสือเล่มนี้ขึ้นมาจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ณ ที่นี้ด้วย

(นายอัษฎาวุธ สาคริก)
นายกสมาคมสยามญี่ปุ่นศึกษา (ไทย-ญี่ปุ่น)

คำแถลงของส่วนตำรา
สนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม

คำนำ

หนังสือเล่มนี้เป็นหนังสือที่ผู้เขียนได้รวบรวมและเรียบเรียงขึ้นจากประสบการณ์ในการทำงานร่วมกับชาวญี่ปุ่น ได้พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. ๒๕๔๔ และพิมพ์ซ้ำอีกครั้งที่ ๒ เมื่อปี พ.ศ. ๒๕๔๖ หลังจากนั้นมาก็ยังมีผู้ให้ความสนใจ และมีคำถามมาอยู่เสมอ ๆ ว่าจะมีการพิมพ์ครั้งที่ ๓ อีกหรือไม่ ผู้เขียนจึงได้ตัดสินใจปรับปรุงแก้ไขเนื้อหาบางส่วนที่ล้าสมัยไปแล้ว และเพิ่มเติมเนื้อหาใหม่ ๆ ที่น่าสนใจเข้าไปด้วย เพื่อให้หนังสือเล่มนี้ยังคงเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีหน้าที่ทำงานเกี่ยวข้องกับชาวญี่ปุ่นต่อไป

ในครั้งนี้ได้รวบรวมเพิ่มเติมเนื้อหาเกี่ยวกับวัฒนธรรมการทำงานของชาวญี่ปุ่น และผู้เขียนได้นำประสบการณ์ที่ได้รับจากการเป็นวิทยากรบรรยายให้กับหน่วยงานต่าง ๆ มาปรับปรุงเนื้อหาให้มีความทันสมัยและน่าสนใจยิ่งขึ้น ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาเกี่ยวกับชาวญี่ปุ่นไม่มากก็น้อย

เดชรงค์ บุญสถิตกร

สารบัญ

บทที่ 1 คุณสมบัติของน้ำ 1

1.1 1

1.2 2

1.3 24

1.4 41

1.5 53

1.6 67

บทที่ 2 แหล่งน้ำในประเทศไทย 49

2.1 51

2.2 55

2.3 59

2.4 65

2.5 67

2.6 67

บทที่ 3 การกำจัดความขุ่น 71

3.1 71

3.1.1 77

3.1.2 78

3.1.3 79

3.1.4 81

3.1.5 85

3.1.6 91

3.1.7 93

3.1.8 94

3.1.9 98

3.1.10 103

3.1 ... Sludge Blanket Clarifier ... 105
3.1.12 ... 106
3.2 ... 115
3.2.1 ... 115
3.2.2 ... 116
3.2.3 ... 116
3.2.4 ... 117
3.2.5 ... 117
3.2.7 ... 118
3.2.8 ... 121
3.2.9 ... 125
3.2.10 ... 141
3.2.11 ... 142
3.2.12 ... 142
3.2.13 ... 143
3.2.14 ... 143
3.2.15 ... 144
3.2.16 ... 144
3.2.17 ... 145
3.2.18 ... 145

บทที่ 4 การใส่ก๊าซ ... 151
4.1 ... 151

บทที่ 5 การกำจัดเหล็กและแมงกานีส ... 161
5.1 ... 161
5.2 ... 163
5.3 ... 163
5.4 ... 164

บทที่ 6 การกำจัดความกระด้าง ... 167
6.1 ... 167
6.2 ... 173

บทที่ 7 การทำให้อ่อน 193
7.1 196
7.2 196
7.3 199
7.4 202
7.5 205
7.6 213
7.7 215
7.8 222
7.9 225
7.10 230
7.11 237
7.12 241
7.13 248
7.14 250
7.15 254
7.16 256

บทที่ 8 การเกิดตะกรันและสิ่งปนเปื้อนในหม้อไอน้ำ 263
8.1 267
8.2 269
8.3 272
8.4 276
8.5 283
8.6 286

บทที่ 9 การกัดกร่อนในหม้อไอน้ำและการป้องกัน 293
ตอนที่ 1 293
9.1 294
9.2 298
9.3 301
9.4 304
9.5 313
9.6 316

9.7 การป้องกันและแก้ไขการกัดเซาะ 321
9.8 ตัวอย่างการคำนวณ 321
9.9 สรุปการคำนวณ 321
9.10 การคำนวณหาขนาดของหินก้อนใหญ่ 325
9.11 การคำนวณหาขนาดของหินก้อนน้ำ 330
9.12 การคำนวณหาขนาดของ geotextile ที่ใช้ในการป้องกันการกัดเซาะ 336
9.13 การคำนวณหาขนาดของหินก้อนใหญ่ 338
9.14 การป้องกันการกัดเซาะปลายคันดินกั้นน้ำ 339
9.15 การคำนวณหาขนาดของแผ่นปะทะ 341
9.16 การคำนวณ ปีองกันการกัดเซาะ 344
9.17 การคำนวณหาขนาดของหินก้อนสำหรับป้องกันการกัดเซาะที่ปลายคันดิน 350

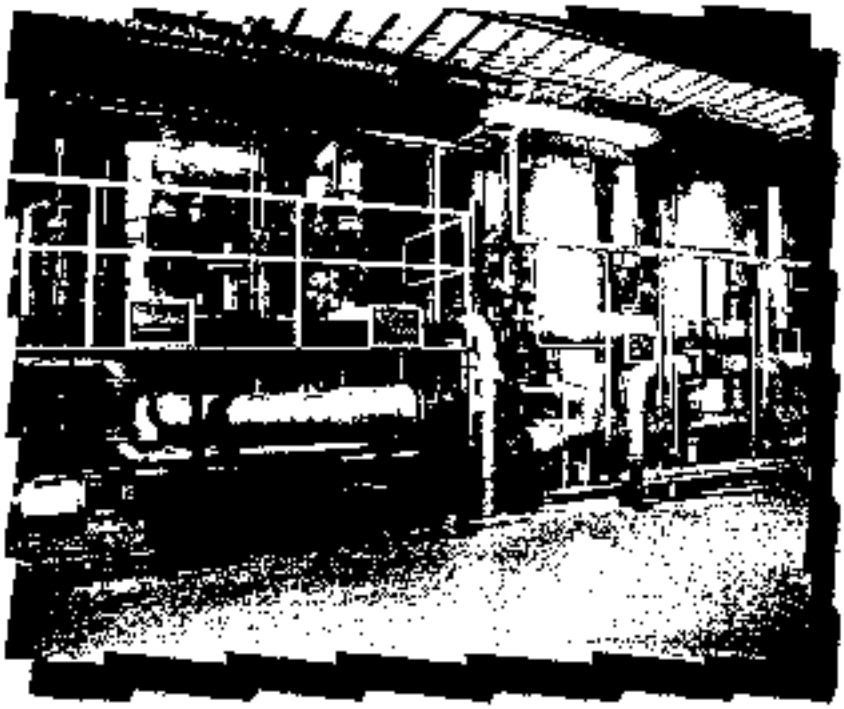
บทที่ 10 การป้องกันการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนในหม้อไอน้ำ 379
10.1 การกำจัดและป้องกันการกัด 379
10.2 การกัดกร่อนด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 388
10.3 ปรากฏการณ์ "การกระแทกน้ำ" ของปั๊มฟีด 387
10.4 การคำนวณหาขนาดของถังพักน้ำป้อน 389
10.5 การปรับสภาพน้ำด้วยสารเคมี 390
10.6 การใช้งานและการบำรุงรักษาวาล์วเช็ค 394
10.7 การป้องกันและกำจัดตะกรันหินปูน 396
10.8 การป้องกันและกำจัดตะกรันซิลิกา 399
10.9 การใช้ EDTA ล้างทำความสะอาดหม้อไอน้ำ 402
10.10 การคำนวณหาขนาดของท่อไอน้ำ 404
10.11 การป้องกันการกัดกร่อนของน้ำป้อนและน้ำในหม้อไอน้ำ 414
10.12 การป้องกันและแก้ไขการกัดเซาะที่เกิดขึ้นในเครื่องกังหันไอน้ำและท่อไอน้ำ 414
10.13 การรักษาความบริสุทธิ์ของไอน้ำ 415
10.14 การระบายน้ำทิ้ง 417
10.15 วิธีการลดความกดดันอย่างรวดเร็ว 417
10.16 การคำนวณหาขนาดของท่อระบายน้ำทิ้งจากถังพัก 419
10.17 วิธีการระบายน้ำทิ้ง 421
10.18 การประหยัดพลังงานในการระบายน้ำทิ้ง 423

บทที่ 11 การล้างหม้อไอน้ำ 429
11.1 การวิเคราะห์หินปูนและการกัด 429

11.2 การแก้ไขโจทย์ปัญหา 419
11.3 การแก้ปัญหาการใช้เครื่องคิดเลข 420
11.4 ข้อคิดเกี่ยวกับการสอน 427
11.5 การวัดและประเมินผล 431
11.6 การสร้างและจัดทำแบบทดสอบ 435
11.7 การวิเคราะห์ข้อสอบ 442
11.8 การพัฒนาและนิเทศการสอนเกี่ยวกับการใช้เครื่องคิดเลข 449

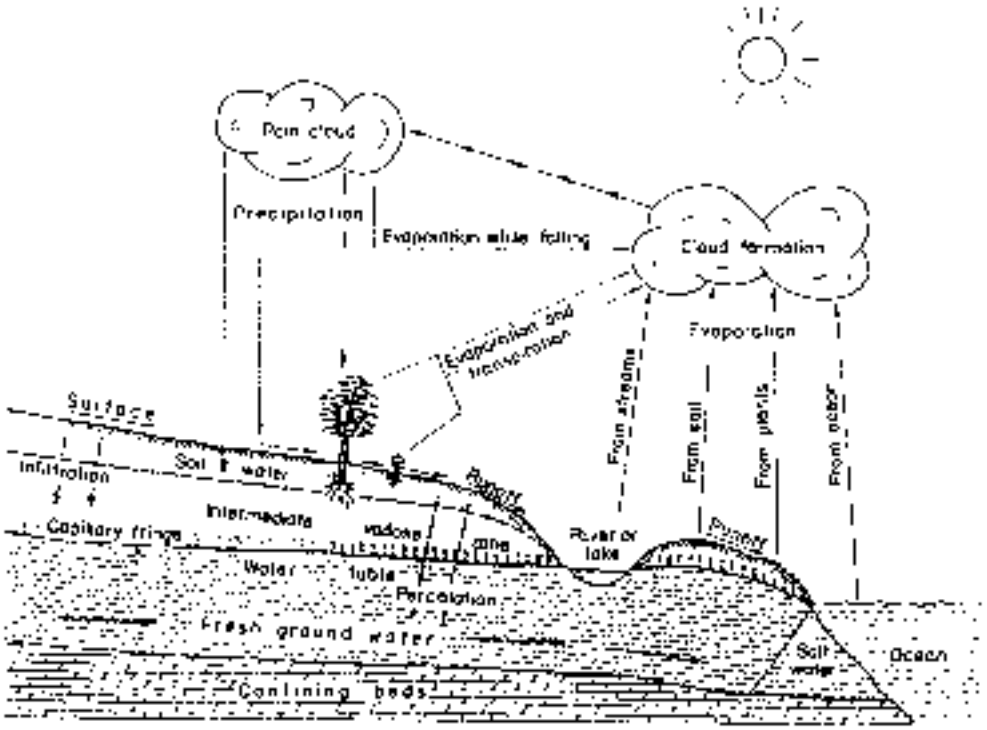
บทที่ 12 การเก็บรักษาหน้าไอน้ำที่พร้อมใช้งาน 463
12.1 การอุ่นเครื่องก่อน 463
12.2 การอุ่นเป็นเวลานาน 464
12.3 การเก็บรักษาหน้าไอน้ำที่ดับแล้ว 471

ภาคผนวก ตาราง และกราฟต่าง ๆ 473

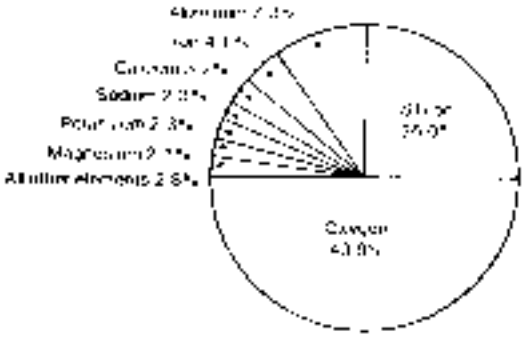


1 คุณสมบัติของน้ำ

น้ำที่มีอยู่ในโลกนี้ส่วนมากจะอยู่ในมหาสมุทรประมาณร้อยละ 97 น้ำส่วนที่เป็นแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ผิวดิน ที่สามารถนำมาใช้ได้นั้นมีเพียงประมาณ 0.03 เท่านั้น นอกนั้นเป็นน้ำที่ถาวรเป็นน้ำแข็งอยู่ที่ขั้วโลก น้ำที่ตกในแหล่งน้ำโดยตรงและส่วนใหญ่เป็นน้ำที่ได้จากประเทศกลางลงสู่พื้นโลก ในขณะที่น้ำบางส่วนก็ระเหยกลับขึ้นไป และบางส่วนก็ซึมลงไปในดิน ซึมลงไปตามรอยแตกต่าง ๆ ที่ชั้นหิน และที่ให้ช่องระบายน้ำในแนวราบก็มีด้วย จากนั้นน้ำฝนจะมีทางซึมลงและระเหยกลับขึ้นไปอีกครั้งหนึ่ง ส่วนที่เหลือก็จะไหลลงสู่แหล่งน้ำผิวดินต่อไป หน่วงเวลาไว้ บางส่วนก็ซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน น้ำตามลำธาร



รูปที่ 1.1 การเกิดของแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินจากน้ำฝน



รูปที่ ๑.๑ ธาตุประกอบของผิวโลก

ในที่นี้มีค่า pH = ๘.๒ ซึ่งในธรรมชาติจะพบได้ในน้ำทะเล ดังตัวอย่างในตารางที่ ๑.๒ ต่อไปนี้

ตารางที่ ๑.๒ ส่วนประกอบของเกลือแร่ในน้ำทะเล

ส่วนประกอบของเกลือแร่	ร้อยละโดยน้ำหนัก	สารอื่นที่พบ	ปริมาณ (ppm)
SiO_2	๐.๐๐๔	NO_3	๐.๐๐๑
Al_2O_3	๐.๐๐๑	V	๐.๐๐๒
Fe_2O_3	๐.๐๐๑	Cr	๐.๐๐๐๕
FeO	๐.๐๐๒	Mn	๐.๐๐๒
MnO_2	๐.๐๐๑	Co	๐.๐๐๐๑
CuO	๐.๐๐๑	Ni	๐.๐๐๒
Na_2O	๐.๕๖	Cu	๐.๐๐๓
K O	๐.๓๘	Zn	๐.๐๑๐
		HCO_3	๐.๑๔๐
		NO_2	๐.๐๐๑
		Cl	๐.๐๐๑

ตารางนี้มีสารอื่นที่พบในน้ำทะเลอีกดังนี้

แคลเซียมไบคาร์บอเนต $Ca(HCO_3)_2$ โซเดียมคลอไรด์ NaCl

แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต $Mg(HCO_3)_2$ แคลเซียมซัลเฟต $CaSO_4$

โซเดียมไบคาร์บอเนต $NaHCO_3$ แมกนีเซียมซัลเฟต $MgSO_4$

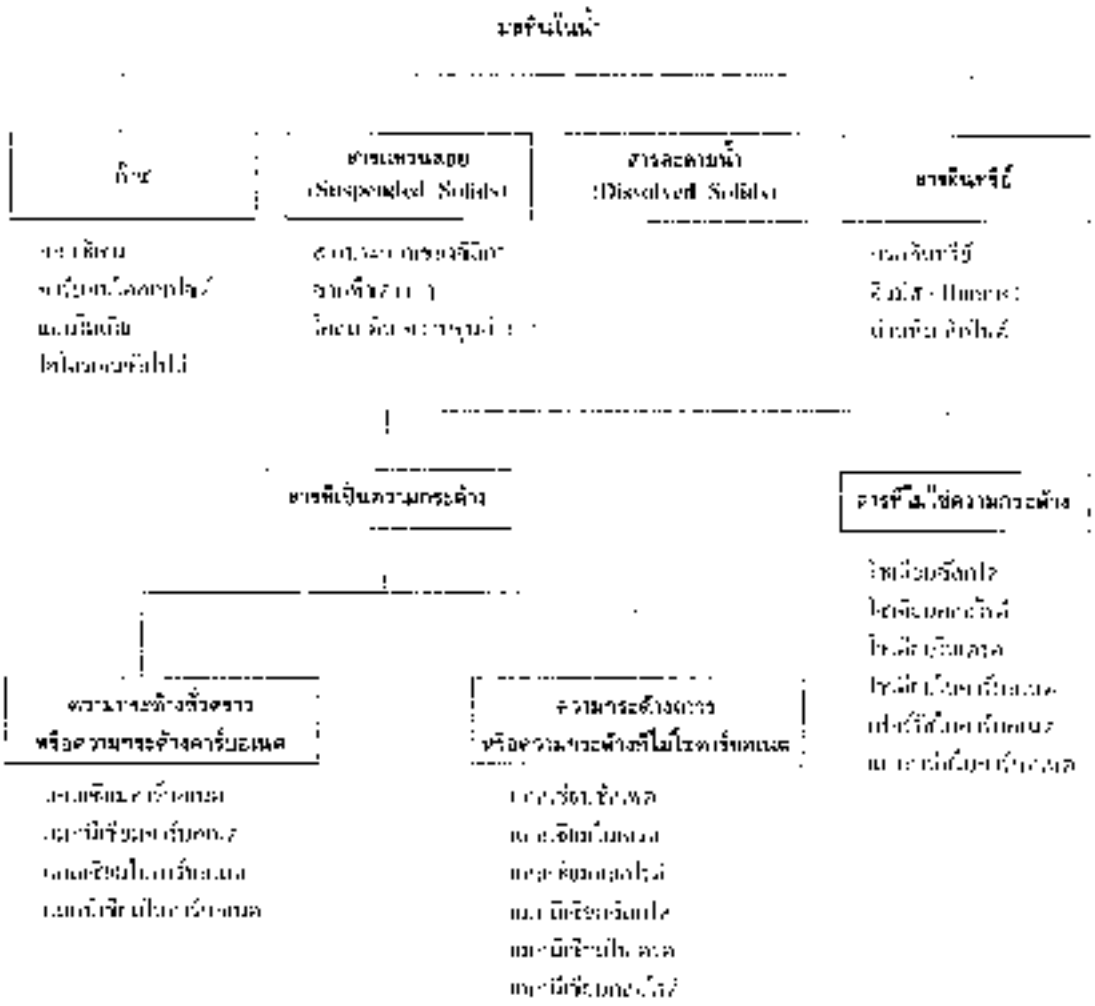
เหล็กไบคาร์บอเนต $Fe(HCO_3)_2$	โซเดียมซัลเฟต Na_2SO_4
แมงกานีสไบคาร์บอเนต $Mn(HCO_3)_2$	ซิลิกา SiO_2
แคลเซียมคลอไรด์ $CaCl_2$	โซเดียมซิลิเกต Na_2SiO_3
แมกนีเซียมคลอไรด์ $MgCl_2$	กรดซิลิกา H_2SiO_3

และน้ำยังสามารถละลายก๊าซต่างๆ ได้ดีกว่าดิน เช่น ออกซิเจน (O_2) ไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมีอยู่ในอากาศ และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งมีคุณสมบัติละลายสารประกอบแคลเซียมได้ดี หรือละลายอนุภาคต่างๆ ที่ละเอียดมากๆ ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ เช่น น้ำตะกอนจากเหมืองหินปูนหรือโป๊ยันน์ และอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นประจุลบ หินปูนที่ผ่านการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในน้ำ เช่น กรดฮิวมิก (Humic Acid) ซึ่งสามารถดูดซับธาตุที่ไม่ละลายน้ำหรือพืชนำไปใช้ประโยชน์ได้

ตารางที่ 1.2 แสดงค่าคุณภาพน้ำผิวดินจากแหล่งต่าง ๆ หน่วยต่อล้านหรือพีพีเอ็ม

สาร	น้ำแม่น้ำ	น้ำพุแร่	น้ำบาดาล	น้ำทะเล
ซิลิกา (SiO_2)	1-30	20-50	1-30	1-10
เหล็ก (Fe)	0.1	0.01-10	0.1-10	0.01-0.1
แมงกานีส (Mn)		1	0-1	0.001
แคลเซียม (Ca)	0-200	0-500	0-1,000	400
แมกนีเซียม (Mg)	0-50	0-100	0-500	1,200-1,400
โซเดียม (Na)	0-60	0-100		10,000-10,500
โพแทสเซียม (K)	0-15	0-50	0	380
ไบคาร์บอเนต (HCO_3)	0-400	0-1,000	0-1,000	140
ซัลเฟต (SO_4)	0-100	0-200	0-200	2,700
คลอไรด์ (Cl)	0-300	0-1,000	0-500	19,000
ฟลูออไรด์ (F)		0-10		1.0
ไนเตรต (NO_3)	0-10			
เศษเปลือกหอย (Dissolved Solids)	0-1,000	0-2,000	0-2,000	35,000
ความเป็นกรดเบส	6-8	6-9	6-8	8
ความกระด้าง (Hardness as $CaCO_3$)	0-500	0-1,000	0-1,000	8,000
สี	0-50	0-100	ไม่มีสี	0
กลิ่น	0-3	0-5	0-3	0
pH	7-9	7-9	6-8	7.5-8.4

แหล่งน้ำใต้ดินเกิดจากน้ำฝนที่ซึมลงสู่ใต้ดิน ขณะที่น้ำฝนซึมลงไปนั้นจะมีสารหลายชนิดปนไปด้วย เรียกว่า น้ำดิบ น้ำใต้ดินจะมีสารแขวนลอย (Suspended Solids) ปนอยู่ด้วย ซึ่งสารแขวนลอยนี้ก็คือ ดินทรายที่ปนอยู่ในน้ำนั่นเอง นอกจากนี้น้ำใต้ดินยังมีสารละลายน้ำ (Dissolved Solids) ปนอยู่ด้วย ซึ่งสารละลายน้ำนี้ก็คือ สารอนินทรีย์ ที่เกิดจากการผุพังของหินนั่นเอง



น้ำมัน (Oil) ที่จัดเป็นมลทินในน้ำนั้นเนื่องจากมีอยู่ในรูปต่างๆ กันดังนี้

Free Oil คือ น้ำมันที่ลอยอยู่ในน้ำ (ลอยขึ้นมาเห็นได้ชัดเจน)

Dispersed Oil คือ น้ำมันที่แตกตัวเป็นหยดเล็กๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 150 ไมครอน

Emulsion น้ำมันผสมอยู่กับน้ำในลักษณะที่เป็นหยดเล็กๆ และมีน้ำยาบางชนิดทำให้หยดน้ำมันเกาะกันเป็นฟิล์มบางๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 ไมครอน

Soluble Oil คือ น้ำมันที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำมันหล่อลื่นที่ละลายอยู่ในน้ำ เป็นต้น

ชุดดิน	ผลเสีย	หมายเหตุ
Ca^{2+}, Mg^{2+}	๑. ทำให้ดินมีสภาพเป็นด่างสูง ทำให้ธาตุอาหารบางชนิดเป็นประโยชน์ต่อพืชน้อย ๆ มีผลทำให้การดูดธาตุอาหารของพืชไม่สะดวก ไม่ให้ผลผลิตสูงเท่าที่ควร ๒. ทำให้มีการตกตะกอนของปุ๋ยฟอสเฟตบางชนิด ๆ ของเกลือธาตุอาหารพืช ๓. ทำให้ดินเหนียวจับตัวกันแน่น ๔. ทำให้เกิดโรคพืชบางชนิด เช่น โรคเหี่ยวของมันฝรั่ง	ระดับสูงๆ ในน้ำ และในดินที่มีการใช้ปุ๋ยแร่ธาตุมากเกินไป
Fe^{2+}, Fe^{3+}	ทำให้ธาตุอาหารพืชบางชนิด เช่น ฟอสฟอรัส ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช ทำให้ผลผลิตต่ำ	ดินที่มีการระบายน้ำดี Fe^{2+} จะถูกเปลี่ยนเป็น Fe^{3+}
เหล็กในรูปของสารอินทรีย์และในรูปของคีเลต	ไม่มีผลเสีย	ใช้เป็นปุ๋ยให้แก่พืชในดินด่าง โดยเฉพาะพืชที่ต้องการธาตุเหล็กมาก เช่น ไม้ผล
Mn^{2+}	ธาตุอาหารพืชบางชนิดเป็นประโยชน์น้อย	ถ้าดินมี Mn^{2+} มากเกินไป จะเป็นพิษต่อพืช
Na^{+}, K^{+}	ทำให้ดินมีสภาพเป็นด่างสูง ทำให้ดินเหนียวจับตัวกันแน่น ทำให้ดินมีสภาพเป็นพิษต่อพืช (Salty Soil)	
ความเป็นด่าง HCO_3^-, CO_3^{2-}, OH^-	๑. ทำให้ดินมีสภาพเป็นด่างสูง ธาตุอาหารพืชบางชนิดเป็นประโยชน์น้อย ทำให้ดินเหนียวจับตัวกันแน่น ๒. ทำให้เกิดพิษต่อพืชบางชนิด เช่น ต้นกล้า ๓. ทำให้ปุ๋ยยูเรียสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแก๊สแอมโมเนียได้ง่าย	มีปริมาณสารประกอบ HCO_3^-, CO_3^{2-} และ OH^- ในน้ำและดินมาก
กรดแร่ (Free Mineral Acid) เช่น กรดกำมะถัน กรดเกลือ กรดไนตริก	ทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดจัดมาก	ไม่ค่อยพบในดินที่ใช้ทำการเกษตร ยกเว้นในบริเวณที่มีการขุดหาแร่ธาตุ
ซัลเฟต SO_4^{2-}	ทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดจัดมาก ถ้าเกิดร่วมกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+}	

แคทิน	แอนไอออน	หมายเหตุ
คลอไรด์ไอออน (Cl^-)	ทำให้เกิดรสเค็ม กัดกร่อน	
คาร์บอนไดออกไซด์อิสระ (CO_2)	ทำให้เกิดการกัดกร่อนของคอนกรีตและเหล็กเสริม	เกิดขึ้นเมื่อน้ำมีสภาวะเป็นกรด ปัจจัยที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้
คลอรีน (Cl_2)	เป็นสารที่ทำลายเชื้อโรค	น้ำในธรรมชาติจะมีคลอรีนอยู่ในรูปของคลอไรด์
สารอินทรีย์และสารแขวนลอย	ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและสาหร่าย ทำให้เกิดการอุดตันในระบบจ่ายน้ำ ทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบจ่ายน้ำ	ในน้ำธรรมชาติมีสารอินทรีย์ประเภทกรดฮิวมิก (Humic Acid) และกรดฟัลวิก (Fulvic Acid) ปนอยู่ ทำให้น้ำมีสีเหลืองหรือน้ำตาล
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซิลิกา (SiO_2) หรือกรดซิลิซิก (H_2SiO_3)	ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น 1. ทำให้เกิดคราบสีน้ำตาลแดงในหม้อต้มและเครื่องทำน้ำร้อน 2. ทำให้เกิดการอุดตันและการกัดกร่อนในหม้อต้มและเครื่องทำน้ำร้อน	
ซิลิกาโคลอยด์หรือสารแขวนลอย	ทำให้น้ำมีความขุ่น	

1.1 หน่วยการวิเคราะห์น้ำ

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีหน่วยที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์น้ำมักใช้หน่วยเป็นน้ำหนักของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของน้ำ ซึ่งเขียนแทนด้วย mg/l หรือในบางครั้งใช้หน่วยเป็นส่วนในล้านส่วน (Parts Per Million) เขียนแทนด้วย ppm (มีหน่วยเป็น) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงน้ำหนักของสารที่ละลายอยู่ในน้ำ 1 ล้านส่วน เช่น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือ 1,000 มิลลิกรัมต่อตัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักเช่นกัน มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำให้เกิดความสับสนในกรณีที่น้ำมีความหนาแน่นต่างจากน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ในการวิเคราะห์ปริมาณสารที่ละลายอยู่ในน้ำจะใช้หน่วยที่เรียกว่า ppm (Parts per Million) ซึ่งมีความหมายเหมือนกับ mg/l (Milligrams per Liter) ในขณะที่การวิเคราะห์ปริมาณสารที่ละลายอยู่ในน้ำมันจะใช้หน่วยเป็น ppm (Parts per Million) เช่นกัน

โดยวิธีที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{epm} = \text{mg/L} \times \frac{\text{ประจุไฟฟ้า}}{\text{น้ำหนักอะตอม}} = \frac{\text{mg/L}}{\text{น้ำหนักสมมูล}}$$

$$\text{ppm} = \frac{\text{ppm}}{\text{น้ำหนักสมมูล}}$$

ในการเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ให้เป็นหน่วยของ $CaCO_3$ ดูได้จากตารางที่ 1, 2, 3 และ 4 ในภาคผนวก 1

ตัวอย่างที่ 1.1 จงเปลี่ยน PO_4^{-3} 2.5 ppm เป็น epm

จากตารางที่ 1 และ 2 ในภาคผนวก 1

น้ำหนักโมเลกุลของ PO_4^{-3} = 95

วาเลนซี = 3

น้ำหนักสมมูล = $\frac{95}{3}$ = 31.66

2.5 ppm PO_4^{-3} = $\frac{2.5}{31.66}$ = 0.079 epm

ตัวอย่างที่ 1.2 ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่ 1 ได้ผลดังนี้

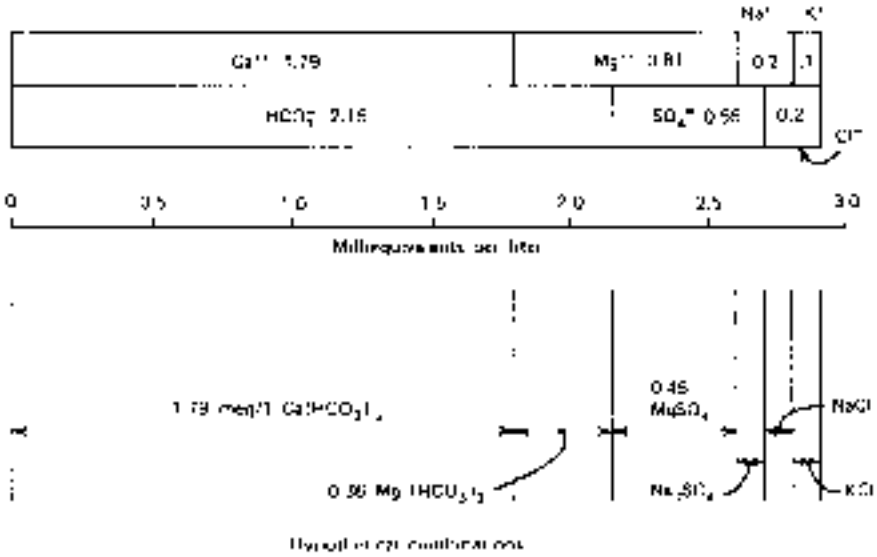
ไอออน	ppm	epm ประจุบวก	epm ประจุลบ
Ca^{+2}	12	0.60	
Mg^{+2}	27	2.25	
HCO_3^{-1}	106		1.74
SO_4^{-2}	15		0.31
Cl^{-1}	71		2.00
NO_3^{-1}	8		0.13
ผลรวมของไอออน		2.85	2.18

ในตัวอย่างนี้จะเห็นได้ว่าผลรวมของไอออนประจุบวกมีค่าไม่เท่ากับผลรวมของไอออนประจุลบ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากการวิเคราะห์น้ำนี้มีข้อผิดพลาด เพราะในการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างนี้ไม่ได้วิเคราะห์หาปริมาณของ Na^+ และ K^+ ในน้ำตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ 1.3 ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างมีค่าดังต่อไปนี้

Alkalinity as $CaCO_3$	183
Bicarbonate	180
Calcium	59
Chloride	71
Magnesium	9.8
pH	7.6
Potassium	1.9
Sodium	4.6
Sulfate	27

จงเขียนแผนภาพ meq/l และคำนวณความกระด้างของน้ำตัวอย่างนี้



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างการเขียนแผนภาพ meq/l ของตัวอย่างที่ 1.3

จากรูปที่ 1.3 จะเห็นได้ว่าความกระด้างของน้ำตัวอย่างนี้ประกอบด้วย 2 ชนิด คือ ความกระด้างชั่วคราว และความกระด้างถาวร ความกระด้างชั่วคราวมีค่าเท่ากับ 1.79 meq/l ของ $Ca(HCO_3)_2$ และ 0.36 meq/l ของ $Mg(HCO_3)_2$ ซึ่งสามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการปูนโซดา (Lime-Soda Softening) ซึ่งจะได้ค่าความกระด้างเหลือเพียง 40 mg/l as $CaCO_3$ ส่วนความกระด้างถาวรมีค่าเท่ากับ 0.45 meq/l ของ $MgSO_4$ ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการปูนโซดา

ตัวอย่างที่ 1.4 การวิเคราะห์น้ำมีผลดังนี้

ธาตุ	ppm	epm	ppm as $CaCO_3$
Calcium as Ca	80	3.99	200
Magnesium as Mg	41	3.38	169
Sodium & Potassium as Na	23	1.00	50
รวม ไอออนบวกทั้งหมด		8.37	419
Bicarbonate as HCO_3	244	4.00	200
Chloride as Cl	71	2.01	101
Sulfate as SO_4	138	2.87	144
รวม ไอออนลบทั้งหมด		8.88	445

จากค่าที่วิเคราะห์ได้จะเห็นว่าผลรวมของไอออนบวกและไอออนลบมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งในทางปฏิบัติจะยอมให้มีความแตกต่างกันได้ไม่เกิน 5% ของค่าเฉลี่ย ในตัวอย่างนี้ ค่าเฉลี่ยของไอออนบวกและไอออนลบ = (8.37 + 8.88)/2 = 8.63 epm ดังนั้นค่าความแตกต่างของไอออนบวกและไอออนลบ = (8.88 − 8.37)/8.63 × 100 = 5.91% ซึ่งมากกว่า 5% ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบการวิเคราะห์ใหม่ หรือปรับค่าไอออนบวกหรือไอออนลบ

ความกระด้าง เป็นการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสบู่ของน้ำ โดยน้ำจะมีความกระด้างเนื่องมาจากไอออนบวกต่างๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เป็นต้น ซึ่งการวัดจะวัดเป็น epm แต่ส่วนใหญ่จะวัดเป็น ppm เทียบกับ $CaCO_3$ ของไอออนบวกนั้นๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ epm ของไอออนบวกนั้นคูณด้วย 50 และในการวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำ จะมีการวัดไอออนบวกเพียงสองตัวเท่านั้น คือ แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งไอออนบวกทั้งสองตัวนี้จะมีความสำคัญมากในการทำปฏิกิริยากับสบู่ ดังนั้นจึงเรียกความกระด้างที่วัดได้ว่าเป็นความกระด้างทั้งหมด (total hardness)

1.2 คุณสมบัติของน้ำ

น้ำมีสูตรทางเคมีคือ H_2O จะมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 1.3 คุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

น้ำหนักโมเลกุล		18.02
จุดเดือด	ที่ความดันบรรยากาศ	100
จุดเยือกแข็ง	ที่ความดันบรรยากาศ	0.00
ความหนาแน่น	ของน้ำบริสุทธิ์	1.0000
จุดสามจุดที่น้ำอยู่ในสภาวะสมดุลกับ	ความดันไอ	0.01
ความร้อนจำเพาะ	ของน้ำ	1.00
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	ที่ 100°C	539.7
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว		79.7
ความหนืดของน้ำ		0.8937 centipoise (cP)

ตารางที่ 1.4 คุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของน้ำที่แปรผันตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	ความหนาแน่น กรัมต่อมิลลิลิตร	ปริมาตรจำเพาะ มิลลิลิตรต่อกรัม	ความดันไอ มิลลิเมตรปรอท	ความหนืด Centipoise
1	0.9999	1.0001	4.9	1.79
5	1.0000	1.0000	6.5	1.52
10	0.9997	1.0003	9.2	1.308
15	0.9991	1.0009	12.8	1.14
20	0.9982	1.0018	17.5	1.002
25	0.9971	1.0029	23.8	0.894
30	0.9957	1.0043	31.8	0.801
40	0.9922	1.0078	55.3	0.656
50	0.9881	1.0122	92.5	0.549
60	0.9832	1.0171	149.4	0.469
70	0.9778	1.0227	233.7	0.406
80	0.9718	1.0290	355.1	0.357
90	0.9653	1.0360	525.8	0.317
100	0.9584	1.0435	760.0	0.284

1.2.1 ความนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Conductance)

ความนำไฟฟ้าจำเพาะเป็นการวัดที่ถูกต้องที่สุดในการหาปริมาณของแข็งละลายน้ำ ซึ่งเรียกว่า ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids or TDS) ที่มีอยู่ในน้ำธรรมชาติจะมีความนำไฟฟ้าเสมอ

น้ำกลั่นที่สะอาดที่สุดจะมีความนำไฟฟ้าเพียงแค่ 0.04 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

ความนำไฟฟ้าจำเพาะของน้ำธรรมชาติจะแตกต่างกันมาก ในกรณีที่น้ำมีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง หรือของแข็งละลายน้ำส่วนใหญ่ เป็นสารที่ไม่นำไฟฟ้า ความนำไฟฟ้าจะต้องมีการแก้ไขเรื่องอุณหภูมิก่อน โดยใช้ค่าแก้ (Correction Factor)

1.2.2 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของน้ำคือ ปริมาณของสารที่มีอยู่ในน้ำ 1 หน่วยปริมาตร ที่อุณหภูมิใดๆ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส น้ำกลั่นจะมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.000 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เกลือโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัม ละลายในน้ำ 1 ลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.0051 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อัตราส่วนเดียวกัน น้ำทะเลมีความหนาแน่นประมาณ 1.030 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อัตราส่วนเดียวกัน ดังนั้น น้ำที่มีของแข็งละลายน้ำสูงจะมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำที่มีของแข็งละลายน้ำต่ำ

1.2.3 สี (Color)

น้ำธรรมชาติมีสีเกิดขึ้นได้จากการที่น้ำไหลผ่านดินที่มีสีต่างๆ ปนอยู่ ซึ่งสีที่เกิดขึ้นจากการละลายของสารอินทรีย์ และการที่มีสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ปนอยู่ในน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช ที่ทำให้น้ำมีสีเขียว

ตะกอน ที่น้ำจะดึงเอาอนุภาคคอลลอยด์ประจุลบ ที่สามารถทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ (Coagulation) จนสามารถแยกออกได้ง่ายด้วยวิธีการตกตะกอน เช่น อนุภาคดินเหนียว แป้ง สีที่เกิดจากพืชบางชนิด สีที่เรียกว่า สีปรุง (Aspanut Curry) เช่น น้ำใบชา น้ำกาแฟ น้ำผลไม้บางชนิด และสารแขวนลอยในอุตสาหกรรม ทำให้น้ำขุ่นมากขึ้น สีย้อม (Dye Color) เป็นสีที่เกิดจากการสกัดจากพืชหรือสารอินทรีย์ ซึ่งจะอยู่ในรูปของคอลลอยด์ นอกจากนี้ สีย้อมจากอุตสาหกรรมยังมีกลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore group) หรือหมู่ชุดของอะตอมที่ทำให้น้ำมีสีเพิ่มขึ้น เช่น หมู่ไนโตรเจน ไนโตรโซ เอโซ ไนโตรเซียนกรดอินทรีย์ (K_2PtCl_6) และโคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) ที่ทำปฏิกิริยากับ 1 มิลลิลิตร กับ Pt ต่อลิตร

1.2.4 สารหรือตะกอนแขวนลอย (Suspended Solids)

ตะกอนแขวนลอย คือ สารหรือของแข็งส่วนที่ไม่ละลายน้ำ แล้วแขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดความขุ่น (Turbidity) เป็นของแข็งส่วนที่กรองได้โดยการนำน้ำไปกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter) ตัวอย่างตะกอนที่ตกได้ง่าย เช่น ทรายละเอียด

1.2.5 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่นเกิดจากการแขวนลอยของน้ำที่เป็นตัวเหตุที่ทำให้น้ำไม่ใส เป็นลักษณะหนึ่งของความขุ่นของน้ำเนื่องจากมีสารที่มีอยู่ในน้ำ และความขุ่นเป็นการวัดหาด้านที่เกี่ยวกับแสงเสียมากกว่า การแขวนลอยนั้น มีมากน้อยเท่าใด ไม่สามารถบอกได้ ดังนั้นจึงต้องหาค่าความขุ่นมาเทียบกับสารที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ หน่วยวัดความขุ่นที่เราใช้กันมา ได้แก่ หน่วยความขุ่นเป็นซิลิกอนมิลลิกรัมต่อลิตร

หน่วยความขุ่น 1 ซิลิกอน (mg/L) = ความขุ่นของน้ำโดยสารที่มีซิลิกา (SiO_2) อยู่ 1 มิลลิกรัมในน้ำ 1 ลิตร

หน่วยวัดความขุ่นที่นิยมใช้กันมากมีอยู่ 3 หน่วย คือ

JTU = Jackson Turbidity Unit

FTU = Formazin Turbidity Unit

NTU = Nephelometric Turbidity Unit

ความขุ่นทั้งสามหน่วยนี้จะให้ค่าเป็นค่าเลขที่เท่ากัน

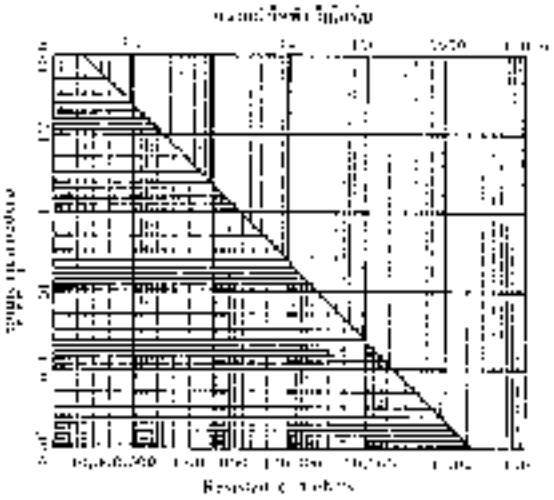
1.2.6 สารหรือของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (Total Solids or Total Dissolved Solids)

สารหรือของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด คือสิ่งที่อยู่ในน้ำทั้งหมดที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยการระเหยด้วยน้ำให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นอีกวิธีหนึ่ง วัดค่า TDS ได้จากการวัดค่าความนำไฟฟ้า ค่านี้จะบอกเป็นความสามารถที่น้ำตัวนำกระแสไฟฟ้าได้มาก

ของแข็งนั้น ขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่ละลายน้ำได้และอยู่ในรูปไอออน (ionized) อยู่เท่านั้น เพราะสารละลายที่อยู่ในรูปโมเลกุลจะไม่นำกระแสไฟฟ้า ในขณะที่สารละลายที่มีประจุไฟฟ้า จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น และความนำไฟฟ้าจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิของสารละลายขณะทำการวัด (temperature) ความเข้มข้นของประจุ (ionic strength) การวัดค่าความนำไฟฟ้า จึงใช้ในการประมาณค่าของสาร ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำได้อย่างรวดเร็ว ดังสมการ

ปริมาณ TDS (หน่วย mg/l) = ค่าคงที่ × ความนำไฟฟ้า

ค่าคงที่ = 0.55 – 0.80



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับค่าของสารละลายน้ำทั้งหมด (TDS)

1.2.7 pH

pH เป็นค่าที่แสดงถึงความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ซึ่งสามารถนิยามได้ว่า ค่า pH คือ ค่าลบของลอการิทึมฐานสิบของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ดังสมการต่อไปนี้

$$pH = -\log_{10}[H^+] = \log_{10}\frac{1}{[H^+]}$$

โดยที่ $[H^+]$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 25 °C จะสามารถเขียนได้ดังนี้

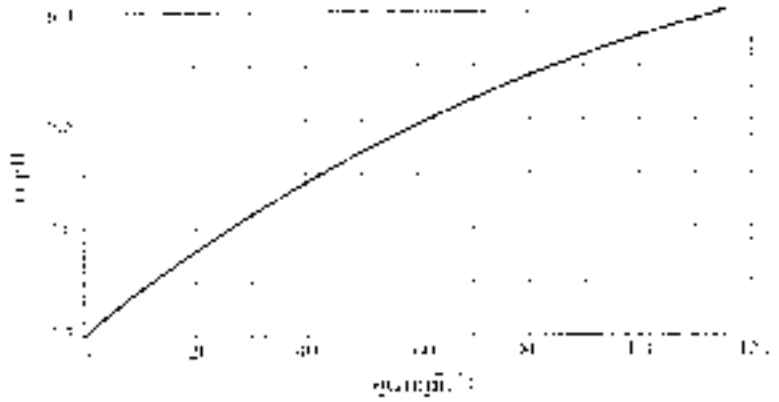
$[H^+] = 1.00 \times 10^{-7}$, pH = 7

ถ้า $[H^+] = 10^{-x}$, pH = x

$[H^+] = 10^{-y}$, pH = y

ค่า pH น้อยกว่า 7 แสดงว่าน้ำนั้นเป็นกรด น้ำใหม่ที่มีค่าต่ำกว่า 5 เป็นน้ำที่มีความเป็นกรดสูง และมีค่า pH = 2 ถึง 3 ส่วน pH มากกว่า 7 แสดงว่าน้ำนั้นเป็นด่าง น้ำที่มีค่าต่ำกว่า 10 จะมีความเป็นด่างสูง และมีค่า pH = 11 ถึง 12 ค่า pH จะมีความผันแปรไปตามอุณหภูมิของน้ำ ดังนั้นการวัดค่า pH ในภาคสนามจึงต้องทำการวัดทันที ภายในเวลาไม่เกิน 15 นาที

ของน้ำที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 นอร์มัล ซึ่งจะเห็นว่าค่าพีเอชของน้ำทั้งสองต่างกัน แต่ความแตกต่างของ pH = 1 กับค่า pH = 3 ที่นี่เพราะความแตกต่างของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเป็น 100 เท่า ในขณะที่ความแตกต่างของ pH = 3 กับ pH = 5 ซึ่งมีความแตกต่างของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพียง 100 เท่า



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับความเข้มข้น

นี่คือปฏิกิริยาของน้ำดังนี้

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$$

กรดแก่ก็คือกรดที่แตกตัวได้ไฮโดรเจนไอออนมาก

$$H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$$

ด่างแก่ก็คือด่างที่แตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออนมาก

$$NaOH \rightarrow Na^+ + OH^-$$

การคำนวณหาค่าพีเอชและพีโอเอชทำได้ดังนี้

$$pOH = 14 - pH$$

$$pOH = -\log [OH^-]$$

1.2.8 ความเป็นกรด (Acidity)

ความเป็นกรด หมายถึง ความสามารถของน้ำที่ทำปฏิกิริยากับด่างมาตรฐานจนถึงจุดยุติที่กำหนด ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามค่า pH ที่ใช้ในการไทเทรต ความเป็นกรดของน้ำมีสาเหตุมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งละลายอยู่ในน้ำ กรดอินทรีย์ และแร่ธาตุของกรดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำ ปกติแล้วน้ำธรรมชาติไม่ควรมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ความเป็นกรดในน้ำเกิดจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจะได้กรดคาร์บอนิกดังสมการต่อไปนี้

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$

น้ำที่มีความเป็นกรดเกิดขึ้นจากน้ำธรรมชาติจะมีค่าพีเอชต่ำกว่า 8.3 หรือ pH ต่ำกว่า 4.5 ส่วนน้ำที่มีความเป็นกรดที่เกิดจากกรดแร่ธาตุจะมีค่า pH น้อยกว่า 4.5 และมีหน่วยแสดงความเป็นกรดเป็น ppm ของแคลเซียมคาร์บอเนต

1 ความเป็นกรดเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide Acidity)

2 ความเป็นกรดเนื่องจากกรดแร่ธาตุ (Mineral Acidity)

สำหรับความเป็นกรดที่เกิดจากกรดแร่ธาตุนั้น สามารถเกิดจากการละลายน้ำของกรดแร่ธาตุ และยังก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอลิซิสของเกลือที่มีซัลไฟด์ ไฮโดรลิซิสของเกลือที่มีเหล็กอยู่ด้วย การละลายน้ำของกรดแร่ธาตุ และปฏิกิริยาไฮดรอลิซิส (Hydrolysis) ของเกลือเหล็กมีดังนี้

$$2FeS_2 + 2H_2O + 7O_2 \longrightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4$$

$$H_2SO_4 \rightleftharpoons 2H^+ + SO_4^{2-}$$

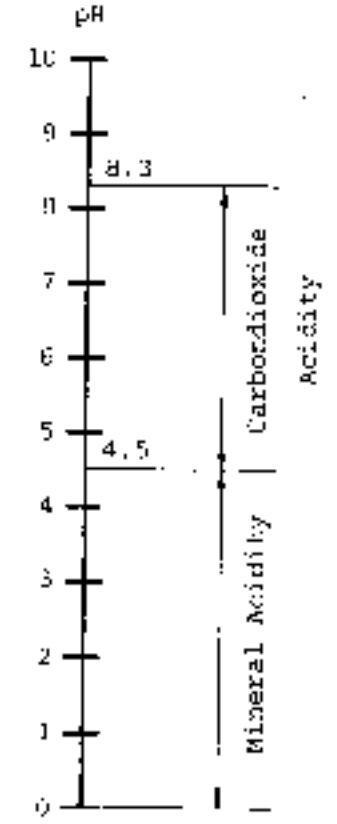
และฟอร์รัสซัลเฟตที่ได้จะถูกออกซิไดซ์เป็นเฟอร์ริกซัลเฟต

$$Fe_2(SO_4)_3 \longrightarrow 2Fe^{3+} + 3SO_4^{2-}$$

$$Fe^{3+} + 3H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$$

จะเห็นได้ว่ามีปริมาณไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ทั้งจากการแตกตัวของกรดในน้ำและการไฮโดรลิซิสของเฟอร์ริกซัลเฟต จึงทำให้ความเป็นกรดสูงขึ้น

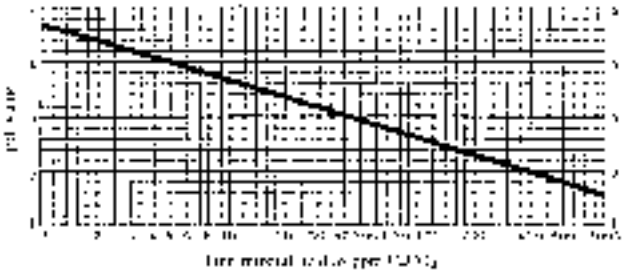
หาค่าความเป็นกรดได้โดยไทเทรตน้ำตัวอย่าง ด้วยสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.02 N จนถึงจุดเปลี่ยนสีของ Methyl Orange คือที่ pH = 4.5 ได้ค่าเป็น Mineral Acidity หรือ Methyl Orange Acidity ถ้าไทเทรตต่อจนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนสีของ Phenolphthalein คือที่ pH = 8.3 ได้ค่า Carbondioxide Acidity หรือ Phenolphthalein Acidity ซึ่งก็คือ Total Acidity นั่นเอง



รูปที่ 1.6 กราฟแสดงช่วงความเป็นกรดของน้ำ

ตารางที่ 1.1 Mineral Acidity และค่า pH

H+ สมดุลกับ $CaCO_3$	pH
0-3	4.5
4-5	4.0
6-7	3.7
8-9	3.5
10-12	3.4
13-15	3.3
16-18	3.2
19-20	3.1
21-25	3.0
26-30	2.9
31-40	2.8
41-50	2.7



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ Mineral Acidity หรือ FMA (Free Mineral Acidity)

1.2.9 ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างของน้ำ คือความสามารถที่จะทำปฏิกิริยา ความเป็นด่างมีสาเหตุเกิดจากเกลือของกรดอ่อนและบางครั้งที่เกิดจากด่างอ่อนหรือด่างแก่ น้ำธรรมชาติจะมี pH อยู่ในช่วง 6 - 8 ซึ่งเกิดจากการสมดุลทางเคมีของไบคาร์บอเนตและคาร์บอนิกแอซิด ความเป็นด่างของน้ำประกอบด้วยไอออนต่าง ๆ เช่น คาร์บอเนต (CO_3^{-2}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) แต่ก็อาจมีไอออนอื่น ๆ เช่น บอเรต (Borate) ซิลิเกต (Silicate) และฟอสเฟต (PO_4^{-3}) ที่มีส่วนร่วมในความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) ด้วยเช่นกัน ส่วนมากจะพบความเป็นด่างของน้ำในธรรมชาติ จะอยู่ในรูปของแคลเซียมและแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์กับหินปูน

ความเป็นด่างของน้ำสามารถวัดได้โดยการไทเทรตตัวอย่างน้ำกับกรดมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นจนถึงจุดยุติ (End Point) ที่มีค่าเท่ากับ 8.3 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของฟีนอลฟทาลีน และเมทิลออเรนจ์ที่จุดยุติ 4.5 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของเมทิลออเรนจ์ ดังแสดงในรูป $CaCO_3$ ความเป็นด่างจะมีความสัมพันธ์กับค่า pH ที่เป็นจุดเปลี่ยนสีของฟีนอลฟทาลีนและเมทิลออเรนจ์ดังนี้

ความเป็นด่างแสดงได้เป็น 3 แบบคือ

1. **Hydroxide or Caustic Alkalinity** หมายถึงค่าความเป็นด่างที่เกิดจากไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับบาเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) แล้วไทเทรตกับกรดจนถึง pH 8.3 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของฟีนอลฟทาลีน ความเป็นด่างนี้จะเกิดจากไฮดรอกไซด์ และไม่มีคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์เลย

ปฏิกิริยาที่เกิด

$$OH^- + H^+ \rightarrow H_2O$$

2. **Phenolphthalein Alkalinity (P-Alkalinity)** หมายถึงค่าความเป็นด่างที่เกิดจากการไทเทรตกับกรดจนถึง pH 8.3 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของฟีนอลฟทาลีน P Alkalinity จะประกอบด้วยความเป็นด่างที่เนื่องจากไฮดรอกไซด์ทั้งหมด และเนื่องจากคาร์บอเนตเพียงครึ่งหนึ่งของคาร์บอเนตทั้งหมด น้ำธรรมชาติที่มีคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์อิสระละลายอยู่จะไม่มีค่า P-Alkalinity

ปฏิกิริยาที่เกิด

$$OH^- + H^+ \longrightarrow H_2O$$

$$CO_3^{-2} + H^+ \rightarrow HCO_3^-$$

3. **Methyl Orange Alkalinity (M-Alkalinity)** ในการวิเคราะห์ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) หมายถึงค่าความเป็นด่างที่ได้จากการไทเทรตกับกรดจนถึง pH 4.5 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสี

ค่าอัลคาไลนิตี (Alkalinity) คือ ความสามารถในการรับโปรตอน (H^+) ของน้ำ ซึ่งเป็นผลรวมของ

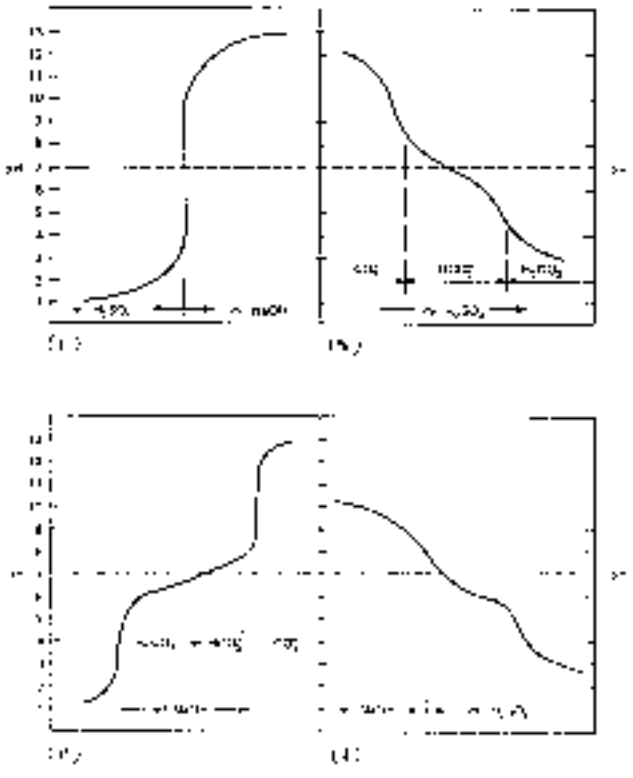
ปฏิกิริยาที่เกิด

$$OH^- + H^+ \rightarrow H_2O$$
$$CO_3^{2-} + H^+ \rightarrow H_2CO_3$$
$$HCO_3^- + H^+ \rightarrow H_2CO_3$$

หมายเหตุ น้ำธรรมชาติบางแหล่งอาจมีอนุมูลไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) ปนอยู่ด้วย ซึ่งจะมีค่า pH มากกว่า 8.3 แต่ในแหล่งน้ำส่วนใหญ่จะไม่มีอนุมูลนี้ เนื่องจากจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นกับอนุมูลคาร์บอเนตได้เป็นอนุมูลไบคาร์บอเนตที่ pH 8.3 ดังนั้นการวัดค่าอัลคาไลนิตีจึงนิยมวัดเป็นค่าที่ใช้ในการไทเทรตกับกรดแก่ถึงจุดยุติที่ pH 4.5 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอัลคาไลนิตีทั้งหมด (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของ P-Alkalinity) ในการรายงานผลทั้งหมด ซึ่งค่าอัลคาไลนิตีที่ได้นี้ เรียกว่า Total Alkalinity แต่ก็มีการเรียกชื่อว่าเป็นอัลคาไลนิตีอีกชื่อหนึ่งว่า M-Alkalinity

ในการวิเคราะห์น้ำโดยทั่วไปจะต้องมีการวัดค่าอัลคาไลนิตีของน้ำด้วย (Sometimes) และการปรับค่าความเป็นด่างในน้ำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำ ค่าอัลคาไลนิตีที่ได้จากการไทเทรตจะเป็นค่าที่มีอยู่ ซึ่งอาจเกิดจากสารประกอบต่างๆ ดังนี้

1. Hydroxide Alkalinity
2. Carbonate Alkalinity
3. Bicarbonate Alkalinity



รูปที่ 1.3 กราฟแสดงการไทเทรตตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่าง ๆ กับกรดหรือด่าง
(ก) น้ำบริสุทธิ์ (ข) น้ำที่มีคาร์บอเนต
(ค) น้ำที่มีกรดอินทรีย์ (ง) น้ำทะเล

ความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำแบ่งได้เป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

(1) ด่างของสารละลายที่มีค่าเป็นกลาง

(2) ด่างของสารละลายที่มีค่า pH

(3) ด่างของสารละลายที่มี [illegible]

ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการ [illegible] ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นด่างของน้ำ และในการวิเคราะห์นี้จะมีการใช้ดัชนีต่างๆ ดังนี้

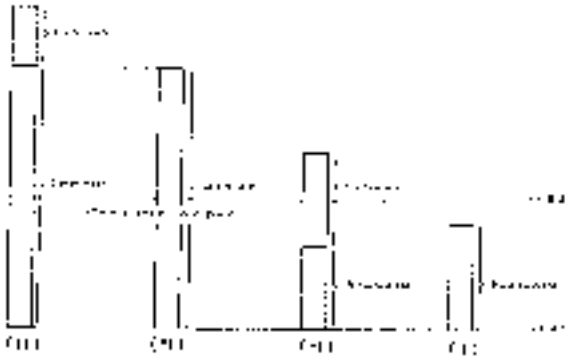
(1) [illegible]

(2) [illegible]

(3) ไฮดรอกไซด์ [illegible]

(4) คาร์บอเนต [illegible]

(5) [illegible]



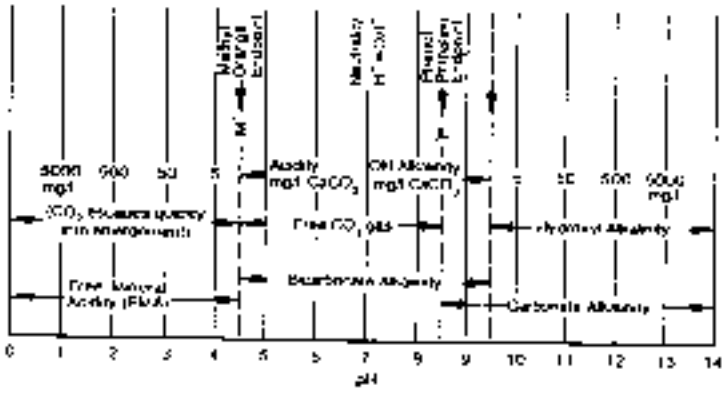
รูปที่ 1.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นด่างกับค่า pH

(1) ไฮดรอกไซด์ = 2P - M, คาร์บอเนต = 2(M-P)

(2) คาร์บอเนต = 2P - M

(3) คาร์บอเนต = 2P, ไฮดรอกไซด์ = M - 2P

(4) ไบคาร์บอเนต = M



รูปที่ 1.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด - ด่างชนิดต่างๆ กับค่า pH

หมายเหตุ ในกรณีที่น้ำตัวอย่างมีค่า P-Alkalinity และ M-Alkalinity เท่ากัน ผลการวิเคราะห์ทั้งสองค่าจะเท่ากับปริมาณของสารประกอบไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต ที่ปรากฏอยู่ในน้ำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

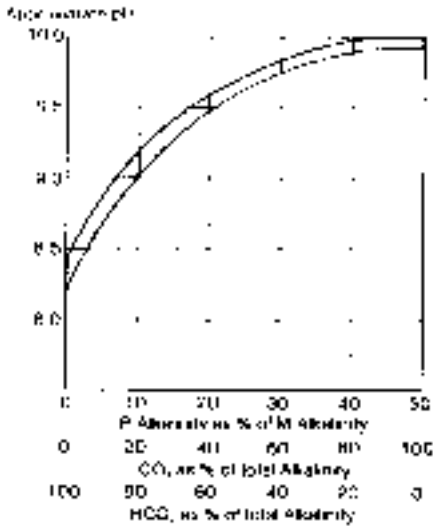
ตารางที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า P และ M-Alkalinity กับปริมาณความเป็นด่างแบบต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์ / ความเป็นด่างในรูป	P = M	P > M/2	P = M/2	P < M/2	P = 0
ไฮดรอกไซด์ OH $Ca(OH)_2$ $Mg_2(OH)_2$ NaOH	P = M	2P - M	0	0	0
คาร์บอเนต CO_3 $CaCO_3$ $MgCO_3$ Na_2CO_3	0	2 (M-P)	M = 2P	2P	0
ไบคาร์บอเนต HCO_3 $Ca(HCO_3)_2$ $Mg(HCO_3)_2$ $NaHCO_3$	0	0	0	M = 2P	M

ในกรณีที่มีค่าผลการวิเคราะห์ Hydroxide Alkalinity (ใช้ย่อว่า P(OH)) จะพบว่า ค่า P(OH) จะมีค่ามากกว่า P เสมอ ซึ่งจะพบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า P(OH) - Alkalinity, P - Alkalinity และ M - Alkalinity กับปริมาณคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ดังนี้

ตารางที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง P(OH), P และ M กับปริมาณความเป็นด่างแบบต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์นี้	ไฮดรอกไซด์	คาร์บอเนต	ไบคาร์บอเนต	ความเป็นด่างทั้งหมด
P = 0	0	0	M	M
P = M/2	0	2P	M - 2P	M
P = M	P	0	0	M
P = M/2	2P - M	2 (M - P)	0	M
P = P(OH)	P(OH)	2P - P(OH)	0	2P - P(OH)
P(OH) = 0	0	2P	ไม่สามารถเกิดได้	



รูปที่ ... ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพด่างคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตอิออนกับค่า pH

M Alkalinity = ความเป็นด่างในรูปของคาร์บอเนตทั้งหมด + คาร์บอเนตทั้งหมด + ไฮดรอกไซด์ทั้งหมด

P-Alkalinity = $\frac{1}{2}$ คาร์บอเนต + ไฮดรอกไซด์ทั้งหมด

ไบคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ จะไม่อยู่ร่วมกันเช่นเดียวกับคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ และคาร์บอเนตจะไม่อยู่ร่วมกับตัวมันเอง

ที่ pH 8.0 - 8.4 จะมีแต่ความเป็นด่างไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนตไม่มีความเป็นด่างไบคาร์บอเนต

ที่ pH 8.4 - 8.6 จะมีแต่ความเป็นด่างคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ไม่มีความเป็นด่างไฮดรอกไซด์

ที่ pH 6.0 - 4.5 จะมีแต่ความเป็นด่างไบคาร์บอเนต ไม่มีความเป็นด่างคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์

ที่ pH 4.5 - 3.0 มี Mineral Acids

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของคาร์บอนไดออกไซด์ ไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต ในรูปต่าง ๆ และ pH ของน้ำ มีดังสมการต่อไปนี้

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

กรดคาร์บอนิก

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$ ไบคาร์บอเนต

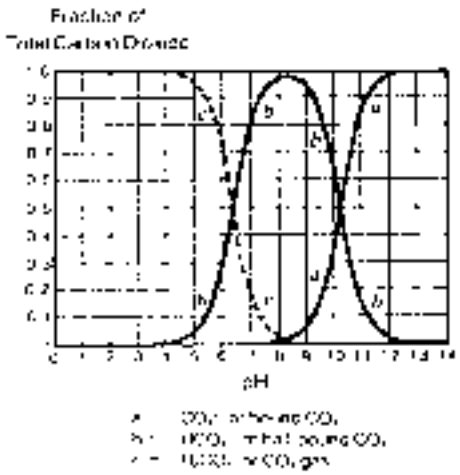
$$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{--}$$ คาร์บอเนต

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$

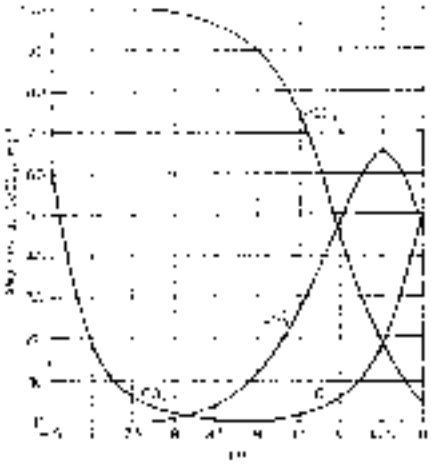
$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons 2H^+ + CO_3^{--}$$

$$CO_3^{--} + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + OH^-$$

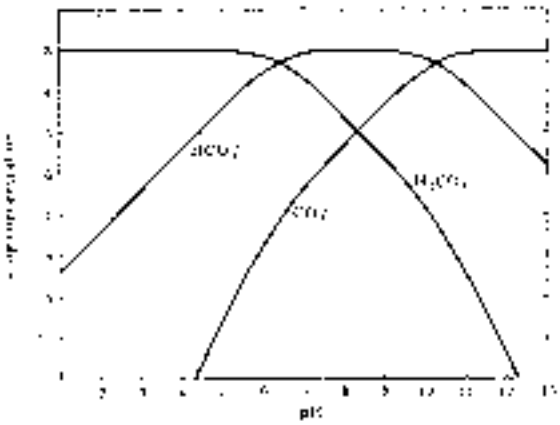
จะเห็นว่าความเป็นด่างทั้งสามชนิดและคาร์บอนไดออกไซด์ต่างก็อยู่ในสมดุลซึ่งกันและกัน เมื่อค่า pH มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะทำให้มีปริมาณหนึ่งไอออนหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ก็จะมีปฏิกิริยาอย่างใดอย่างหนึ่งเกิดขึ้น



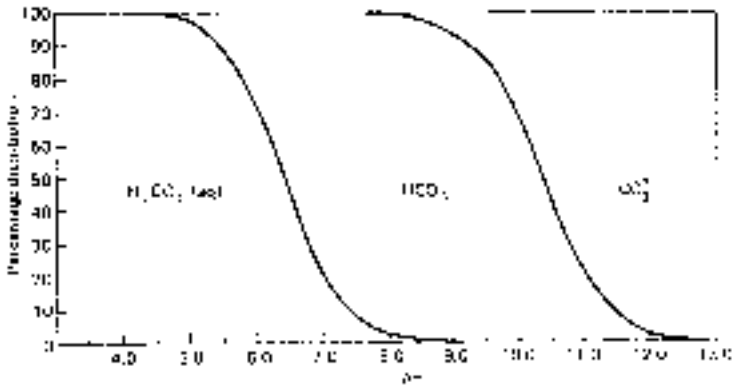
รูปที่ 1.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับปริมาณคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต กรดคาร์บอนิก หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



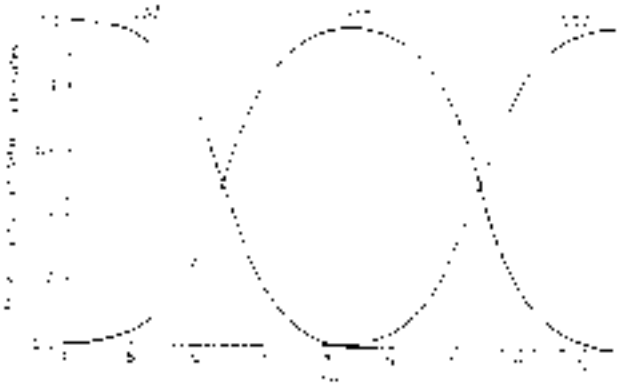
รูปที่ 1.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นด่างในรูปต่าง ๆ ที่ประกูที่ pH ต่าง ๆ



รูปที่ 1.14 ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต และกรดคาร์บอนิกที่ pH ต่าง ๆ



รูปที่ 1.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มคาร์บอเนตกับค่า pH แบบหนึ่ง



รูปที่ 1.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอิสระสมดุลในรูปของกลุ่มคาร์บอเนตกับค่า pH ของแหล่งน้ำ

ความเข้มข้นของความด่างในแหล่งน้ำธรรมชาติมีสาเหตุมาจากการไหลสลายของหินปูนและโดโลไมท์ น้ำฝนมีค่าความเป็นกรดเล็กน้อยเนื่องจากมีคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับหินปูนและโดโลไมท์ และละลายน้ำได้ ทำให้ค่า pH สูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความกระด้างของน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเขียนได้ดังนี้

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$$

$$MgCO_3 + H_2O + CO_2 \rightleftharpoons Mg(HCO_3)_2$$

1.2.10 ความกระด้าง (Hardness)

น้ำที่มีความกระด้างสูง หมายถึง น้ำที่ทำให้เกิดตะกรันจับกันแน่นเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำเพิ่มขึ้น ความกระด้างส่วนใหญ่จะเกิดจากธาตุกลุ่มที่ IIA ในตารางธาตุ ได้แก่ พวก Alkaline Earth Metal ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะที่มีประจุบวกสอง เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) สตรอนเชียม (Sr^{2+}) หรือเฟอรัส (Fe^{2+}) และแมงกานีส (Mn^{2+}) ไอออน ซึ่งเกิดจากประจุบวกของโลหะนี้จับกับไอออนประจุลบจากกรดต่าง ๆ ในน้ำ ทำให้เกิดเป็นความกระด้างขึ้น เช่น ยูเรียนและฟอสฟิเนตต่าง ๆ บางน้ำที่มีค่าความกระด้างอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สามารถใช้ในการอุปโภคบริโภคได้ และความกระด้างนี้ก็ยังมีผลกระทบต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ด้วย

ตารางที่ 1.8 ไอออนประจุบวกและไอออนประจุลบ ที่ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำ

ไอออนประจุบวก	ไอออนประจุลบ
Ca^{2+}	HCO_3^-
Mg^{2+}	SO_4^{2-}
Sr^{2+}	Cl^-
Fe^{2+}	NO_3^-
Mn^{2+}	SiO_3^{2-}

ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมมักเป็นที่นิยมใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความกระด้าง โดยรูป $CaCO_3$

การจัดประเภทความกระด้างของน้ำจืดได้ดังนี้

ความกระด้าง	พีพีเอ็มในรูป $CaCO_3$	สภาพน้ำ
	0 – 50	น้ำอ่อน
	50 – 100	ค่อนข้างอ่อน
	100 – 150	กระด้างเล็กน้อย
	150 – 200	ค่อนข้างกระด้าง
	200 – 300	กระด้าง
	มากกว่า 300	กระด้างมาก

ความกระด้างของน้ำเกิดจากน้ำฝนละลายชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ ก๊าซละลายและมีส่วนหนึ่งอยู่ในน้ำ และเมื่อฝนตกกระทบพื้นดินจะชะล้างเอาสิ่งสกปรกที่เกิดจากมนุษย์ เช่น ปุ๋ยต่างๆ ยาฆ่าแมลง และไดออกไซด์ต่างๆ ซึ่งมีค่าเป็นกรดลงในน้ำ และทำปฏิกิริยากับหินปูน ($CaCO_3$) ทำให้เกิดแคลเซียมไบคาร์บอเนต ($Ca(HCO_3)_2$) ละลายน้ำได้ และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อย แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ละลายน้ำได้บ้าง ความกระด้างแคลเซียมและแมกนีเซียมจึงเกิดขึ้นเพราะละลายในน้ำได้ดีกว่าเกลือ

มีน้ำที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ จะมีฤทธิ์เป็นกรดละลายหินปูน ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนตได้ เกิดเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนต ($Ca(HCO_3)_2$) และแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($Mg(HCO_3)_2$) ซึ่งทำให้น้ำมีความกระด้าง และเราเรียกน้ำนี้ว่าน้ำกระด้างชั่วคราว

ความกระด้างในน้ำมีอยู่สองประเภท เรียกว่า ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) ซึ่งแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. แบ่งตามประเภทของอนุมูลประจุบวกที่จับกับอิออนประจุลบ
2. แบ่งตามชื่ออนุมูลประจุบวก

1. **แบ่งตามประเภทของอนุมูลประจุบวกที่จับกับอิออนประจุลบ** แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

(1) ความกระด้างคาร์บอเนตหรือความกระด้างชั่วคราว (Carbonate or Temporary Hardness) ได้แก่ แคลเซียมและแมกนีเซียมที่ทำปฏิกิริยากับความกระด้างทั้งหมด ดังนี้

แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือหินปูน ไม่ละลายน้ำ ถ้าน้ำธรรมชาติมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่มาก ก็จะทำปฏิกิริยากับหินปูน ทำให้เกิดความกระด้างขึ้น

แคลเซียมไบคาร์บอเนต ($Ca(HCO_3)_2$) เมื่อละลายน้ำจะทำให้เกิดความกระด้างในน้ำ ถ้าน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเดือด อุณหภูมิหนึ่ง แคลเซียมไบคาร์บอเนตจะสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งไม่ละลายน้ำจะตกตะกอนเป็นตะกรันในกาต้มน้ำ

แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) หรือ Magnesite มีอยู่ในแร่โดโลไมต์ (Dolomite) ซึ่งเป็นแร่ที่พบมากในธรรมชาติ

แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($Mg(HCO_3)_2$) มีอยู่ในน้ำธรรมชาติทั่วไป แต่ไม่ค่อยพบในน้ำดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรม

สารที่เป็นสาเหตุของความกระด้างชั่วคราว ก็เพราะว่าเมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 81.5 องศาเซลเซียสขึ้นไป ความกระด้างจะสลายตัวได้ดังนี้

$$Ca(HCO_3)_2 + \text{ความร้อน} \rightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2$$

$$Mg(HCO_3)_2 + \text{ความร้อน} \rightarrow MgCO_3 + H_2O + CO_2$$

$$MgCO_3 + H_2O + \text{ความร้อน} \rightarrow Mg(OH)_2 + CO_2$$

จะเห็นว่าปฏิกิริยาการสลายตัวจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ถ้าเป็นหม้อต้มน้ำ ก๊าซนี้จะผสมไปกับไอน้ำ และเมื่อน้ำควบแน่นเป็นหยดน้ำ ก็จะทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ ความกระด้างชั่วคราวนี้บางทีก็เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Alkaline Hardness

(2) ความกระด้างที่ไม่ใช่คาร์บอเนตหรือความกระด้างถาวร (Non-carbonate or Permanent Hardness) ได้แก่ น้ำที่มีความกระด้างอยู่ในรูปของแคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมคลอไรด์ และไบคาร์บอเนตของโลหะอื่นบางตัว เช่น แมกนีเซียม ซึ่งจะไม่สลายตัวเมื่อถูกความร้อน ไม่ตกตะกอนได้ง่าย เว้นแต่มีการแลกเปลี่ยนสาร เช่น ในน้ำแร่ไซโอไน้ ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนโซเดียมเป็นไฮโดรเจน

แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) หรือยิปซัม เกลือชนิดนี้จะตกตะกอนเป็นตะกรันในหม้อไอน้ำ

แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำทั่วไป

แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) หรือเกลือขม พบมากในน้ำทั่วไป

แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) มีคุณสมบัติเหมือนกับ $CaCl_2$

สารพวก $Ca(NO_3)_2$ และ $Mg(NO_3)_2$ ก็อยู่ในข่ายนี้เหมือนกัน แต่ไม่ค่อยพบในน้ำธรรมชาติ

ความกระด้างพวกนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Non-Alkaline Hardness บางครั้งมีชื่อเรียกอย่างเฉพาะเจาะจงลงไปว่าเป็นความกระด้างถาวร ซึ่งหมายถึงความกระด้างที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการต้มน้ำ มีสารบางชนิดดังนี้

โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) หรือโซดาแอช ใช้ในการปรับสภาพน้ำ

โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ทำให้เกิดความเป็นด่าในน้ำ

ทั้ง Na_2CO_3 และ $NaHCO_3$ เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัว จะสลายตัวที่มากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับความร้อนและเวลาที่ได้รับ ปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตเป็นดังนี้

$$2\ NaHCO_3 + \text{ความร้อน} \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O + CO_2$$

$$Na_2CO_3 + H_2O + \text{ความร้อน} \xrightarrow{\text{ตัวเร่ง}} 2\ NaOH + CO_2$$

โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) ถ้ามีมากจะทำให้น้ำกร่อยจนเค็ม

โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) คือ Glauber's Salts

2. และความอ่อนประจุบวก แบบนี้ใช้กันมากในการศึกษาและการควบคุมน้ำเสีย ที่ทำงานด้วยหลักการของการใช้ความถี่ในการสั่นสะเทือน เช่น Line Sub Softening ซึ่งจะทำให้ความกระด้างลดลงได้ ในขณะที่ใช้ความถี่ในการสั่นสะเทือนที่ต่างกัน จะทำให้ความกระด้างที่ลดลงได้ต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อการใช้งานของน้ำในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

1.2.11 ความกระด้างเทียม (Pseudo-Hardness)

โดยทั่วไปการวัดความกระด้างโดยใช้สารละลาย EDTA และใช้ Eriochrome Black T เป็นอินดิเคเตอร์ น้ำที่มีความกระด้างถาวรบางชนิดเมื่อนำมาวัดความกระด้างโดยวิธีการไทเทรตด้วย EDTA จะให้ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าความกระด้างที่แท้จริง ตัวอย่างเช่น น้ำที่มีโซเดียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคลอไรด์ น้ำจะปฏิกิริยากับสารละลาย EDTA ได้ดีมาก ดังนี้

$$Mg^{2+} + Na_2CO_3 \rightarrow MgCO_3 + 2Na^+$$

ดังนั้น น้ำที่มีความกระด้างถาวรบางชนิดจึงอาจมีค่าความกระด้างต่ำกว่าที่เป็นจริงได้ ซึ่งเป็นข้อเสีย ในทางปฏิบัติจึงมีการดัดแปลงวิธีการวัดความกระด้างโดยวิธีการไทเทรตใหม่ เพื่อให้ได้ค่าความกระด้างที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นด่างและความกระด้าง

ความเป็นด่างในน้ำ เกิดจากสารประกอบที่เป็นด่างหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นความเป็นด่างทั้งหมดและความเป็นด่างต่างๆ ได้ดังนี้

ให้ TH = ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness)

TA = ความเป็นด่างทั้งหมด (M-Alkalinity or Total Alkalinity)

กรณี 1 ถ้า TH ≥ TA

Carbonate Hardness = TA

Non carbonate Hardness = TH TA

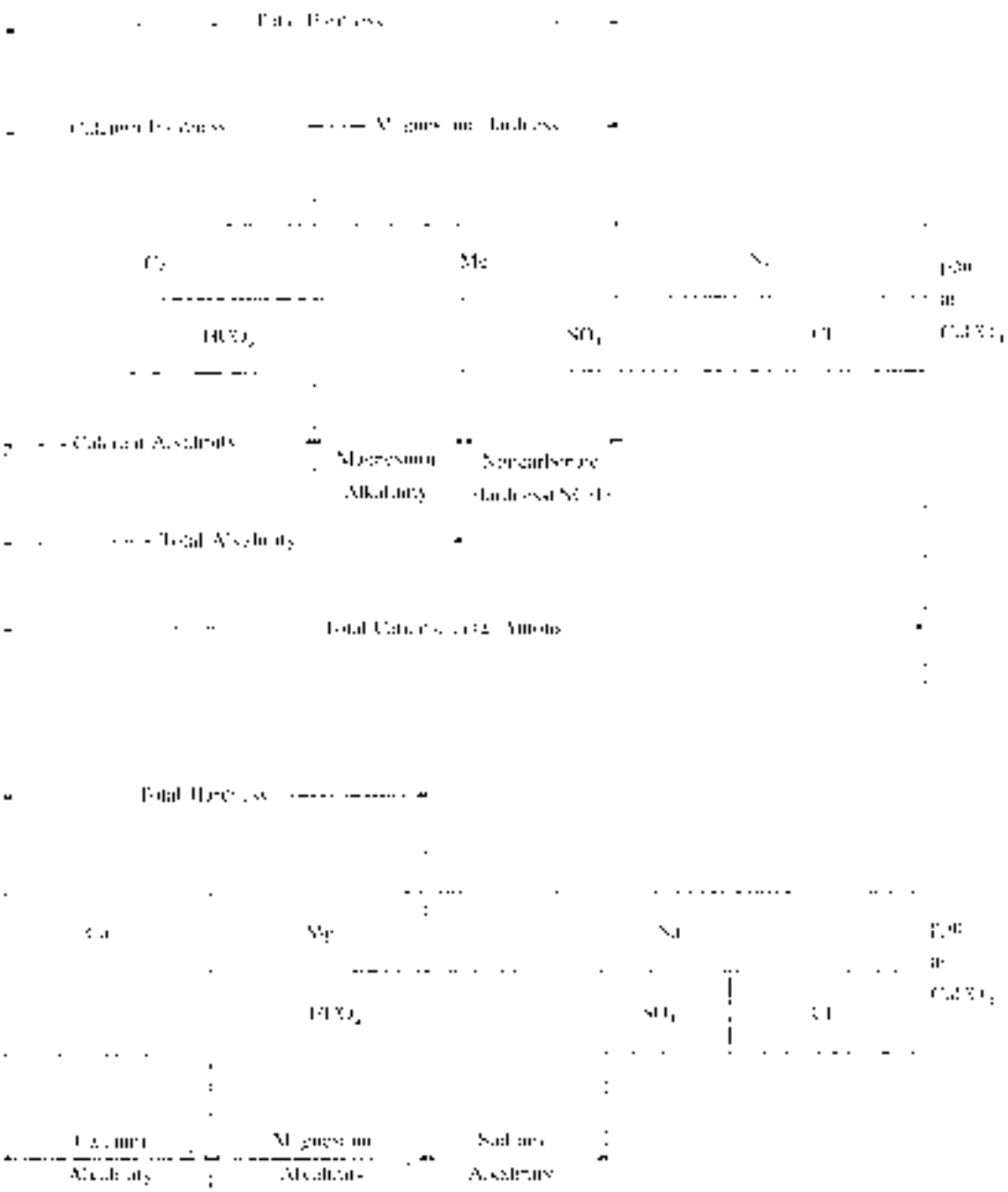
กรณี 2 ถ้า TH < TA

Carbonate Hardness = TH

Sodium Alkalinity = TA-TH

ในกรณีที่มี Sodium Alkalinity เกิดขึ้นจะไม่มี ผลให้ Calcium Alkalinity และ Calcium Carbonate Hardness และ Magnesium Alkalinity และ Magnesium Carbonate Hardness ไม่สามารถอยู่ร่วมกันได้ในสภาวะที่เป็นกลางและด่าง ดังนี้

Calcium Alkalinity	=	Calcium Hardness หรือ TA แล้วแต่ค่าใดจะน้อยกว่า
Magnesium Alkalinity	=	Magnesium Hardness ถ้า TA > TH
Magnesium Alkalinity	=	TA - Calcium Hardness ถ้า TH < TA
Sodium Alkalinity or Residual Alkalinity		TA - TH



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการเขียนไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของไอออนต่างๆ ในรูปแบบ

Calcium Non-carbonate

Hardness - Calcium Hardness - Calcium Alkalinity

Magnesium Non-carbonate

Hardness - Magnesium Hardness - Magnesium Alkalinity

Total Non-carbonate Hardness - III - IA

หมายเหตุ 1. ในน้ำจะมีทั้ง Sodium Alkalinity และ Magnesium Alkalinity ปนอยู่

หมายเหตุ 2. ค่าความกระด้างที่ได้นี้ก็คือ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือชนิดอื่นๆ ในน้ำธรรมชาติ ดังนั้นจึงใช้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบความกระด้างของน้ำชนิดต่างๆ ได้ ถึงแม้ว่าในน้ำธรรมชาติจะมีเกลือชนิดอื่นๆ ปนอยู่ด้วยก็ตาม

แคลเซียมและแมกนีเซียม (Calcium and Magnesium)

น้ำที่มีแคลเซียมและแมกนีเซียมอยู่มากๆ เราเรียกว่าน้ำกระด้าง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยไทเทรตกับ EDTA ที่ pH 10.0 หรือการวิเคราะห์โดยวิธี Mercvde ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายกว่าวิธีแรก แต่ก็มีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่บ้าง

ความกระด้างแมกนีเซียม = ความกระด้างทั้งหมด - ความกระด้างแคลเซียม

โซเดียมและโพแทสเซียม (Sodium and Potassium)

เป็นพวก Alkali Earth Metal โดยทั่วไปแล้วแคลเซียมจะพบในน้ำธรรมชาติน้อยกว่าโซเดียม เนื่องจากโซเดียมในน้ำธรรมชาติจะมีมากเมื่อเทียบกับแคลเซียม ดังนั้นจึงมีการนำเอาโซเดียมมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เช่น ใช้ในการกำจัดความกระด้างของน้ำ

ตารางที่ 1.9 ปริมาณโซเดียมในน้ำประเภทต่างๆ

	ปริมาณโซเดียม (ppm)
น้ำแร่	1 - 5
น้ำประปา	10-100
น้ำทะเล	10,000
น้ำเกลือต่างๆ	10,000

กลไกของการแลกเปลี่ยนไอออนในเม็ดดินเหนียวและในเรซินสังเคราะห์ที่ใช้ในการกำจัดความกระด้างนั้นมีคุณสมบัติคล้ายกัน ในการวิเคราะห์โซเดียมและโพแทสเซียมนั้นมีวิธีการที่ใช้กันอยู่ 2 วิธี คือ Flame Photometry หรือ Atomic Absorption Spectrophotometry ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรกนั้นจะใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำน้อยกว่าวิธีหลัง

คลอไรด์ (Chlorides)

ปริมาณคลอไรด์ในน้ำจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้ในการกัดกร่อนของน้ำ ในน้ำธรรมชาติจะมีคลอไรด์ปนอยู่ด้วยเสมอ เช่น น้ำจากแม่น้ำ น้ำในทะเล น้ำจากบ่อ

[illegible] น้ำทะเล [illegible] คลอไรด์ที่ [illegible] น้ำ [illegible] ๆ [illegible] น้ำบาดาลที่ [illegible] จะมีคลอไรด์น้อย น้ำทะเลจะมีคลอไรด์มาก [illegible] ทั่วไป คือ $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ แต่น้ำผิวดินมี $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ [illegible] คลอไรด์ประมาณ [illegible] คลอไรด์ [illegible] ผิว [illegible] คลอไรด์ [illegible] ตัวและกัน [illegible] คลอไรด์ [illegible] อยู่ในน้ำ [illegible] น้ำที่มีคลอไรด์มากกว่า [illegible] น้ำจะมีรสกร่อย [illegible] น้ำเพิ่ม [illegible] (Blow Down) [illegible] น้ำเพิ่ม (Make up)

ซัลเฟต (Sulfate)

พบในน้ำ [illegible] ปริมาณซัลเฟต [illegible] ซัลเฟต [illegible] Glauber Salt (Na_2SO_4) [illegible] แคลเซียมซัลเฟต [illegible] ซัลเฟต [illegible]

ไนเตรตและไนไตรต์ (Nitrate & Nitrite)

[illegible] ไนเตรต [illegible] น้ำ [illegible] ไนเตรต 10 - 20 พีพีเอ็ม [illegible]

[illegible] (Embrittlement) [illegible]

[illegible] ไนไตรต์ [illegible]

ฟอสเฟต (Phosphate)

ฟอสเฟตในน้ำ [illegible] 2 ประเภท คือ

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate)
2. โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate)

[illegible] อยู่ในรูป $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-} [illegible]

Polyphosphate = Total Inorganic Phosphate - Orthophosphate

[illegible]

ซิลิกา (Silica)

[illegible] ซิลิกา (SiO_2) [illegible]

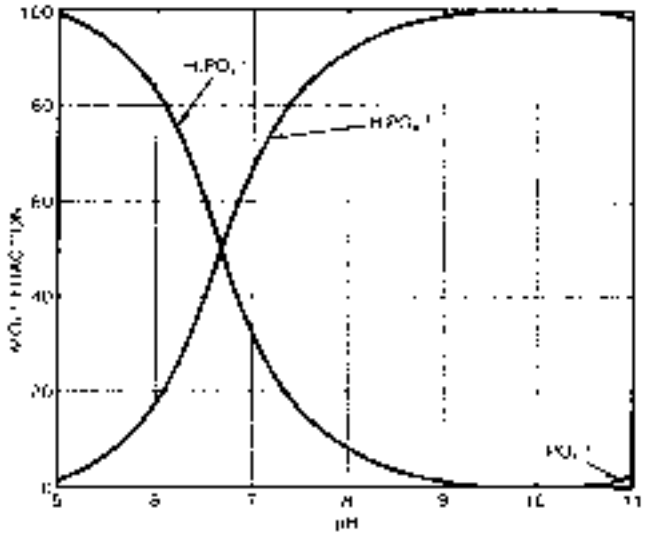
[illegible]

เหล็ก (Iron)

น้ำใต้ดินจะมีเหล็กละลายอยู่ด้วย ในน้ำดิบจากบ่อน้ำลึกอยู่ในรูปของเหล็กไบคาร์บอเนต $Fe(HCO_3)_2$ น้ำที่มีเหล็กปนอยู่จะมีสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ เหล็กนี้จะตกตะกอนได้ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกับอากาศ และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_3$ เหล็กในน้ำจะปนอยู่ในสองรูปแบบคือ เฟอร์รัสไบคาร์บอเนตและเฟอร์ริกไบคาร์บอเนต ปกติจะไม่พบเฟอร์ริกไบคาร์บอเนต เพราะมันจะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ไปหมดแล้ว ในขณะที่เฟอร์รัสไบคาร์บอเนตจะมีเหล็กอยู่ในรูปของไอออนเฟอร์รัส (Fe^{++})

$$4\,Fe^{++} + 8\,HCO_3^- + 2\,H_2O + O_2 \rightarrow 4\,Fe(OH)_3 + 8\,CO_2$$

ในการกำจัดเหล็กที่อยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปเฟอร์รัสก่อน ดังนั้นน้ำดิบจะต้องผ่านกระบวนการออกซิไดซ์ให้เป็นเฟอร์ริกก่อน สำหรับน้ำที่มีเหล็กปนอยู่ในรูปเฟอร์ริกนี้จะมีสีแดงอิฐและไม่ละลายน้ำ น้ำที่มีเหล็กปนอยู่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่เหมาะสำหรับการนำไปผลิตน้ำประปาและจะมีสีแดงตกตะกอนอยู่ น้ำที่มีเหล็กปนอยู่ด้วยเมื่อนำไปซักผ้าจะทำให้ผ้าเป็นสีเหลืองได้ และถ้าปล่อยทิ้งไว้นาน ๆ ก็จะทำให้ท่อตัน



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสเฟตและค่า pH

แมงกานีส (Manganese)

มักจะพบอยู่ร่วมกับเหล็กในน้ำ แต่ปริมาณแมงกานีสในธรรมชาติจะน้อยกว่าเหล็กประมาณครึ่งหนึ่ง ปริมาณที่ให้มีได้ในน้ำสำหรับน้ำใช้ไม่ควรเกิน 0.05 พีพีเอ็ม แมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์ได้ช้ากว่าเหล็ก จะนั้นจึงกำจัดได้ยากกว่าเหล็ก แมงกานีสที่พบในน้ำส่วนมากจะอยู่ในรูปแมงกานีสไบคาร์บอเนต ($Mn(HCO_3)_2$) แมงกานีสที่ละลายในน้ำตามธรรมชาติอยู่สองรูป แมงกานีส (Mn^{+2}) และแมงกานิก (Mn^{+4}) แมงกานีสจะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนในอากาศและตกตะกอนกับเหล็ก

$$2\,Mn^{+2} + 4\,HCO_3^- + 2\,H_2O + O_2 \longrightarrow 2\,Mn(OH)_4 + 4\,CO_2$$

ก๊าซออกซิเจน (Oxygen, O_2)

ในธรรมชาติจะมีก๊าซออกซิเจนอยู่น้อยมาก โดยน้ำบาดาลมักเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ดี ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ออกซิเจนละลายในน้ำได้ 14.6 พีพีเอ็ม ที่ 25 องศาเซลเซียส ละลายได้ 8.4 พีพีเอ็ม จะเห็นว่าที่อุณหภูมิสูงน้ำจะเพิ่มขึ้นออกซิเจนจะละลายเป็นน้ำได้น้อยลง วิธีการนี้นำมาประยุกต์ใช้ในการไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากน้ำ ในน้ำบาดาลจะมีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่น้อย เพราะออกซิเจนที่ละลายในน้ำฝนหรือน้ำผิวดินที่ซึมลงสู่ใต้ดิน จะถูกจับนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของจุลินทรีย์ในดินน้ำ ก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำจะทำให้เหล็กตกตะกอนได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากน้ำให้มากที่สุด เพื่อจะใช้น้ำในกระบวนการต่อไป

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide, H_2S)

เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นเหม็นคล้ายไข่เน่า เกิดจากการสลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ และสารอินทรีย์ต่างๆ น้ำที่มีก๊าซนี้ละลายอยู่ตั้งแต่ 0.5 พีพีเอ็ม จะมีกลิ่นรบกวน ถ้ามีมากกว่า 1 พีพีเอ็ม จะมีกลิ่นรุนแรง ถ้าน้ำมีสภาพเป็นด่าง เช่น มีโซเดียมไบคาร์บอเนตอยู่มาก ๆ เมื่อน้ำนิ่งไว้ในที่ที่มีอากาศ น้ำบาดาลตามแหล่งที่ไม่มีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่เลยจะมีกลิ่นเหม็นมาก ๆ แบคทีเรียบางชนิดจะเปลี่ยนซัลเฟตให้เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide, CO_2)

ก๊าซนี้มีอยู่ในน้ำในธรรมชาติทุกแหล่ง เกิดจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศและจากน้ำใต้ดินที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของจุลินทรีย์ เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) กรดนี้จะแตกตัวเป็นคาร์บอเนตไบคาร์บอเนต ทำให้น้ำมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนโลหะได้ง่าย เมื่อผสมในสารละลายที่มีด่างมากๆ จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หมดไป

$$HCO_3^- + H_2O + \text{ด่างมาก} \longrightarrow H_2CO_3 + OH$$

และคาร์บอเนตจะละลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา

$$H_2CO_3 \cdots \leftarrow CO_2 + H_2O$$

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำจะมีส่วนในการเพิ่มความกระด้างของน้ำ โดยจับกับแคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียม ซึ่งมีอยู่ในรูปต่างๆ ของแร่ธาตุต่างๆ ในดิน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งไม่ได้มีส่วนในการเพิ่มความกระด้างของน้ำ จะเรียกว่า การ์บอนไดออกไซด์อิสระ (Free Carbondioxide)

1.4 คุณสมบัติของน้ำสำหรับงานอุตสาหกรรมและหม้อไอน้ำ

1.4.1 การปรับอากาศ

น้ำที่ใช้ในกระบวนการปรับอากาศจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ ปราศจากสิ่งสกปรก ตะกอน และแบคทีเรีย ในรูปแบบต่างๆ

1.4.2 การผลิตขนมปัง

น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตขนมปังจะต้องปราศจากสิ่งสกปรกต่างๆ สำหรับการอุปโภคบริโภค มีปริมาณเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียมน้อยกว่า 0.02 มิลลิกรัมสมมูล ไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องไม่มีกลิ่นและรส

1.4.3 การผลิตเบียร์

น้ำที่จะผลิตเบียร์จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

pH 6.5 - 7.0

เหล็ก น้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

แมงกานีส น้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

TDS ต่ำกว่า 500

ความเป็นด่างทั้งหมด ต่ำกว่า 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป $CaCO_3$

ไซยาไนด์คลอไรด์ น้อยกว่า 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ น้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

ไม่มีรสชาติ กลิ่น และคลอรีน

1.4.4 การผลิตยาและเครื่องสำอาง

ผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมผลิตยาและเครื่องสำอางแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ 4 กลุ่ม ดังนี้

1. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง เช่น ยาเม็ด ยาแคปซูล
2. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว เช่น ยาน้ำที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์
3. ผลิตภัณฑ์ที่เป็น Emulsified เช่น ครีม โลชั่น
4. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแขวนลอย (Suspension) เช่น ยาธาตุอภัยสารชนิดน้ำ ยาน้ำแขวนตะกอน ยาผงปรุงน้ำ

ในการผลิตเครื่องสำอางที่ต้องใช้น้ำบริสุทธิ์มากเช่นกันเพราะผลิตภัณฑ์นั้นจะเป็นเครื่องสำอางที่ดี ถ้าน้ำมีความสกปรกจะทำให้กระบวนการผลิต และทำให้สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป เช่นเดียวกับการผลิตครีมและโลชั่นก็ต้องใช้น้ำที่บริสุทธิ์ เช่น โคโลญจน์ และ After Shaves ซึ่งจะต้องมีลักษณะใสอยู่ตลอดเวลา การที่น้ำมีค่า pH เปลี่ยนแปลงไปอาจทำให้เกิดการตกตะกอนของไอออนทำให้ใส ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังทำให้สารละลายบางชนิดมีสีเปลี่ยนไป เช่น Compound Oxidation & Mixtures ซึ่งมีสีเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงค่า pH และความกระด้างในน้ำ หรือทำให้เกิดการตกตะกอนในการผลิตสารละลายที่มี Surfactant หรือ Detergent เช่น แชมพูและสบู่ แร่ธาตุแคลเซียมจะทำให้ Sol Viscosity และ Gel Strength ของอัลจิเนต (Alginate) และ Pectin Dispersions ต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ในน้ำอาจทำให้มีปัญหาเรื่องกลิ่น สี และรส

ในการผลิตยาสำหรับรับประทานนั้น จะต้องใช้น้ำที่บริสุทธิ์มาก (Purified Water) และสำหรับการผลิตยาฉีดจะต้องใช้น้ำที่มีคุณภาพดีกว่าน้ำบริสุทธิ์ เพื่อให้ได้ตามประกาศของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ส่วนในการผลิตเครื่องสำอางก็ต้องใช้น้ำบริสุทธิ์เช่นกัน

คุณภาพน้ำบริสุทธิ์มาก (Purified Water)

(ตาม Eur. P. European Pharmacopoeia)

ความเป็นกรด	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
ความเป็นด่าง	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
คลอไรด์	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
ไนเตรต, ไนไตรต์	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
ซัลเฟต	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
แอมโมเนีย	น้อยกว่า	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
แคลเซียม	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
โลหะหนัก	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
Oxidisable Matter (PV)	น้อยกว่า	5	มิลลิกรัม/ลิตร
Non Volatile Matter (TDS)	น้อยกว่า	10	มิลลิกรัม/ลิตร

คุณภาพน้ำสำหรับยาฉีด (Water for injections) นั้น มีคุณสมบัติส่วนใหญ่เหมือนกับคุณภาพน้ำบริสุทธิ์มาก และนอกเหนือจากนี้คือ ต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรค (Sterile) และปราศจากไพโรเจน (Pyrogen)

ชนิดของน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง

ครีม อิมัลชั่น และโลชั่น	น้ำบริสุทธิ์มาก
ยาเม็ด ยาผง	น้ำบริสุทธิ์มาก
สบู่	น้ำอ่อน
ยาน้ำและยาแขวนตะกอน	น้ำบริสุทธิ์มาก
แชมพูสระผม	น้ำบริสุทธิ์มาก
ยาฉีด	น้ำสำหรับยาฉีด
โคโลญจน์ After Shaves	น้ำบริสุทธิ์มาก

น้ำบริสุทธิ์ ... ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ... ให้ต้องกำจัดจุลินทรีย์ ... เช่น Bacteria ... Organism ...

1.4.5 การผลิตอาหารกระป๋อง

น้ำที่ใช้ต้องมีคุณภาพดังนี้

ความกระด้างทั้งหมด		...	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
เหล็ก	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร
แมงกานีส	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร

... ที่ปราศจากสิ่งแขวนลอย

1.4.6 การผลิตน้ำอัดลม

น้ำที่ใช้ผลิตน้ำอัดลม ... ต้องมีคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติม คุณภาพที่ต้องการมีดังนี้

ความขุ่น	น้อยกว่า	...	JTU
ปริมาณสารอินทรีย์และความต้องการคลอรีน	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร
ความกระด้างทั้งหมด	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
เหล็ก	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร
แมงกานีส	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร
TDS	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร
ความเป็นด่างทั้งหมด		...	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร

ไม่มีกลิ่นและรส

1.4.7 น้ำหล่อเย็น

คุณภาพน้ำที่ต้องการมีดังนี้

ความกระด้างทั้งหมด	ไม่มากกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร
เหล็ก	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร
แมงกานีส	น้อยกว่า	...	มิลลิกรัม/ลิตร

น้ำจะต้องไม่มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนและเกิดหินปูนในท่อส่ง

1.4.8 การผลิตอาหาร

น้ำที่มีคุณภาพดื่มได้ตามมาตรฐาน ... น้ำสำหรับการอุตสาหกรรมอาหาร ... จะใช้สำหรับการปรุง ... การที่จะทราบว่าน้ำนั้นมีสิ่งแขวนลอย ... มีกลิ่นและรสหรือไม่ ... มิลลิกรัม/ลิตร

1.4.9 การผลิตน้ำแข็ง

น้ำที่ใช้ทำน้ำแข็งจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

ความขุ่น	น้อยกว่า	5.0	JTU
สี	น้อยกว่า	5	หน่วย
ความกระด้างทั้งหมด		50 - 80	มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป $CaCO_3$
TDS	น้อยกว่า	800	มิลลิกรัมต่อลิตร
เหล็กและแมงกานีส	น้อยกว่า	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟต	น้อยกว่า	10	มิลลิกรัมต่อลิตร

น้ำในน้ำมีแคลเซียมและแมกนีเซียมในการ์บอเนต จะทำให้มีสีขึ้นในน้ำแข็ง การต้มน้ำดื่มจะช่วยไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และช่วยให้น้ำแข็งใสขึ้น แต่ไม่สามารถแยกสิ่งปนเปื้อนได้ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียม ซัลเฟต และคลอไรด์ และต้องมีน้อยกว่า 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในน้ำแข็ง

1.4.10 การซักฟอก

น้ำที่ใช้ซักฟอกควรจะมี

เหล็กและแมงกานีส และสารต่างๆ ไม่เกินกว่า	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
ความกระด้างไม่เกินกว่า	150	มิลลิกรัมต่อลิตร

เพื่อจะไม่เปลืองสบู่หรือผงซักฟอก

1.4.11 การผลิตพลาสติก

ในการผลิตพลาสติกเซลโลเฟน น้ำจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

ความขุ่น	น้อยกว่า	5.0	JTU
สี	น้อยกว่า	5	หน่วย
เหล็ก	น้อยกว่า	0.05	มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส	น้อยกว่า	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
TDS	ต่ำกว่า	250	มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4.12 การผลิตกระดาษ

น้ำที่ใช้ในการผลิตกระดาษแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติต่างกัน เช่น น้ำที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

ความขุ่น	น้อยกว่า	5.0	JTU
สี	น้อยกว่า	5	หน่วย
ความกระด้างทั้งหมด	น้อยกว่า	50	มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป $CaCO_3$
TDS	ต่ำกว่า	0.050	มิลลิกรัมต่อลิตร
เหล็กและแมงกานีส	น้อยกว่า	0.1	มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4.13 การผลิตเยื่อกระดาษ (Rayon Pulp)

ความขุ่น	ไม่เกินกว่า	5.0	JTU
สี	ไม่เกินกว่า	5	หน่วย
ความกระด้างทั้งหมด	น้อยกว่า	5	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
เหล็ก	น้อยกว่า	0.05	มิลลิกรัม/ลิตร
แมงกานีส	ไม่เกินกว่า	0.03	มิลลิกรัม/ลิตร
TDS	ต่ำกว่า	100	มิลลิกรัม/ลิตร
ความเป็นด่างทั้งหมด	น้อยกว่า	50	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
ความเป็นด่างไฮดรอกไซด์	น้อยกว่า	6	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
ทองแดง	น้อยกว่า	1	มิลลิกรัม/ลิตร
ซิลิกา	น้อยกว่า	25	มิลลิกรัม/ลิตร
Al_2O_3	ไม่เกินกว่า	5	มิลลิกรัม/ลิตร

1.4.14 การผลิตเส้นใยสังเคราะห์

ความขุ่น	น้อยกว่า	0.5	FTU
pH	ในช่วง	5.8 - 9.5	
เหล็กและแมงกานีส	ไม่มี		

1.4.15 การฟอกหนัง

ความกระด้างทั้งหมด	น้อยกว่า	100	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
ความเป็นด่างทั้งหมด	ต่ำกว่า	150	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
ความเป็นด่างไฮดรอกไซด์	น้อยกว่า	5	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$
เหล็ก	น้อยกว่า	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
แมงกานีส	น้อยกว่า	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
pH	เท่ากับ	6	

1.4.16 อุตสาหกรรมทอผ้า

ในการผลิตโดยปกติ ต้องการน้ำที่มีคุณภาพดังนี้

ความกระด้างทั้งหมด	น้อยกว่า	20	มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป $CaCO_3$	
เหล็ก	น้อยกว่า	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร	
แมงกานีส	น้อยกว่า	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร	
ระดับที่ทำให้เหล็ก	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร	เพื่อป้องกันการเกิดสี ไม่ติดสนิมเสื้อ

1.1.17 การผลิตผ้าพันแผลยางยืด

ข้อกำหนดน้ำดูดซึมเพิ่มขึ้น

สี ต้องทำ 5 ตัวอย่าง

ความเป็นกรดและด่างของน้ำ ไม่มี

ไม่ควรมีสารเจือปนจากผ้า แคลเซียม แมกนีเซียม และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

1.1.18 อุตสาหกรรมกึ่งตัวนำ – เซมิคอนดักเตอร์

ของแข็งทั้งหมด (TS)	1.5	กรัม/ลิตร
สารแขวนลอย (SS)	100	หน่วย/ล้าน มิลลิลิตร
ความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25°C	0.50	ไมโครซีเมนส์/ซม.
ซิลิกาเป็น ซีโอดีเพิ่ม	1.0	
คลอไรด์ ซีโอดีเพิ่ม	0.2	
ยูเรีย	5	ตัว/มิลลิลิตร

1.6 คุณภาพน้ำบริโภคตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 257 เล่ม 1 – 2521

1.6.1 คุณลักษณะทางกายภาพ

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด
สี หน่วยแพลทินัม โคบอลต์	5
รส	ไม่เป็นที่รังเกียจ
กลิ่น	ไม่เป็นที่รังเกียจ
ความขุ่น หน่วยซิลิกา	5
ความเป็นกรด – ด่าง (pH)	6.5 – 8.5

1.6.2 คุณลักษณะทางเคมี

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด (มิลลิกรัม/ลิตร)
ปริมาณสารทั้งหมด	500
เหล็ก (Fe)	0.5
แมงกานีส (Mn)	0.3
เหล็กและแมงกานีส	0.5
ทองแดง (Cu)	1.0

สังกะสี (Zn)	5.0
แคลเซียม (Ca)	75
แมกนีเซียม (Mg)	50
ซัลเฟต (SO_4)	250
คลอไรด์ (Cl)	250
ฟลูออไรด์ (F)	0.7
ไนเตรต (NO_3)	45
Alkyl Benzyl Sulfonates	0.5
Phenolic Substances, as Phenol	0.001

1.5.3 สารปนเปื้อน

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ปรอท (Hg)	0.002
สารหนู (As)	0.05
แคดเมียม (Cd)	0.01
โครเมียม (Cr Hexavalent)	0.05
ไซยาไนด์ (CN)	0.2
ตะกั่ว (Pb)	0.05
เซเลเนียม (Se)	0.01
บาเรียม (Ba)	1.0

1.5.4 คุณลักษณะทางจุลชีววิทยา

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด
จำนวนแบคทีเรียทั้งหมด	500 โคโลนีต่อน้ำ 1 มิลลิลิตร
เอ็นทีโรไค	ไม่มีในน้ำ 100 มิลลิลิตร (ดูวิธีตรวจสอบในภาคผนวก ก)
อีโคไล (E. Coli)	ไม่มี

1.6 คุณภาพน้ำเลี้ยงเข้าหม้อไอน้ำ

1.6.1 ตามมาตรฐาน ASME

แรงดันโพลคัน psig	เหล็ก ppm Fe	ทองแดง ppm Cu	ความกระด้างทั้งหมด ในรูป $CaCO_3$ พีพีเอ็ม
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	0
[illegible]	[illegible]	[illegible]	0

1.6.2 ตาม British Standard (สำหรับหม้อไอน้ำชนิดทองแดงน้ำ)

ความดันที่จ่ายออก kg/cm²	30	40	60	80	100	120	มากกว่า 120
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	ND	ND	ND	ND
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]			[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
[illegible]	[illegible]						
[illegible]	[illegible]						

ND = ตรวจไม่พบ (Not Detectable)

ชนิดของพลาสติกที่ทดสอบ	ทดสอบไฟ				ทดสอบน้ำ							
การดูดซึมน้ำ 24 ชั่วโมง												
ความหนาแน่น												
ความต้านทานแรงดึง												
ความต้านทานแรงอัด												
ความต้านทานแรงดัด												
ความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด												
ความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปี												
ค่าดัชนีออกซิเจน												
ความต้านทานความร้อน												
ความต้านทานความร้อนต่อเนื่อง												
ความต้านทานความร้อนต่อเนื่องแบบมีแรงกระแทก												
ค่าดัชนีความต้านทานความร้อน												
ค่าดัชนีความต้านทานความร้อนต่อเนื่องแบบมีแรงกระแทก												
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน												
ค่าการนำความร้อน												
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ												
ค่าการแพร่ความร้อน												
ความต้านทานไฟฟ้าแบบปริมาตร												
ความต้านทานไฟฟ้าแบบผิว												
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก												
ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียไดอิเล็กตริก												
ค่าความต้านทานการอาร์กผิว												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบเทียบเคียง												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบทิ่มแทง												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบเหนี่ยวนำ												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูง												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงเหนี่ยวนำ												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงทิ่มแทง												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงเทียบเคียง												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงผิว												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงปริมาตร												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงไดอิเล็กตริก												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงการสูญเสียไดอิเล็กตริก												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงการนำความร้อน												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงความจุความร้อนจำเพาะ												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงการแพร่ความร้อน												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงค่าดัชนีความต้านทานความร้อน												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงค่าดัชนีความต้านทานความร้อนต่อเนื่องแบบมีแรงกระแทก												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงค่าดัชนีความต้านทานความร้อนต่อเนื่อง												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงค่าดัชนีออกซิเจน												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปี												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงความต้านทานแรงดัด												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงความต้านทานแรงอัด												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงความต้านทานแรงดึง												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงความหนาแน่น												
ค่าความต้านทานการอาร์กแบบความร้อนสูงการดูดซึมน้ำ 24 ชั่วโมง												

ตารางที่ ๖.๓ มาตรฐานน้ำเลี้ยงป้อนเข้าหม้อไอน้ำชนิดไหลผ่านตลอด (Once Through) ตาม ASME

ความดันใช้งาน kg/cm² / รายการ	≤20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160	>160
pH ที่ 25°C	10.5-11.0	10.5-10.7[1]	9.1-9.5[1]	9.0-9.6	9.0-9.6[2]	8.5-9.0[2]	8.5-9.0	8.5-9.0	8.5-9.0[3]
ความกระด้างทั้งหมด (CaCO₃)	มีค่าเข้าใกล้ศูนย์				-	-	-		
ซิลิกา (SiO₂)	ppm	≤0.5	≤0.007		≤0.007	≤0.007	≤0.007		
เหล็ก (Fe)	ppm	≤0.01[4]	≤0.01[4]		≤0.01[4]	≤0.01[4]	≤0.01[4]		
ทองแดง (Cu)	ppm	[5]	0.01		≤0.01	≤0.01	≤0.005		
ไฮดราซีน (N_2H_4)	ppm		≥0.01[6]		0.01[6]	≥0.01[6]	≥0.01[6]		
ซิลิกา (SiO₂)	ppm	-	≤0.1[7]	≤0.02[7]	≤0.04[7]	≤0.02[7]	≤0.01[7]	≤0.02[7]	≤0.02
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	ppm	≤70.0							
ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity)			≤20		≤0.1	≤1		-	
ความขุ่น	ppm	≤1[8]			-				
ฟอสเฟต (PO_4^{3-})	ppm	1-20[9]							

a. ในกรณีที่เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง (Feed Water Heater) เป็นโลหะผสม

b. ในกรณีที่เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน

c. ของแข็งที่ละลายน้ำได้ ≤ 3,500 ppm

d. ของแข็งที่ละลายน้ำได้ ≤ 1,500 ppm

e. ให้ใช้ผสมกับน้ำเลี้ยงที่ผ่านเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงก่อนเข้าหม้อไอน้ำ

f. ระดับที่ดี Steam Separator

g. ระดับที่ดี Steam Separator

h. เป็นค่าของหม้อไอน้ำแรงดันปานกลาง (Medium Pressure Boiler)

3.5.4 ตามมาตรฐานผู้ผลิตหม้อไอน้ำ Babcock & Wilcox ของอเมริกา

ความดันโดยประมาณที่ยอมให้ใช้งานได้ (psig) / รายการ		0-600	600-1,000	1,000-1,500	1,500-2,000	มากกว่า 2,000
pH ที่ 25° C		7.0-9.5	8.0-9.5	8.5-9.0	8.5-9.0	8.5-9.0
ความกระด้าง (Ca)	ppm.	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02
เหล็ก (Fe)	ppm.	0.1	0.05	0.03	0.02	ไม่เกิน 0.01
ทองแดง (Cu)	ppm.	0.5	0.25	ไม่เกิน 0.05	ไม่เกิน 0.025	ไม่เกิน 0.025
ออกซิเจนที่ละลายน้ำ	ppm.	0	0	0	0	0
ด่างทั้งหมด (CaCO3)	ppm.	0	0	0	0	0
ซิลิกา (SiO2)	ppm.			90-150	30-90	
สภาพนำไฟฟ้า	ppm.	0	0	0	0	0

* ใช้เรื่องคุณภาพน้ำป้อน (Feed Water) ที่มีโลหะผสมต่ำ

** ใช้เรื่องคุณภาพน้ำที่ต้องมีโลหะผสมต่ำ

ตารางที่ ๑.๓ มาตรฐานคุณภาพน้ำในหม้อไอน้ำของ British Standard สำหรับหม้อไอน้ำระบบผสมน้ำ

ความดันที่จ่ายออก	ปริมาณสิ่งเจือปนสูงสุดที่ยอมให้	๓๐	๔๐	๖๐	๘๒	๑๐๐	๑๒๐	๑๓๐-๑๗๐
โซเดียมฟอสเฟต	mg/l Na_3PO_4	๗๐-๑๐๐	๓๐-๔๐	๒๐-๓๐	๑๕-๒๐	๕-๑๐	๐-๕	๐
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	mg/l $Ca(OH)_2$ สูงสุด	๑๕๐	๑๐๐	๕๐	๓๐	๑๕	๗	๔
ซิลิกาในรูปซิลิเกต	mg/l SiO_2 สูงสุด	๖๐	๔๐	๓๐	๒๐	๑๐	๕	๒
ซิลิกา	mg/l SiO_2 สูงสุด	ปริมาณซิลิกาสูงสุดที่ยอมให้ขึ้นอยู่กับความดันในหม้อไอน้ำ ดูในตารางที่ ๑.๔		๒๐	๑๕	๑๐	๕	๑
โซเดียมซัลไฟต์	mg/l Na_2SO_3	๓๐-๔๐	๒๐-๓๐	๑๕-๒๐	๑๐-๑๕	๐-๑๐	๐	๐
ไฮดราซีน	mg/l N_2H_4	๐.๑-๑.๐	๐.๑-๐.๖	๐.๑-๐.๓	๐.๑-๐.๒	๐	๐	๐
ความกระด้างรวม	mg/l $CaCO_3$	๒๐๐	๑๐๐					
ค่าความเป็นด่าง	mg/l $CaCO_3$	๓๐๐-๖๐๐	๒๐๐-๔๐๐	๑๐๐-๒๐๐	๗๐-๑๕๐	๕๐-๑๐๐	๒๕-๕๐	๑๐-๒๐
ความเป็นกรด	mg/l $CaCO_3$					๐	๐	๐

* ค่าที่ยังไม่ได้กำหนดตามมาตรฐาน

ตารางที่ [illegible] มาตรฐานคุณภาพน้ำในหม้อไอน้ำตาม ASME

Drum Pressure (psig)	ซิลิกา (พีพีเอ็มในรูป SiO_2)	ความเป็นด่างทั้งหมด (พีพีเอ็มในรูป $CaCO_3$)	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ (ไมโครมอส ต่อ เซนติเมตร)
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

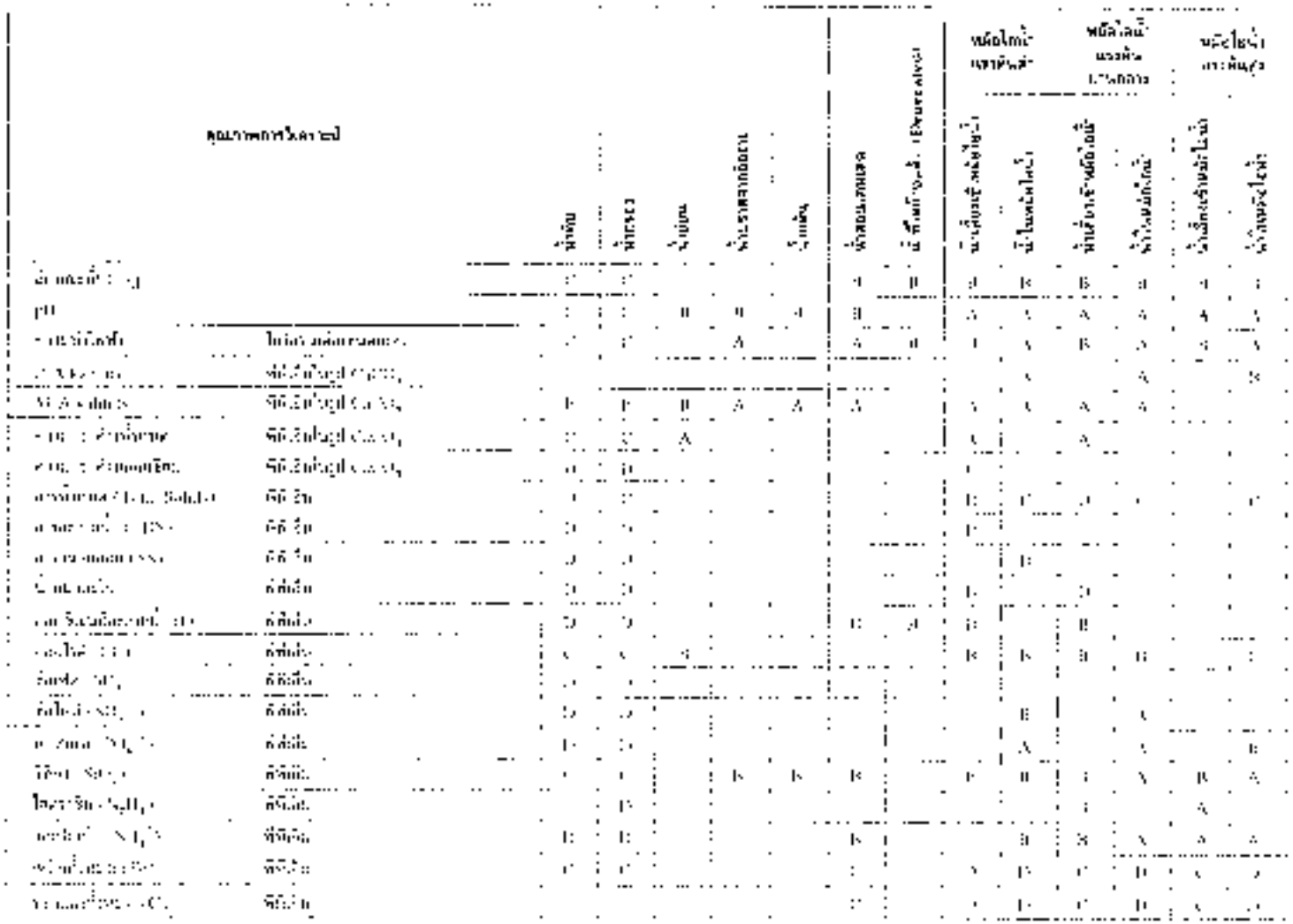
[illegible]

[illegible]

ตารางที่ [illegible] พิกัดปริมาณสารทั้งหมดและสารแขวนลอยในน้ำหม้อไอน้ำที่ความดันต่าง ๆ

ความดันใช้งาน psig	สารทั้งหมด (TDS) พีพีเอ็ม	สารแขวนลอย (SS) พีพีเอ็ม
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

ตารางที่ ๑.๑ ความที่ การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเพื่อการควบคุมระบบน้ำหมุนเวียน



ตารางที่ 3.19 ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำที่มีผลต่อปัญหาน้ำของหมู่บ้านในน้ำ

ประเภทของน้ำ	น้ำดิบ		น้ำอ็อบเปิลแร็พเลิ่งน้ำ		น้ำในระบบน้ำ						น้ำเสีย เทศบาลเมืองระยอง		ไอน้ำที่ผลิต (ตามมาตรฐาน)	
ชนิดการวิเคราะห์น้ำ / ชื่อห้องปฏิบัติการ	Evaporator ระยอง	การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน กรมโรงงาน	การวิเคราะห์ ไฟฟ้า น้ำเลี้ยง	ความกันไฟ หม้อน้ำเล็กๆ	ตะกรัน	ตะกรัน เลขิลิต์	ราง กัดกร่อน	Caustic- crack	หมาน เปราะ	การ กัดกร่อน	ความ แข็งกร้าว	การ กัดแข็งแรง	ความ แข็งกร้าว
[illegible]			○	○			○	○	○	○		○	○	
P. Autoclave			○	○			○	○	○					
M. Mat [illegible]	○	○	○	○	○		○	○	○					
การวิเคราะห์ [illegible]	○	○	○						○	○		○		
[illegible]	○	○	○	○	○	○								
[illegible]	○			○	○	○								
ออโต้	○	○	○											
จับตัว	○	○	○	○	○		○							
ซิลิกา							○					○	○	
Manual					○			○	○					
[illegible]	○	○	○		○	○	○	○	○				○	
[illegible]					○									
[illegible]			○			○	○							
[illegible]			○	○	○	○	○	○						
[illegible]			○			○	○							
ไฮโดรเมตอล์							○							
Sum	○	○			○					○				
Tuyau			○				○			○				
[illegible]							○			○				
[illegible]	○		○	○			○							
[illegible]	○		○	○			○							

บรรณานุกรม

1. กรกฎ ตั้งพิทยา. **เคมีของน้ำ น้ำใสโครงแอดการวิเคราะห์.** [illegible] ภาควิชาเคมี, 2522.
2. เกียรติ กลิ่นดี. "Sample Collection and Treatment and Quality Control in Water Analysis." **เอกสารประกอบการฝึกอบรมนักธรณีวิทยา นักเคมี และวิศวกรด้านวิเคราะห์น้ำ กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี,** 2521.
3. [illegible]. "[illegible]" **ข่าวสารการธรณี** [illegible]
4. APHA, WWA and WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water.** 13th ed. New York : American Public Health Association, 1971.
5. ASTM. **Annual Book of ASTM Standard Part 31-Water.** American Society for Testing and Materials, 1976.
6. ASTM. **Manual on Water.** 3rd ed. : ASTM Special Technical Publication No 442, 1969.
7. British Standard 2690. **Methods of Testing Water Used in Industry Part 1 1.** British Standards Institution.
8. Brownlow, A.H. **Geochemistry.** New Jersey : Prentice Hall, 1979.
9. BS 2127 : 1962 **Routine Control Methods of Testing Water Used in Industry.** British Standards Institution.
10. Conroy, J.R. and Meserve, R.L. **Water and Its Impurities.** Pennsylvania : Dowden, Hutchison & Ross, 1974.
11. Davis, S.N. and DeWiest, R.J.M. **Hydrology.** New York : John Wiley & Sons, 1966.
12. Degremont. **Water Treatment Handbook.** Paris : Degremont S.A., 1968.
13. Evans, U.W. **Natural Waters in Corrosion Vol. 1-Corrosion Control.** London : Shrier, L.L., Newnes Butterworths, 1977.
14. Golterman, H.L. **Methods for Chemical Analysis of Fresh Waters.** Oxford : Blackwell Scientific Publications, 1969.
15. Hamilton, G.E. **Manual on Water : ASTM Special Technical Publication 442 A.** American Society for Testing and Material.
16. Hammer, M.J. **Water and Waste Water Technology.** New York : John Wiley & Sons, 1975.
17. Hill, R.W. "Water in Pharmaceuticals and Cosmetics Industries." **Effluent and Water Treatment Journal** (November, 1981).

18. Holder, W.S. **Water Treatment and Examination**. London : J. & A. Churchill, 1970.

19. Kirk Othmer. **Encyclopedia of Chemical Technology**. Vol. 1. Water Analysis. John Wiley & Sons, 1949.

20. Krauskopf, K.B. **Introduction to Geochemistry**. New York : McGraw-Hill Book Co., 1967.

21. Lindsay, W. **Chemical Equilibria in Soils**. New York : John Wiley & Sons, 1979.

22. McCoy, J.W. **Chemical Analysis of Industrial Water**. New York : Chemical Publishing Co., 1969.

23. Reuter, J. **Analysis of Water**. New York : John Wiley & Sons, 1978.

24. Sawyer, C.N. and McCarty, P.L. **Chemistry for Sanitary Engineers**. New York : McGraw-Hill Book Co., 1967.

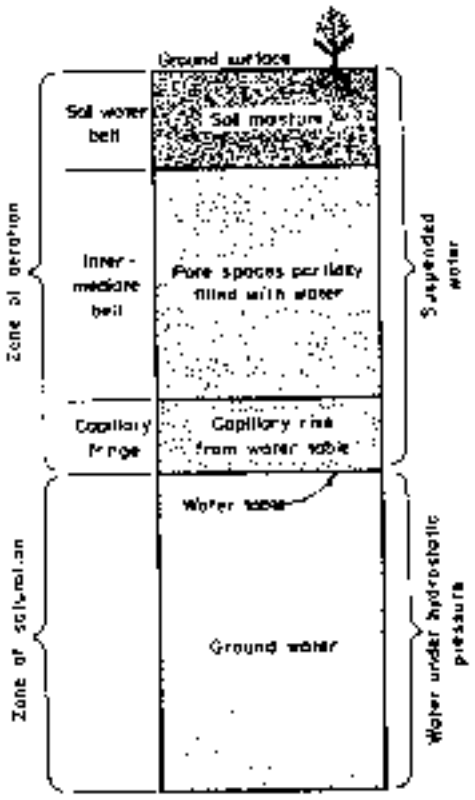
25. Spiegler, K.S. **Principles of Desalination**. New York : Academic Press, 1966.

26. Todd, D.K. **Ground Water Hydrology**. New York : John Wiley & Sons, 1967.

27. Vernon, L.S. and Jenkins, D. **Water Chemistry**. New York : John Wiley & Sons, 1969.

2 แหล่งน้ำในประเทศไทย

แหล่งน้ำในประเทศไทยเกิดจากวัฏจักรของน้ำ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น น้ำจากแหล่งต่าง ๆ จะระเหยกลายเป็นไอน้ำขึ้นไปในบรรยากาศ ไอน้ำเหล่านี้จะรวมตัวกันเป็นเมฆ แล้วตกลงมาเป็นน้ำฝนบนพื้นโลก น้ำฝนที่ตกลงมาบางส่วนจะไหลลงสู่ทะเล น้ำส่วนหนึ่งจะซึมลงสู่ใต้ดินกลายเป็นน้ำใต้ดิน



Ground water is the part of subsurface water within the zone of saturation.

รูปที่ ๑ โซนอิ่มตัวและโซนอิ่มตัวด้วยน้ำของแหล่งน้ำใต้ดิน

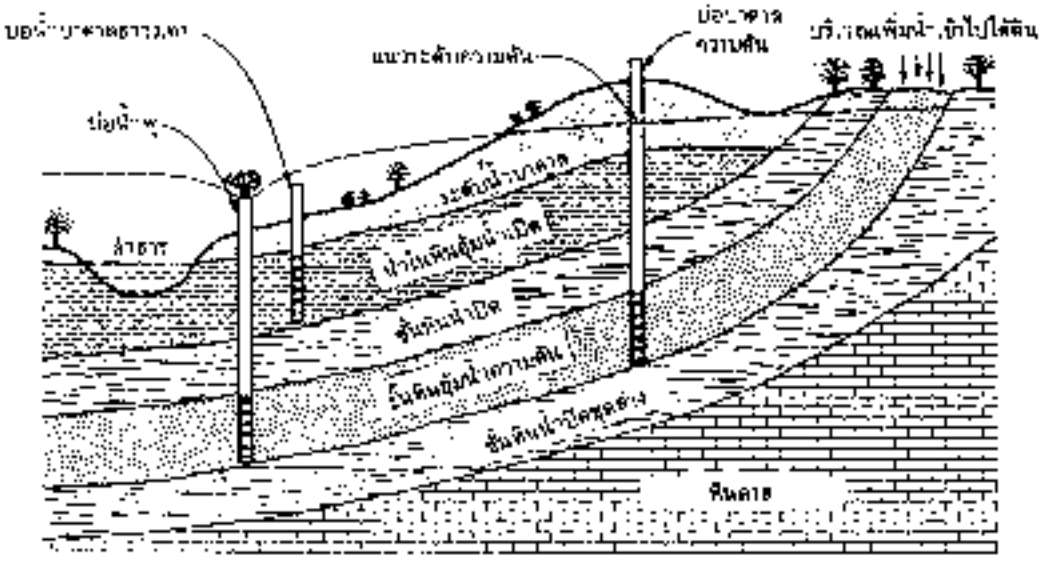
แหล่งน้ำใต้ดินประเภทใดที่ให้ปริมาณน้ำได้มากที่สุด จงอธิบาย

1. **แหล่งน้ำผิวดิน** ได้แก่ น้ำที่ถูกเก็บกักไว้ในแหล่งน้ำต่างๆ ในผิวโลก เช่น ทะเล มหาสมุทร แม่น้ำ ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ

2. **แหล่งน้ำใต้ดิน** ได้แก่ น้ำที่เกิดจากน้ำฝนที่ซึมลงสู่ผิวดินและไหลผ่านช่องว่างในชั้นหินต่างๆ ใต้ผิวดินลงไปสู่ชั้นหินที่มีน้ำขังอยู่ ในดินจะมีน้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ในหินจะมีน้ำอยู่ในรอยแตกหรือช่องว่างของหิน

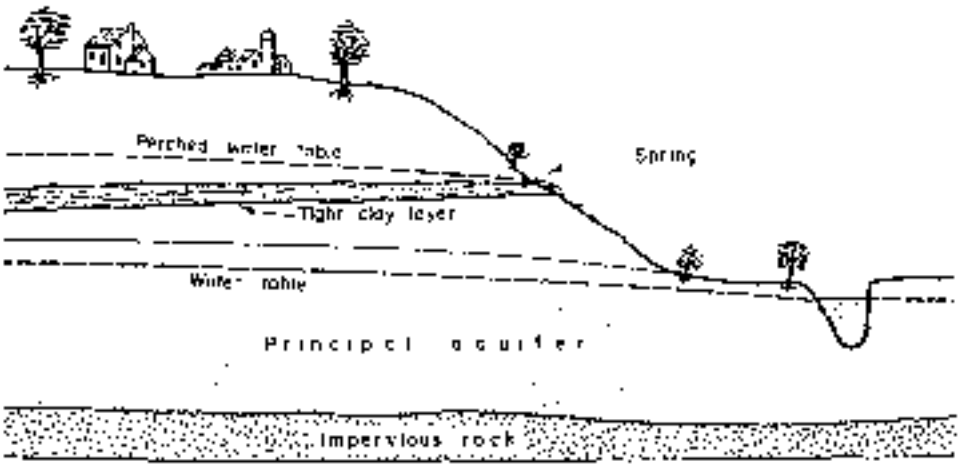
แหล่งน้ำใต้ดินแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

(1) น้ำบาดาล คือ น้ำที่อยู่ในระดับชั้นหินอุ้มน้ำที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นระดับที่น้ำในหินอุ้มน้ำมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ในบริเวณที่ชั้นหินอุ้มน้ำนั้นถูกกักขังด้วยชั้นหินที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่าน น้ำบาดาลในบริเวณนี้จะมีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้เมื่อเจาะบ่อน้ำบาดาลขึ้นมาถึงชั้นหินอุ้มน้ำนี้ น้ำบาดาลจะพุ่งขึ้นมาจากบ่อน้ำบาดาลได้เอง เรียกว่า บ่อน้ำบาดาลพุ่ง (Artesian Well) ส่วนชั้นหินที่ไม่มีน้ำบาดาลขังอยู่ เรียกว่า ชั้นหินไม่อุ้มน้ำ ส่วนชั้นหินที่มีน้ำบาดาลขังอยู่ เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำ ชั้นหินอุ้มน้ำที่มีน้ำบาดาลขังอยู่เต็มช่องว่างทั้งหมด เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำแบบมีแรงดัน ชั้นหินอุ้มน้ำที่มีน้ำบาดาลขังอยู่ไม่เต็มช่องว่างทั้งหมด เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำแบบไม่มีแรงดัน ระดับน้ำบาดาลที่ขังอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำแบบไม่มีแรงดัน เรียกว่า ระดับน้ำบาดาล (Water Table) ส่วนระดับน้ำบาดาลที่ขังอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำแบบมีแรงดัน เรียกว่า ระดับน้ำบาดาลพุ่ง (Piezometric Surface)



รูปที่ 2.2 ชนิดของชั้นหินเก็บกักน้ำและบ่อบาดาล

(2) น้ำบาดาลชั้นตื้น (Perched Aquifer) คือ ชั้นน้ำที่เกิดขึ้นเหนือชั้นหินอุ้มน้ำแบบไม่มีแรงดัน ซึ่งอยู่สูงกว่าระดับน้ำบาดาลในบริเวณนั้น ทำให้เกิดชั้นน้ำขังอยู่ในชั้นหินที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านลงไปได้ง่าย เช่น ชั้นดินเหนียวที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านลงไปได้ง่าย น้ำในชั้นนี้จึงขังอยู่ในชั้นดินเหนียวนั้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับน้ำในกระทะที่ขังอยู่ในกระทะใบบัว ดังนั้น น้ำบาดาลชั้นตื้นจึงมีปริมาณน้อย ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากนัก



Perched water table occurs above impervious stratum and above the main water table.

รูปที่ 2.3 ชั้นน้ำบาดาลปิดล้อมและระดับน้ำบาดาลใหม่

2.1 การจำแนกคุณภาพน้ำ

คุณภาพของแหล่งน้ำต่าง ๆ ของจำแนกตามคุณสมบัติของน้ำที่ปรากฏให้เห็นดังนี้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกคุณภาพน้ำ

	คุณสมบัติ	
[illegible]	[illegible]	ลักษณะน้ำ
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	มีความเป็นกรด
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	มีปริมาณคลอไรด์
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	มีปริมาณฟอสเฟต
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

ตารางที่ 2.1 [illegible]

[illegible]	ความขุ่น
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]

ตารางที่ 2.2 สารละลายน้ำที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ

ธาตุ	สารที่พบจากสารละลายน้ำ	ปริมาณที่สูงสุด, mg/l
ซิลิกอน	H_4SiO_4	[illegible] (SiO_2)
อะลูมิเนียม	Al^{3+}, $Al(OH)_4^-$	[illegible] (Al)
เหล็ก	Fe^{2+}, Fe^{3+} ที่ละลายในรูปของเหล็กคีเลต และ $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$	[illegible]
แคลเซียม	Ca^{2+}, $CaSO_4$	[illegible] (Ca^{2+})
แมกนีเซียม	Mg^{2+}, $MgSO_4$	[illegible] (Mg^{2+})
โซเดียม	Na^+	[illegible]
โพแทสเซียม	K^+	[illegible]
คาร์บอเนต	HCO_3^-, CO_3^{2-}	[illegible] ($CaCO_3$)
คาร์บอน	H_2CO_3, HCO_3^-, CO_3^{2-}	[illegible]
ซัลเฟอร์	SO_4^{2-}, H_2S, HS^-	[illegible] (SO_4^{2-})
คลอไรด์	Cl^-	[illegible]
ฟลูออไรด์	F^-	[illegible]
ไนโตรเจน	NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+	[illegible] (NO_3^-)
สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ	macromolecules	[illegible]
ออกซิเจน	O_2	[illegible]

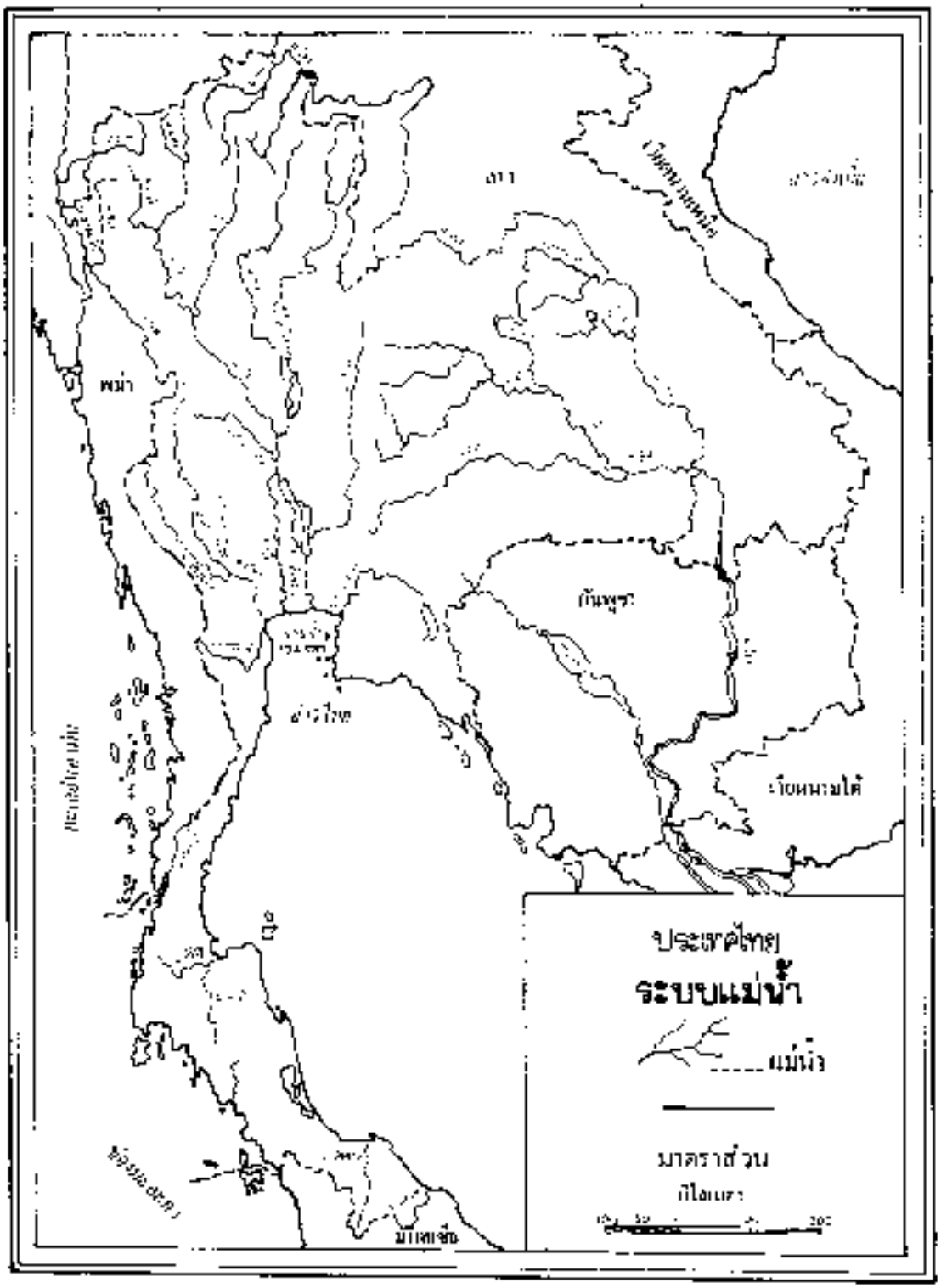
2.2 คุณลักษณะของน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

2.2.1 แหล่งน้ำและที่มาของน้ำ

น้ำในแหล่งน้ำ ที่เกิดจากการขังของน้ำฝนหรือน้ำท่าในบริเวณที่ราบต่ำ ซึ่งมีการระบายน้ำตามธรรมชาติไม่ดี ทำให้น้ำไม่ไหลออกไปไหน จึงเก็บกักน้ำไว้ในปริมาณที่มากพอ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าน้ำในแหล่งน้ำต่างๆ ย่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิด ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ดังสมการต่อไปนี้

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$

ความเป็นกรดของน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำมีค่า pH = 5.0 และจะมีค่าสูงขึ้น ถ้ามี HCO_3^- ไอออนอยู่ด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วน้ำผิวดินจะมีค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วง 7.0 – 8.5 นอกจากนี้ในน้ำยังมีสารประกอบต่างๆ ที่ทำให้น้ำมีคุณสมบัติเป็นกรดหรือด่างได้ เช่น K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} ที่ทำให้น้ำมีสมบัติเป็นด่าง หากมีอนุภาคที่อยู่ในน้ำประเภทคอลลอยด์ (Colloid) ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เช่น ดินเหนียว ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ก็จะทำให้น้ำมีสมบัติเป็นด่างได้ ในทางตรงกันข้าม หากมีอนุภาคของแข็งที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ก็จะทำให้น้ำมีสมบัติเป็นกรดได้ นอกจากนี้ในน้ำยังมีสารประกอบต่างๆ ที่ทำให้น้ำมีสมบัติเป็นกรดหรือด่างได้ ซึ่งสารประกอบที่สำคัญๆ ได้แก่ HCO_3^-, Ca^{2+}, SO_4^{2-}, SO_3^{2-}, Cl^-, Na^+, Mg^{2+} และ K^+ เป็นต้น ในน้ำธรรมชาติจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นตลอดเวลา ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของสารประกอบต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น H_2SO_4 และ HCO_3^- เป็นต้น ดังนั้นในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำอยู่เสมอ ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงการวัดค่า pH ของน้ำไปแล้ว ในหัวข้อ 1.2.2 ดังนั้นในบทนี้จึงจะไม่กล่าวถึงการวัดค่า pH ของน้ำอีก



รูปที่ 2.3 แม่น้ำสำคัญในประเทศไทย

ตารางที่ 2.3 คุณภาพน้ำในแม่น้ำและแหล่งน้ำสำคัญในภาคต่าง ๆ

แหล่งน้ำ	pH	ความสกปรกทางชีวเคมี BOD_5, 20°C mg/l	ความเป็นด่างในรูป $CaCO_3$ mg/l	ความกระด้างในรูป $CaCO_3$ mg/l	สารที่ละลายน้ำ mg/l	ความขุ่นในหน่วย mg/l	ความนำไฟฟ้าไมโครโมห์ต่อเซนติเมตร
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

ตารางที่ ๓.๑ คุณภาพน้ำแม่น้ำแม่กลองตอนล่าง ช่วงปทุมธานี

	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
อุณหภูมิ (°C)	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ความเค็ม (ppt)	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ออกซิเจนละลาย (mg/L)	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ความขุ่น (NTU)	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ไนโตรเจน (mg/L N)	[illegible]	[illegible]	[illegible]
ฟอสฟอรัสอินทรีย์ (mg/L P)	[illegible]	[illegible]	[illegible]

คุณภาพน้ำแม่น้ำแม่กลอง อ.เมือง ปทุมธานี ในรอบเดือนกันยายน ๒๕๕๓

อุณหภูมิ	[illegible]	°C
pH	[illegible]	
ความขุ่นในน้ำ	[illegible]	NTU
สารแขวนลอย (TSS)	[illegible]	mg/L
ความเค็ม (ppt)	[illegible]	ppt
ความกระด้างทั้งหมด (as $CaCO_3$)	[illegible]	mg/L
ความกระด้างถาวร	[illegible]	mg/L
ความกระด้างชั่วคราว	[illegible]	mg/L
ซัลเฟต (as Na_2SO_4)	[illegible]	mg/L
ไนโตรเจนทั้งหมด (as N)	[illegible]	mg/L
ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย (as N)	[illegible]	mg/L
ไนเตรต (as N)	[illegible]	mg/L
ไนไตรต์ (as N)	[illegible]	mg/L
ซิลิเกต	[illegible]	mg/L
ซิลิกา	[illegible]	mg/L
ฟอสเฟต	[illegible]	mg/L
ฟอสฟอรัส	[illegible]	mg/L
Total Organic Nitrogen	[illegible]	mg/L
ปริมาณแบคทีเรีย	[illegible]	colony/cm
ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด (MPN/100 cm)	[illegible]	mpn

๒.๓ คุณลักษณะของน้ำในแหล่งน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินที่เก็บกักอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำ ส่วนใหญ่ได้มาจากน้ำฝนที่ซึมลงสู่ดิน และไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนหรือรอยแตกของหิน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานานมาก ๆ ดังนั้นน้ำใต้ดินจึงมีคุณสมบัติแตกต่างจากน้ำผิวดินในหลายประการ เช่น ไม่ได้รับการถ่ายเทกับน้ำในแหล่งน้ำอื่น ๆ คุณภาพของน้ำใต้

[illegible]

ตารางที่ [illegible] ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติน้ำใต้ดินที่มีผลต่อคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำ

หน่วยแร่ที่พบ	คุณสมบัติของแร่ธาตุ
[illegible]	[illegible] pH [illegible]
[illegible]	[illegible] pH [illegible]
[illegible]	[illegible] pH [illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible] pH [illegible]
[illegible]	[illegible] pH [illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

$$FeS_2 + H_2O + 7O_2 \rightarrow FeSO_4 + H_2SO_4$$
$$H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + 2H^+ + SO_4^{2-}$$

เหล็กที่ละลายน้ำได้ในรูปของเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ไม่ค่อยเป็นปัญหาเท่าใดนัก เพราะสามารถเปลี่ยนไปเป็นเฟอริกไฮดรอกไซด์ได้ดังสมการ

$$FeSO_4 \rightarrow Fe^{2+} + SO_4^{2-}$$
$$Fe^{2+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$$

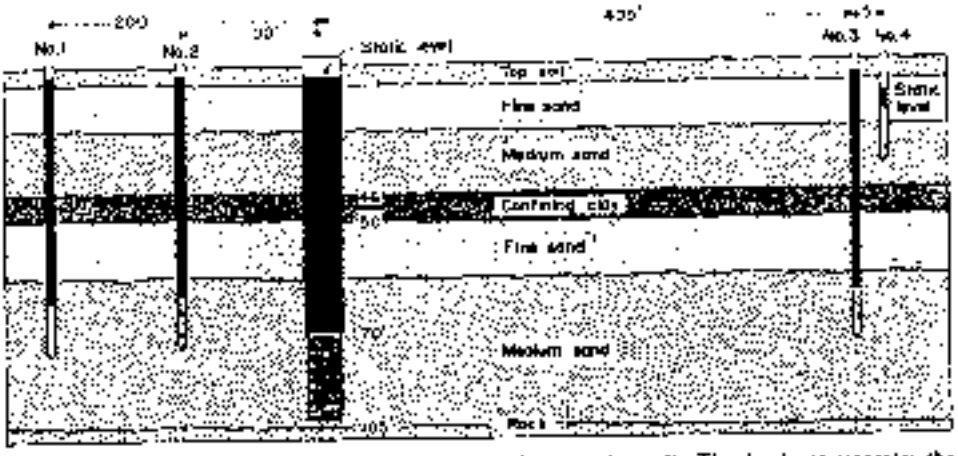
ตะกอนนี้จะมีสีน้ำตาลแดง ในการทำเหมืองแร่ที่มีแหล่งน้ำและผู้ใช้น้ำอยู่ใกล้เคียง เช่น ที่ลำน้ำ ต้องมีการควบคุมน้ำที่ระบายออกจากเหมืองให้มีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วงที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปมักกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 6 ถึง 9 ค่าพีเอช (pH) ขึ้นไป ส่วนน้ำที่ระบายออกจากบ่อเหมืองจะมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6 ลงมา

2.4 บ่อน้ำบาดาล

บ่อน้ำบาดาล หรือบ่อน้ำ หรือบ่อเจาะ หรือบ่อเจาะน้ำบาดาล หรือบ่อน้ำตื้น (Shallow Well) หรือบ่อน้ำลึก (Deep Well) ก็ตาม มีประเภทต่างๆ ดังนี้

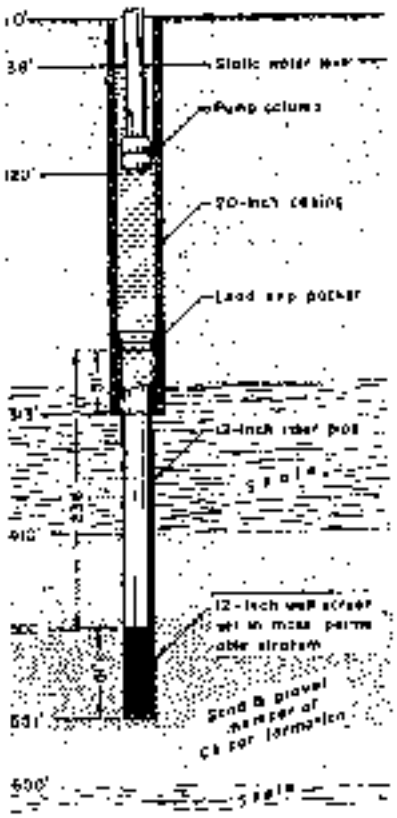
1. บ่อน้ำบาดาลแบบธรรมดา หมายถึง บ่อน้ำที่ไม่มีการดัดแปลงใดๆ
2. บ่อน้ำบาดาลแบบดัด หมายถึง บ่อน้ำที่มีการดัดแปลงใดๆ ดังนี้
   (1) บ่อน้ำบาดาลที่มีการดัดแปลงเพื่อให้น้ำจากแหล่งน้ำบาดาลไหลเข้าสู่บ่อได้ง่ายขึ้น
   (2) บ่อน้ำบาดาลที่มีการดัดแปลงเพื่อป้องกันมิให้น้ำจากแหล่งน้ำอื่นไหลเข้าสู่บ่อ นอกเหนือจากแหล่งน้ำบาดาลที่ต้องการ (Aquifer) ที่ต้องการสูบขึ้นมาใช้

ปัญหาการขึ้นลงของระดับน้ำบาดาลและการแห้งของบ่อน้ำบาดาล ปัญหาที่เกิดขึ้นกับบ่อน้ำบาดาลที่สำคัญ คือ ปัญหาการขึ้นลงของระดับน้ำบาดาล ซึ่งเป็นปัญหาที่ทำให้ปริมาณน้ำที่สูบขึ้นมาใช้ได้ในแต่ละวันไม่แน่นอน ปัญหาการขึ้นลงของระดับน้ำบาดาลนี้ เกิดจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณที่มากเกินกว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่บ่อ ทำให้ระดับน้ำในบ่อลดต่ำลงมาก ปัญหาการขึ้นลงของระดับน้ำบาดาลนี้ เกิดขึ้นได้ทั้งในบ่อน้ำตื้นและบ่อน้ำลึก ปัญหาการแห้งของบ่อน้ำบาดาล (Cone of Depression) จะเกิดขึ้นเมื่อการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณที่มากเกินกว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่บ่อ ทำให้ระดับน้ำในบ่อลดต่ำลงมาก ปัญหาการแห้งของบ่อน้ำบาดาลนี้ เกิดขึ้นได้ทั้งในบ่อน้ำตื้นและบ่อน้ำลึก

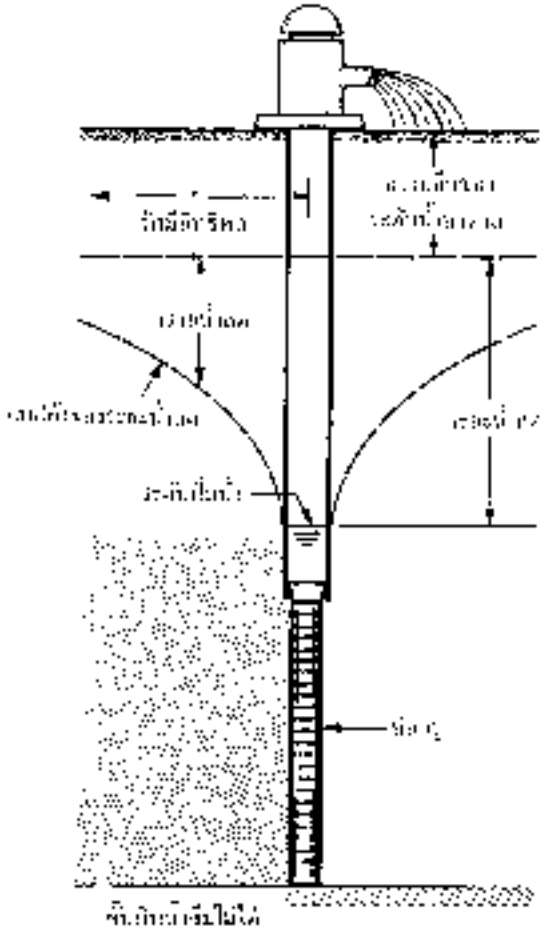


Geologic section on a line through test well and observation wells. The clay layer separates the upper water-table aquifer from the artesian aquifer. Artesian head in the lower aquifer makes water levels in the deeper wells stand about 3 feet above the upper water table.

รูปที่ 2.5 การเจาะน้ำบาดาลลงไปในชั้นหิน ก ระดับความลึกของชั้นดินและชั้นหินแต่ละชั้น



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการออกแบบน้ำบาดาลที่ลึกลงไป 1,200 ฟุตและให้ผลผลิตสูง



รูปที่ 2.7 ลักษณะการไหลของน้ำบาดาลในบ่อน้ำบาดาลที่สูบน้ำออกจากชั้นน้ำ

2.5 แหล่งน้ำบาดาลในประเทศไทย

แหล่งน้ำบาดาลในประเทศไทยมีปริมาณมากพอ ผู้ที่รู้ว่าที่ใดมีน้ำบาดาลมากน้อย ความลึกของชั้นน้ำบาดาลอยู่ลึกตื้นเพียงใด ก็จะสามารถขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลได้ตามความต้องการ ในการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลนั้น ต้องมีความรู้ความเข้าใจในลักษณะของแหล่งน้ำบาดาลในประเทศไทยเสียก่อน เพื่อจะได้ทราบถึงลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลได้ถูกต้อง แหล่งน้ำบาดาลในประเทศไทยแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. **น้ำบาดาลในหินรวน** หินรวนในที่นี้หมายถึง หินที่มีรูพรุนระหว่างเนื้อหินหรือช่องว่างที่เกิดจากการละลายของหินที่ละลายน้ำได้ง่าย หินที่จะกล่าวถึงนี้คือหินปูนและหินดินดานบางชนิด แหล่งน้ำบาดาลในหินรวนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แหล่งน้ำบาดาลในหินปูนและแหล่งน้ำบาดาลในหินดินดาน ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

1.1 **น้ำบาดาลในหินปูน** หินปูนเป็นหินที่เกิดจากการตกตะกอนของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ในทะเลตื้นหรือทะเลลึก ในบางแห่งหินปูนเกิดจากการตกตะกอนของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตในทะเลสาบน้ำจืด หินปูนที่เกิดขึ้นในแต่ละแห่งจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในขณะที่เกิดการตกตะกอน หินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลตื้นมักจะมีลักษณะเป็นชั้นหนา เนื้อหินมีความแข็งแกร่งมาก ส่วนหินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลลึกมักจะมีลักษณะเป็นชั้นบาง เนื้อหินมีความแข็งแกร่งน้อยกว่าหินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลตื้น หินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลสาบน้ำจืดมักจะมีลักษณะเป็นชั้นหนา เนื้อหินมีความแข็งแกร่งมาก ส่วนหินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลลึกมักจะมีลักษณะเป็นชั้นบาง เนื้อหินมีความแข็งแกร่งน้อยกว่าหินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลตื้น หินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลสาบน้ำจืดมักจะมีลักษณะเป็นชั้นหนา เนื้อหินมีความแข็งแกร่งมาก ส่วนหินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลลึกมักจะมีลักษณะเป็นชั้นบาง เนื้อหินมีความแข็งแกร่งน้อยกว่าหินปูนที่เกิดขึ้นในทะเลตื้น

1.2 **น้ำบาดาลในหินดินดาน** หินดินดานเป็นหินที่เกิดจากการทับถมของตะกอนดินเหนียว หินปูน หรือหินภูเขาไฟ ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในขณะที่เกิดการตกตะกอน หินดินดานที่เกิดขึ้นในทะเลตื้นมักจะมีลักษณะเป็นชั้นหนา เนื้อหินมีความแข็งแกร่งมาก ส่วนหินดินดานที่เกิดขึ้นในทะเลลึกมักจะมีลักษณะเป็นชั้นบาง เนื้อหินมีความแข็งแกร่งน้อยกว่าหินดินดานที่เกิดขึ้นในทะเลตื้น

๒.๕.๑ ชั้นน้ำบาดาลบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง

น้ำบาดาลบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแอ่งเจ้าพระยาตอนล่างนี้ มีลักษณะเป็นแอ่งตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งทางเหนือจะเป็นส่วนต่อจากที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ทั้งด้านตะวันออก ด้านเหนือ และด้านตะวันตก มีลักษณะเป็นภูเขา ชั้นดินตะกอนที่อยู่ใต้ดินเป็นชั้นสลับกันอยู่ในชั้นกรวดทราย ชั้นน้ำบาดาลนี้ หมายถึงชั้นกรวดและทรายซึ่งแต่ละชั้นมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำแตกต่างกัน และมีคุณสมบัติอื่นๆ ทางธรณีวิทยาและธรณีฟิสิกส์เหมือนกัน ถือว่าเป็นชั้นน้ำบาดาล (Aquifer) ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯ เพราะว่าชั้นกรวดทรายแต่ละชั้นมีชั้นดินเหนียวคั่นอยู่ ซึ่งชั้นดินเหนียวที่คั่นอยู่ระหว่างชั้นกรวดทรายนั้นมีลักษณะเป็นชั้นปิดกั้นไม่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ ชั้นน้ำบาดาลแต่ละชั้นจะมีแรงดันที่เรียกว่า Artesian Pressure

จากการศึกษาของกรมทรัพยากรธรณี พบว่าชั้นน้ำใต้ดินบริเวณกรุงเทพมหานคร และจังหวัดใกล้เคียง ระยะตั้งแต่ผิวดินลงไปลึก ๖๐๐ เมตร จะมีชั้นน้ำบาดาล ๘ ชั้น ดังนี้

1. **ชั้นน้ำกรุงเทพ (โซน ๕๐ เมตร)** แบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ตอน คือชั้นน้ำกรุงเทพตอนบน และชั้นน้ำกรุงเทพตอนล่าง ชั้นน้ำกรุงเทพ เป็นชั้นน้ำที่ตื้นที่สุด อยู่ถัดจากชั้นดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok Clay) ลงไป ระดับบนสุดอยู่ลึก ๑๘-๓๐ เมตร ชั้นน้ำกรุงเทพ จัดเป็นชั้นน้ำบาดาลชั้นบนสุดของกรุงเทพฯ ชั้นน้ำมีความหนา ๒๐-๖๐ เมตร ความหนาสูงสุดของชั้นน้ำมีความหนาเฉลี่ย ๖ เมตร มีค่าเฉลี่ยปริมาณและคุณภาพน้ำค่อนข้างเค็ม มีชั้นดินเหนียวสีเทาสลับชั้นกรวดทรายหรือชั้นทรายสีน้ำตาลปนเทา น้ำบาดาลจากชั้นน้ำกรุงเทพ มีปริมาณน้ำมากแต่มีรสเค็มไม่สามารถใช้อุปโภคหรือใช้งานอุตสาหกรรมได้ แต่ในบางบริเวณทางเหนือ และทางตะวันออกเฉียงใต้ จะมีชั้นน้ำแทรกอยู่ในชั้นน้ำเค็มที่ระดับลึกประมาณ ๓๐-๖๐ เมตร

2. **ชั้นน้ำพระประแดง (โซน ๑๐๐ เมตร)** เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นน้ำกรุงเทพ มีชั้นดินเหนียวเป็นชั้นแบ่งชั้นน้ำ หนา ๑๒ เมตรคั่นอยู่ ชั้นน้ำพระประแดงอยู่ลึก ๖๐-๘๐ เมตรจากผิวดิน แต่บริเวณทางเหนือ นนทบุรีถึงปทุมธานี ลึกประมาณ ๑๐๐-๑๒๐ เมตร ชั้นน้ำเป็นชั้นกรวดทรายผสมทรายสีขาว ชั้นน้ำหนา ๒๕-๕๐ เมตร ตามลักษณะของชั้นน้ำ ชั้นน้ำพระประแดงเป็นชั้นน้ำที่มีปัญหา แต่เป็นน้ำกร่อยหรือค่อนข้างเค็มเป็นส่วนมาก จึงไม่มีการเจาะบ่อบาดาลนำไปใช้ มีข้อยกเว้นในบริเวณพระนคร-นนทบุรีตอนใต้ ซึ่งแต่บริเวณด้านตะวันออกของพระประแดง-พระโขนง บางนา-บางปู และถนนพระราม ที่ความลึกเฉลี่ย ๘๐-๑๐๐ เมตร จะมีชั้นน้ำจืดแทรกอยู่ในชั้นนี้ด้วย โดยมีชั้นดินเหนียวรองรับคั่นอยู่ระหว่างชั้นน้ำเค็มกับน้ำจืดที่เป็นชั้นน้ำจืดระดับเดียวกันที่ให้น้ำสำหรับการอุปโภคบริโภคในเขตพระประแดง ใต้ชั้นน้ำพระประแดงเป็นชั้นดินเหนียวเนื้อแน่นหนาประมาณ ๕-๑๐ เมตร

3. **ชั้นน้ำนครหลวง (โซน ๑๕๐ เมตร)** ใต้ชั้นดินเหนียวเนื้อแน่นที่คั่นชั้นน้ำพระประแดงไว้จะเป็นชั้นกรวดทราย ชั้นน้ำนครหลวงอยู่ลึกจากผิวดิน ๑๐๐-๑๒๐ เมตร แต่บริเวณด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ จะลึกแค่ ๘๐ เมตร ชั้นน้ำหนา ๒๐-๕๐ เมตร บ่อน้ำบาดาลส่วนใหญ่ในกรุงเทพฯ ใช้น้ำจากชั้นน้ำนี้ ของการประปานครหลวงหรือของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานน้ำอัดลม โรงงานผลิตเบียร์ จะใช้น้ำจากชั้นน้ำนี้ เนื่องจากชั้นน้ำนี้มีการสูบน้ำมาใช้เป็นจำนวนมาก ระดับน้ำจึงลดลงไปมาก น้ำเค็มจากทะเลไหลซึมมาแทนที่

ประกอบด้วยตะกอนเม็ดหยาบ ตะกอนทราย ตะกอนดินเหนียว และตะกอนดินเหนียวปนทราย ซึ่งมีน้ำใต้ดินกักเก็บอยู่ในชั้นตะกอนกรวด ตะกอนทราย และตะกอนดินเหนียวปนทราย

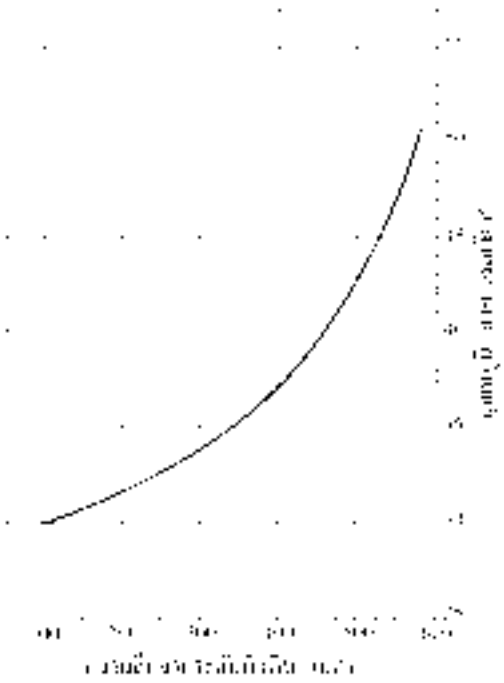
4. **ชั้นน้ำนนทบุรี (โซน 200 เมตร)** อยู่ลึกจากผิวดิน ประมาณ 200-300 เมตร ความหนาของชั้นตะกอนกรวด ประมาณ 150-200 เมตร ชั้นน้ำหนา 50-100 เมตร ชั้นน้ำนนทบุรีมีศักยภาพในการให้น้ำและคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี ปริมาณน้ำบาดาลประมาณ 5 ลบ.ม./ชม. เป็นการกักเก็บน้ำแบบกึ่งจำกัด ความดันน้ำสูงกว่าชั้นน้ำบางกอก ชั้นน้ำนนทบุรีมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ จังหวัดนนทบุรี ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำนนทบุรีถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอบางกรวด อำเภอเมืองนนทบุรี และอำเภอบางใหญ่ ชั้นน้ำนนทบุรีมีความลึกประมาณ 200-300 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 100 เมตร ชั้นน้ำนนทบุรีมีศักยภาพในการให้น้ำและคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี ปริมาณน้ำบาดาลประมาณ 5 ลบ.ม./ชม. เป็นการกักเก็บน้ำแบบกึ่งจำกัด ความดันน้ำสูงกว่าชั้นน้ำบางกอก ชั้นน้ำนนทบุรีมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ จังหวัดนนทบุรี ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำนนทบุรีถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอบางกรวด อำเภอเมืองนนทบุรี และอำเภอบางใหญ่ ชั้นน้ำนนทบุรีมีความลึกประมาณ 200-300 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 100 เมตร

5. **ชั้นน้ำสามโคก (โซน 300 เมตร)** อยู่ลึกจากผิวดิน ประมาณ 250-350 เมตร ชั้นน้ำหนา 40-80 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยตะกอนกรวด ตะกอนทราย คั่นด้วยชั้นดินเหนียวปนทรายหรือดินเหนียวหนาๆ จึงมีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นน้ำนี้ลดลง และมีโอกาสพบน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มได้ เพราะชั้นดินเหนียวปนทรายที่คั่นอยู่ระหว่างชั้นน้ำจืดกับชั้นน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มมีความหนาไม่มาก ทำให้น้ำจืดและน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มสามารถไหลผ่านกันได้ ประมาณ 5 ลบ.ม./ชม. ความดันน้ำสูงกว่าชั้นน้ำนนทบุรี ชั้นน้ำสามโคกมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ จังหวัดปทุมธานี ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำสามโคกถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอสามโคก อำเภอเมืองปทุมธานี และอำเภอลาดหลุมแก้ว ชั้นน้ำสามโคกมีความลึกประมาณ 250-350 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 40-80 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยตะกอนกรวด ตะกอนทราย คั่นด้วยชั้นดินเหนียวปนทรายหรือดินเหนียวหนาๆ จึงมีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นน้ำนี้ลดลง และมีโอกาสพบน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มได้ เพราะชั้นดินเหนียวปนทรายที่คั่นอยู่ระหว่างชั้นน้ำจืดกับชั้นน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มมีความหนาไม่มาก ทำให้น้ำจืดและน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มสามารถไหลผ่านกันได้ ประมาณ 5 ลบ.ม./ชม. ความดันน้ำสูงกว่าชั้นน้ำนนทบุรี ชั้นน้ำสามโคกมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ จังหวัดปทุมธานี ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำสามโคกถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอสามโคก อำเภอเมืองปทุมธานี และอำเภอลาดหลุมแก้ว ชั้นน้ำสามโคกมีความลึกประมาณ 250-350 เมตร ความหนาของชั้นน้ำประมาณ 40-80 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยตะกอนกรวด ตะกอนทราย คั่นด้วยชั้นดินเหนียวปนทรายหรือดินเหนียวหนาๆ จึงมีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นน้ำนี้ลดลง และมีโอกาสพบน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มได้ เพราะชั้นดินเหนียวปนทรายที่คั่นอยู่ระหว่างชั้นน้ำจืดกับชั้นน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มมีความหนาไม่มาก ทำให้น้ำจืดและน้ำกร่อยหรือน้ำเค็มสามารถไหลผ่านกันได้ ประมาณ 5 ลบ.ม./ชม. ความดันน้ำสูงกว่าชั้นน้ำนนทบุรี

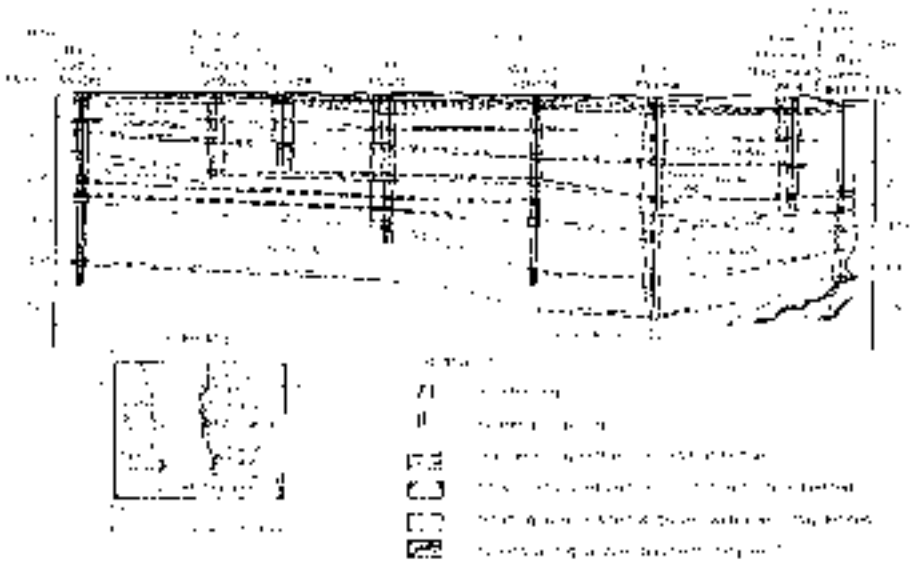
6. **ชั้นน้ำพญาไท (โซน 350 เมตร)** อยู่ลึกจากผิวดิน ประมาณ 300-400 เมตร ชั้นน้ำหนา 40-60 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยตะกอนกรวด ตะกอนทราย ตะกอนดินเหนียวปนทราย มีชั้นดินเหนียวหนาคั่นอยู่ระหว่าง 5 ชั้น ชั้นน้ำมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอปากเกร็ด อำเภอเมืองนนทบุรี อำเภอบางกรวด อำเภอบางใหญ่ อำเภอเมืองปทุมธานี อำเภอสามโคก อำเภอลาดหลุมแก้ว และอำเภอคลองหลวง ชั้นน้ำมีความลึกประมาณ 300-400 เมตร ชั้นน้ำหนา 40-60 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยตะกอนกรวด ตะกอนทราย ตะกอนดินเหนียวปนทราย มีชั้นดินเหนียวหนาคั่นอยู่ระหว่าง 3 ชั้น ชั้นน้ำมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอปากเกร็ด อำเภอเมืองนนทบุรี อำเภอบางกรวด อำเภอบางใหญ่ อำเภอเมืองปทุมธานี อำเภอสามโคก อำเภอลาดหลุมแก้ว และอำเภอคลองหลวง ชั้นน้ำมีความลึกประมาณ 300-400 เมตร ชั้นน้ำหนา 40-60 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยตะกอนกรวด ตะกอนทราย ตะกอนดินเหนียวปนทราย มีชั้นดินเหนียวหนาคั่นอยู่ระหว่าง 3 ชั้น ชั้นน้ำมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอปากเกร็ด อำเภอเมืองนนทบุรี อำเภอบางกรวด อำเภอบางใหญ่ อำเภอเมืองปทุมธานี อำเภอสามโคก อำเภอลาดหลุมแก้ว และอำเภอคลองหลวง

7. **ชั้นน้ำธนบุรี (โซน 400 เมตร)** อยู่ลึกจากผิวดิน ประมาณ 350-400 เมตร ชั้นน้ำหนา 80-100 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยตะกอนกรวด ตะกอนทราย ตะกอนดินเหนียวปนทราย ชั้นดินเหนียวหนาคั่นอยู่ระหว่าง 3 ชั้น ชั้นน้ำมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอปากเกร็ด อำเภอเมืองนนทบุรี อำเภอบางกรวด อำเภอบางใหญ่ อำเภอเมืองปทุมธานี อำเภอสามโคก อำเภอลาดหลุมแก้ว และอำเภอคลองหลวง ชั้นน้ำมีความลึกประมาณ 350-400 เมตร ชั้นน้ำหนา 80-100 เมตร ชั้นน้ำประกอบด้วยตะกอนกรวด ตะกอนทราย ตะกอนดินเหนียวปนทราย ชั้นดินเหนียวหนาคั่นอยู่ระหว่าง 3 ชั้น ชั้นน้ำมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอปากเกร็ด อำเภอเมืองนนทบุรี อำเภอบางกรวด อำเภอบางใหญ่ อำเภอเมืองปทุมธานี อำเภอสามโคก อำเภอลาดหลุมแก้ว และอำเภอคลองหลวง

8. **ชั้นน้ำปากน้ำ (โซน 500 เมตร)** ชั้นน้ำนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาในรายละเอียดมากนัก ในพื้นที่ส่วนใหญ่ยังไม่มีการใช้ชั้นน้ำนี้ในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากชั้นน้ำนี้อยู่ลึกมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะสูง ชั้นน้ำนี้อยู่ลึกจากผิวดิน ประมาณ 450-550 เมตร ชั้นน้ำหนา 50 เมตร เป็นชั้นน้ำที่มีศักยภาพที่สูงมาก ชั้นน้ำนี้ยังมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ชั้นน้ำนี้ยังมีความลึกประมาณ 450-550 เมตร ชั้นน้ำหนา 50 เมตร เป็นชั้นน้ำที่มีศักยภาพที่สูงมาก ชั้นน้ำนี้ยังมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ชั้นน้ำนี้ยังมีความลึกประมาณ 450-550 เมตร ชั้นน้ำหนา 50 เมตร เป็นชั้นน้ำที่มีศักยภาพที่สูงมาก ชั้นน้ำนี้ยังมีการวางตัวต่อเนื่องกันทั่วพื้นที่ ยกเว้นบริเวณที่ชั้นน้ำถูกกัดเซาะหายไป ในพื้นที่ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

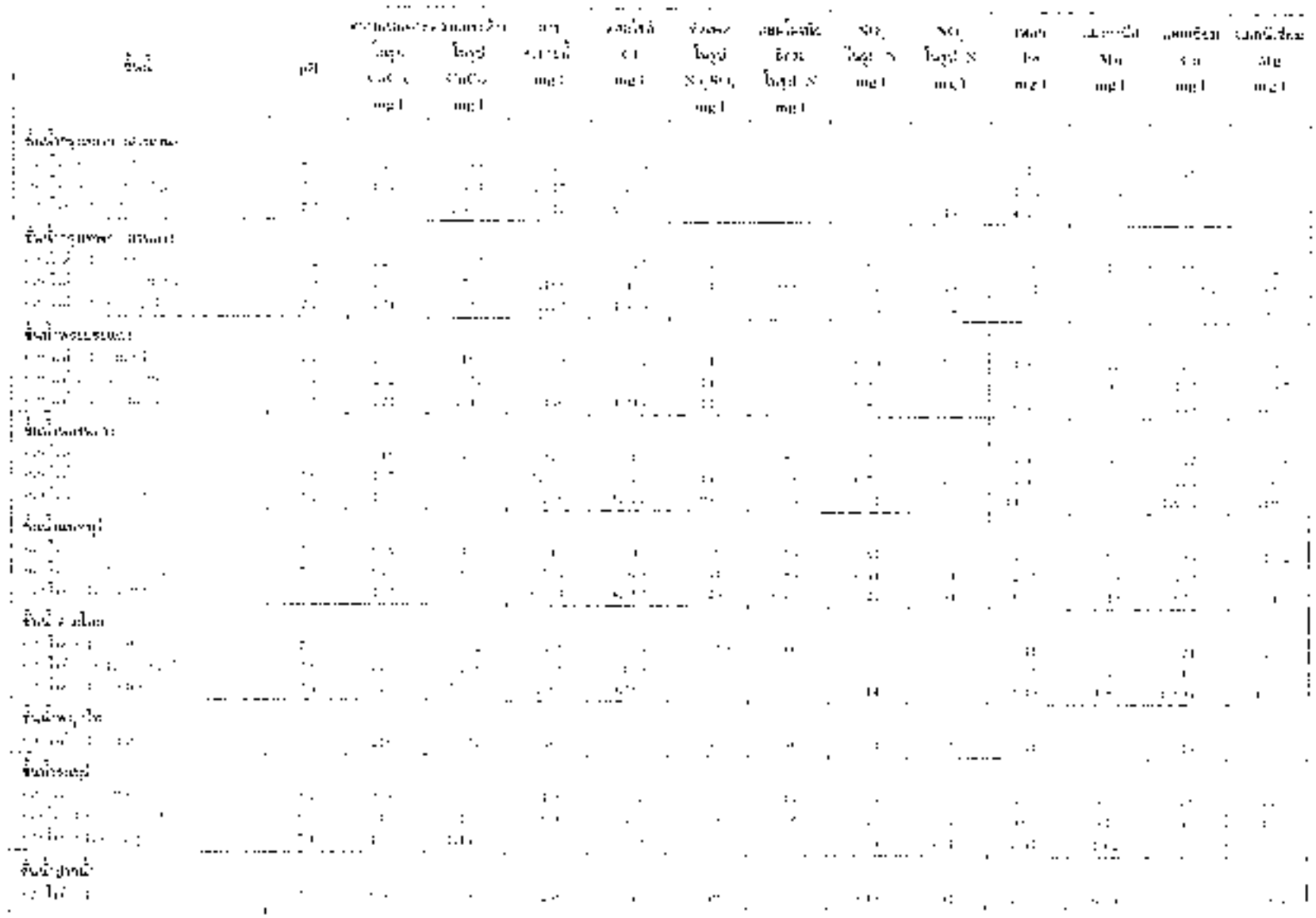


รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับความลึกของบ่อ



Hydrogeology North-South Section of the Lower Chao Phraya Delta Showing Penetrat Aquifers of Bangkok Metropolis (Charoen Phanchareon & Suree Taesiri)

รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางแสดงชั้นน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานคร



ตารางที่ 3.7 การจำแนกชั้นน้ำ [illegible] Metcalf & Eddy, Inc.

ชั้นน้ำ	ระยะความลึก [illegible] ชั้นน้ำ (เมตร)	ความหนาชั้นน้ำ (เมตร)
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

ตารางที่ 3.8 คุณภาพน้ำบาดาลในจังหวัดต่าง ๆ

[illegible]

[illegible]

จังหวัด	ความลึกบ่อบาดาล ฟุต	คลอไรด์ พีพีเอ็ม	สารที่ละลาย (TDS) พีพีเอ็ม	ความกระด้าง พีพีเอ็ม
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

ตารางที่ ๖.๑ คุณภาพน้ำบาดาลบริเวณอำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี

รายการ	หน่วย	พ.ศ.	ความลึกของบ่อ (เมตร)	
			๓๐๐	๔๐๐
pH			๖.๒	๗.๐
ความกระด้าง			๑๗๐	๒๐๐
ความกระด้างถาวร (as $CaCO_3$)	mg/l		๑๐๐	๑๒๐
ความกระด้างชั่วคราว (as $CaCO_3$)	mg/l		๗๐	๘๐
ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-)			๓๓๐	๓๙๐
ความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ ๒๕ °C			๔๓๐	๕๐๐
ความขุ่น			๕	๓
สี (platinum-cobalt)			๐	๐
แคลเซียม (Ca)			๔๐	๔๘
แมกนีเซียม (Mg)			๑๐	๑๒
โซเดียม (Na)			๗๖	๘๗
ซิลิกา (as SiO_2)			๑๐	
ฟลูออไรด์ (as F^-)			๐.๓๖	๐.๓๘
เหล็ก (Fe)			๐	๐
แมงกานีส (Mn)			๐.๔	๐.๗
ซัลเฟต (SO_4)			๑๐	๑๐
ไนเตรต (NO_3)			๐.๐๓	๐.๐๑
ไนไตรต์ (NO_2)			๐	๐
คลอไรด์ (Cl)			๑	๑
ของแข็งละลายทั้งหมด (TDS)			๒๗๐	๒๙๐

ตารางที่ ๖.๒ คุณภาพน้ำบาดาลบริเวณพัทยา จังหวัดชลบุรี หน่วยมิลลิกรัมสมมูลต่อลิตร ยกเว้นค่าแสดงคุณสมบัติกายภาพ

ตำแหน่งที่ตั้ง	pH	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	ความกระด้างทั้งหมด (as $CaCO_3$)	ความขุ่น	HCO_3	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cl	SO_4	NO_3
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

๔.๓ ปัญหาเกี่ยวกับน้ำบาดาล

[illegible]

[illegible] (Cone of Depression) [illegible]

[illegible]

ตารางที่ 2.11

สถิติการขอรับอนุญาตใช้น้ำบาดาลทั่วราชอาณาจักร ตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2493 - กันยายน พ.ศ. 2536

จังหวัด	จำนวนแห่ง	ปริมาณน้ำที่ได้รับอนุญาตใช้ (ลบ.ม./วัน)
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

ที่มา : [illegible]

ตารางที่ 2.12

สถิติจำนวนบ่อและปริมาณการใช้น้ำบาดาลที่กรมทรัพยากรธรณีอนุญาต ระหว่างปี พ.ศ. 2535

ชนิด	ใบอนุญาตเจาะน้ำบาดาล				ใบอนุญาตใช้น้ำบาดาล			
	งานทางทรัพยากรธรณี		ฝ่ายคณะอนุกรรมการกลั่นกรองฯ จังหวัด และ กทม.		งานทางทรัพยากรธรณี		งานคณะอนุกรรมการกลั่นกรองฯ (ขุดเจาะ, เก็บรักษาน้ำ) จังหวัด และ กทม.	
เดือน	จำนวนบ่อ	ปริมาณน้ำ (ลบ.ม./วัน)	จำนวนบ่อ	ปริมาณน้ำ (ลบ.ม./วัน)	จำนวนบ่อ	ปริมาณน้ำ (ลบ.ม./วัน)	จำนวนบ่อ	ปริมาณน้ำ (ลบ.ม./วัน)
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

หมายเหตุ : [illegible]

บรรณานุกรม

1. การประปานครหลวง, สมาคม. "การสำรวจตัวอย่างดินเพื่อหาอายุของตะกอนดินเหนียวกรุงเทพมหานคร เพื่อประโยชน์ในการศึกษาหาแหล่งน้ำบาดาล." รายงานการประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ ๑ (๒๕๑๗).
2. ชัยณรงค์ เชื้อไทสง. กำเนิดน้ำบาดาลและแหล่งน้ำบาดาลในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ ๒. กรุงเทพมหานคร: ไทยวัฒนาพานิช, ๒๕๒๕.
3. ชัยวัฒน์ ปิยะบัณฑิตกุล. "การแพร่กระจายของน้ำบาดาลเค็มในที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย." รายงานการประชุมวิชาการ ครั้งที่ ๑๒ (๒๕๓๒): ๑๑๒-๑๒๐.
4. ชาญชัย เลิศรัตนวิญญู. สภาพน้ำบาดาลในเขตน้ำบาดาลกรุงเทพมหานคร. กรุงเทพมหานคร: กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี, ๒๕๒๘.
5. ชูชาญ ศรีวรวิญญู. "การสำรวจน้ำบาดาลเค็มบริเวณจังหวัดสมุทรสาคร." รายงานการประชุมวิชาการ ครั้งที่ ๒ (๒๕๒๑).
6. ชูชาญ ศิริวรวิญญู. "การแพร่กระจายของน้ำบาดาลเค็มในประเทศไทย." รายงานการประชุมวิชาการ ครั้งที่ ๑๒ (๒๕๓๒).
7. สมประสงค์, กรม. คู่มือการใช้งานชุดทดสอบคุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ ๑๕. คู่มือการทดสอบชุดประจำตัวแล่มที่ ๑๕ คุณภาพของน้ำในงานชลประทาน, ๒๕๒๑.
8. [illegible]. กรม. น้ำบาดาล. [illegible]. สรุปผลการปฏิบัติงานของงานควบคุมการใช้น้ำบาดาล.
9. [illegible]. กรม. รายงานการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลในภาคตะวันออก. [illegible].
10. [illegible]. [illegible]. [illegible]. ระบบวิทยาสำหรับวิศวกร. [illegible]: [illegible], [illegible].
11. [illegible]. "คุณภาพน้ำบาดาลของ[illegible]." ข่าวสารการธรณี ๒๒ (กุมภาพันธ์ ๒๕๓๐).
12. [illegible]. ธรณีวิศวกรรมพื้นฐาน. [illegible]: [illegible], [illegible]. [illegible]: [illegible], ๒๕๒๘.
13. [illegible]. กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. [illegible]. ข้อมูลคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินในประเทศไทย. [illegible]: [illegible], [illegible].
14. Brownlow, A.H. Geochemistry. New Jersey : Prentice-Hall, 1979.
15. Chanvet Phancharoen and Vichit Ramasoota. "On the Ground Water Resources of Pattaya and Adjacent Areas." Jour. Geol. Soc. Thailand. Vol. 5, No. 1-2 (December 1982).
16. Davis, S.N. and DeWiest, R.J.M. Hydrogeology. New York : John Wiley & Sons, 1966.
17. Eriksson, E. and Khunakasem, V. "The Chemistry of Ground Waters." in Ground Waters Problems. ed. by E. Eriksson, V. Gustafsson and K. Nilsson. London : Pergamon Press, 1979.

15. Johnson Division. Ground Water and Wells. Universal Oil Products Co., 1972.

16. MWWA. Report on Ground Water Monitoring, Well Construction and Filter Programs. Metcalf & Eddy, November 1977.

17. MWWA. Water Supply and Distribution Master Plan. Technical Report Volume II. Camp Dresser & McKee Consulting Engineers, February 1978.

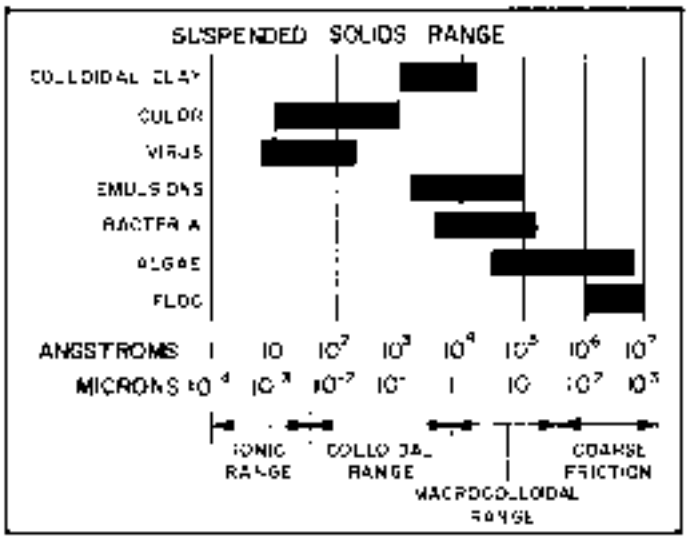
3 การกำจัดความขุ่น

การกำจัดความขุ่นของน้ำ (Suspended Solids) ที่มีขนาดต่างๆ กันนั้น จำเป็นต้องใช้วิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ

1. Clarification หรือการทำน้ำให้ใส
2. Filtration หรือการกรอง

3.1 การทำน้ำให้ใส (Clarification)

การทำน้ำให้ใสนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ 3 ขั้นตอน คือ การทำให้เกิดตะกอน (Coagulation) การรวมตัวเป็นตะกอน (Flocculation) และการตกตะกอน (Sedimentation) ซึ่งในขั้นตอนแรกนั้นจะเป็นการทำให้อนุภาคขนาดเล็กๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งตะกอนเหล่านี้จะมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนลงสู่ก้นบ่อได้ ส่วนขั้นตอนที่สองนั้นจะเป็นการรวมตัวของตะกอนขนาดเล็กๆ ให้เป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การตกตะกอนในขั้นตอนสุดท้ายมีประสิทธิภาพดีขึ้น ส่วนขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะเป็นการตกตะกอนนั่นเอง



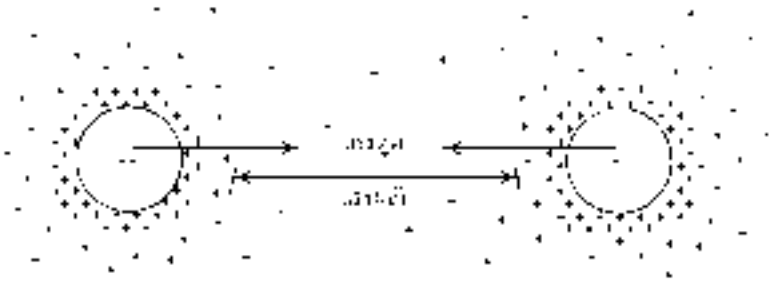
รูปที่ 3.1 ขนาดของอนุภาคต่างๆ ที่เป็นสารแขวนลอยในน้ำ

ตารางที่ [illegible] ขนาดและอัตราเร็วตกตะกอนของอนุภาคที่ทำให้เกิดความขุ่นชนิดต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มิลลิเมตร	ชนิด	อัตราการตกตะกอน มิลลิเมตรต่อนาที	ระยะเวลาในการตกตะกอน เป็นระยะทาง 1 ฟุต
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

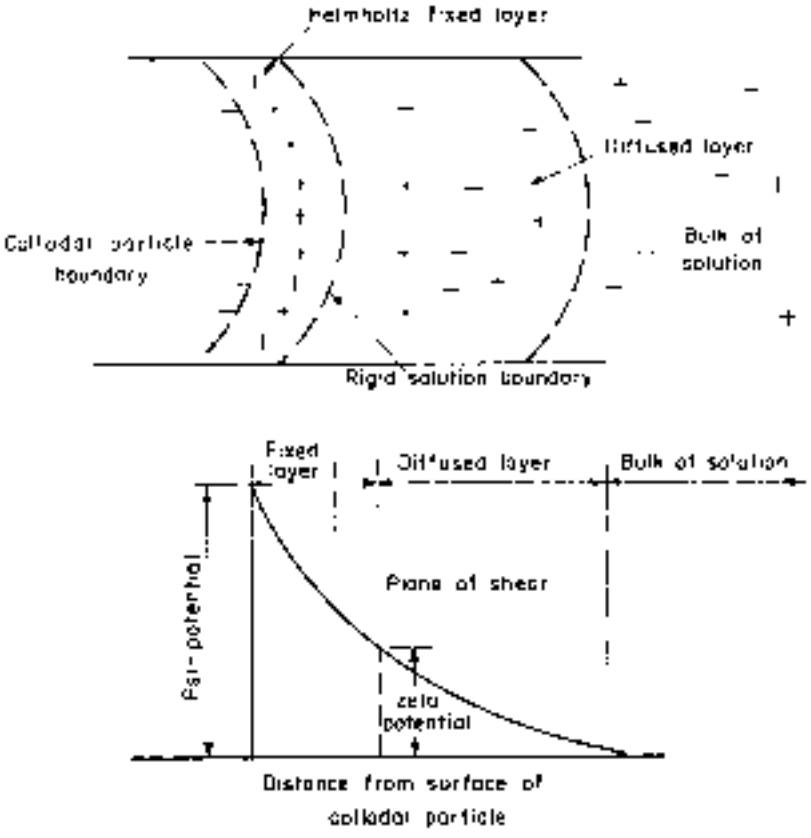
3.1.1 การจับตัว (Coagulation)

[illegible] กลุ่มนี้ [illegible] ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำขุ่น [illegible] ประกอบด้วย [illegible] (Hydrophobic) [illegible] และน้ำพวกชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าน้ำ ไม่มีสี [illegible] ทั้งสองชนิดนี้ [illegible]

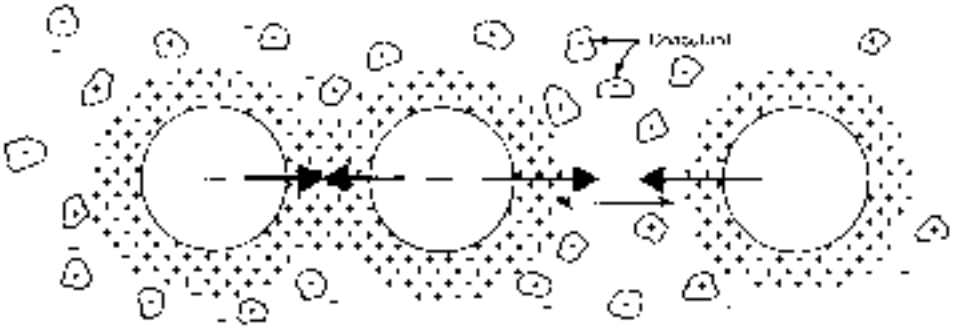


รูปที่ 3.2 แรงผลักและแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์

ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จนมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ซึ่งจะอยู่ในช่วงของอนุภาคที่อยู่ในสารละลายคอลลอยด์ ก็จะทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคมากขึ้น และมีผลทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปมาอยู่ตลอดเวลา ทำให้ไม่เกิดการตกตะกอนเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น แรงผลักระหว่างอนุภาคจะมีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดมาก จึงทำให้อนุภาคตกตะกอนเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกได้ง่าย



รูปที่ 3.3 สภาพประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์และศักย์ซีตา



รูปที่ 3.4 การเคมีช่วยตกตะกอนร่วมตะกอนและลักษณะของตะกอน

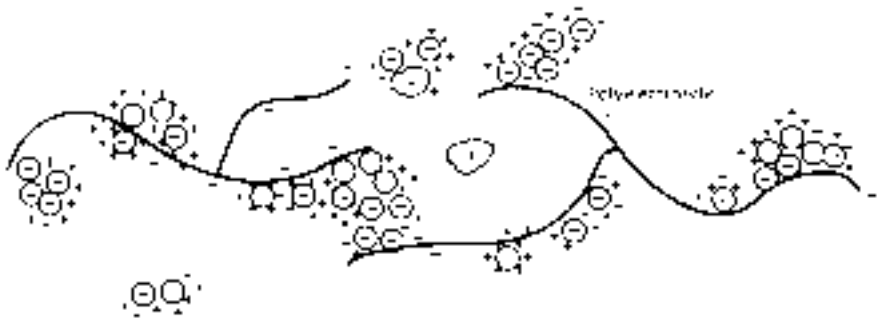
แรงผลักซีต้า (Zeta Potential) เป็นการวัดแรงที่อนุภาคจะทำปฏิกิริยากัน มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ ในขณะที่อนุภาคมีประจุเป็นลบหรือเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ จะเข้าใกล้อนุภาคอื่นๆ ได้ง่ายขึ้น ที่ที่มีค่า pH ต่างๆ จะมีค่าซีต้าต่างกัน ซึ่งค่าซีต้าที่ประสบผลสำเร็จในการทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจะเป็นกลางอนุภาคที่จะมีรวมตัวกันอยู่ ซึ่งทำให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยการที่จะลดค่าซีต้าลงจนเป็นศูนย์ได้ก็ต่อเมื่อมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารส้ม คลอรีน ปูนขาว ที่จะลดความหนาของชั้นน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคมีประจุไฟฟ้าลงจนไม่สามารถผลักกันได้ (Diffuse Double Layer) ที่ล้อมรอบอนุภาคไว้ เมื่อลดความหนาของชั้นน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคให้เล็กลง อนุภาคก็จะเข้าใกล้อนุภาคอื่นได้ ซึ่งแรงดูดระดับอนุภาคให้ยึดกันเข้าเป็นกลุ่มใหญ่ขึ้น เรียกว่า การตกตะกอน

ในการทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้น จะต้องให้โอกาสอนุภาคที่ทำให้เป็นกลางแล้วมีโอกาสชนกันมากขึ้น ดังนั้นในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ จึงต้องมีการเติมสารเคมีช่วยตกตะกอนเข้าไปในน้ำ เพื่อเพิ่มโอกาสที่อนุภาคจะชนกันให้มากขึ้น

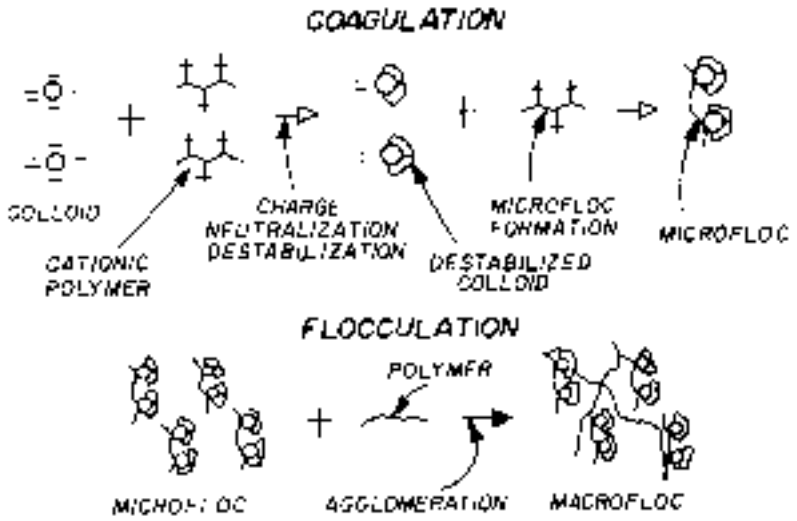
ในการเติมสารเคมีช่วยตกตะกอน (Coagulants) ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคที่ทำให้เกิดศักย์ซีต้าที่เป็นการรับตัวระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อศักย์ซีต้ามีค่าใกล้เคียงศูนย์ และต้องใช้เวลาที่เหมาะสมในการผสมน้ำประสานให้เป็นตะกอนเหล็ก ถ้าใช้สารเคมีมากเกินไป ก็จะประจุบวกของสารเคมีที่เหลือตัวอย่างประจุที่มีประจุบวกจำนวนมากจะทำให้อนุภาคมีศักย์ซีต้าเป็นบวก จะทำให้อนุภาคมีแรงผลักกันตกตะกอนได้ยาก เหมาะสำหรับตกตะกอน ดังนั้นในการใช้สารเคมี เช่น สารส้ม ถ้าใช้มากเกินไป จะทำให้ตะกอนมีประจุบวกเกิน

3.1.2 การรวมตัว (Flocculation)

หลังจากที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นแล้ว ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำให้อนุภาคที่ตกตะกอนได้ดีแล้วรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น (Slow Mixing) ที่เรียกว่าฟล็อก (Floc) ซึ่งจะตกตะกอนได้ง่ายขึ้น ส่วนมากจะเป็นการเติมสารเคมีช่วยในการรวมตัวกันของตะกอน (Flocculants) ที่เรียกว่า Polymer หรือ Polyelectrolytes ซึ่งจัดเป็นพวก Flocculants จะช่วยให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 1.5 ลักษณะทั่วไปของโพลีอิเล็กโทรไลต์ช่วยจับอนุภาค



รูปที่ 1.6 ลักษณะการจับคู่ รวมตัว เมื่อใช้โพลีเมอร์

3.1.3 [illegible] (Coagulants)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของสารเคมีบางชนิด

ชื่อ	สูตรเคมี	น้ำหนักโมเลกุล	ค่า pH ที่ความเข้มข้น [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

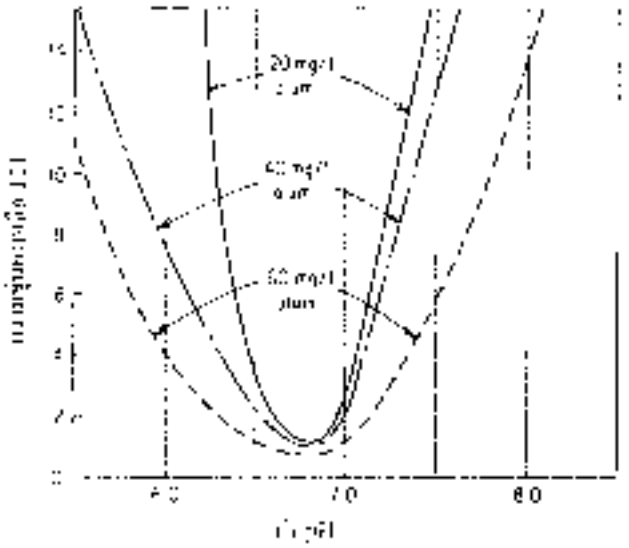
1. สารส้ม (Aluminum Sulfate or Alum) มีสูตรเคมี Al_2O_3 ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะ [illegible] จะให้ประจุบวกสามตัวต่อหนึ่งโมเลกุล ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานขึ้นกับค่า pH และความเป็นด่างในน้ำเป็นอย่างมาก ซึ่งมักใช้สารช่วยในการปรับ [illegible] เพื่อให้ได้ค่า pH ตามต้องการ

สมการที่แสดงการละลายในน้ำที่มีความเป็นด่างอยู่ จะแสดงดังนี้

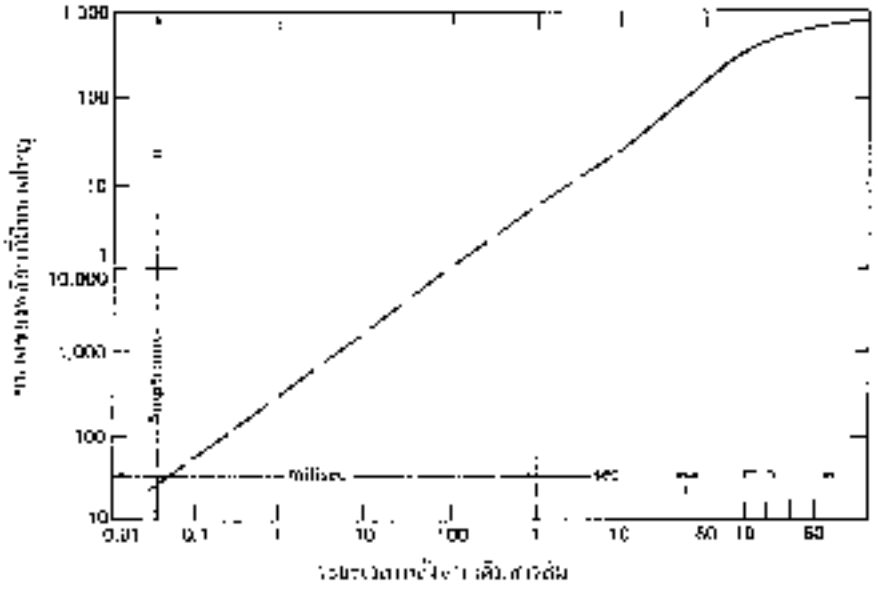
$$Al_2(SO_4)_3 = Al^{+++} + 3\,SO_4^{--}$$

$$H_2O = H^+ + OH^-$$

$$2\,Al^{+++} + 6\,OH^- = 2\,Al(OH)_3$$



รูปที่ 3.7 (ก) ผลของปริมาณการย้อมสีช่วง pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอน



รูปที่ 3.7 (ข) ลักษณะการเพิ่มขึ้นของฟลอคหลังจากการเติมสารส้ม

ละก็ใช้ได้กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับสารส้มแล้วจะได้ตะกอนเหมือนกัน แต่ตะกอนที่ได้นี้ OH มีอยู่มากเกินพอที่จะทำปฏิกิริยากับสารส้มอีก จึงต้องมีการเติมปูนขาว โซดาแอชหรือโซดาไฟ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\,Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2\,Al(OH)_3\downarrow + 3\,CaSO_4 + 6\,CO_2\uparrow$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 6\,NaHCO_3 \rightarrow 2\,Al(OH)_3\downarrow + 3\,Na_2SO_4 + 6\,CO_2\uparrow$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\,Na_2CO_3 + 3\,H_2O \longrightarrow 2\,Al(OH)_3\downarrow + 3\,CO_2\uparrow$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 6\,NaOH \rightarrow 2\,Al(OH)_3\downarrow + 3\,Na_2SO_4$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\,Ca(OH)_2 \longrightarrow 2\,Al(OH)_3\downarrow + 3\,CaSO_4$$

สรุปได้ว่าสารส้มทำงานได้ดีที่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำปฏิกิริยากับ

0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ของความเป็นด่างในรูป $CaCO_3$

0.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ของปูนขาว 85% ในรูป CaO

0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ของปูนขาว 100% ในรูป $Ca(OH)_2$

0.94 มิลลิกรัมต่อลิตร ของโซดาแอช ในรูป Na_2CO_3

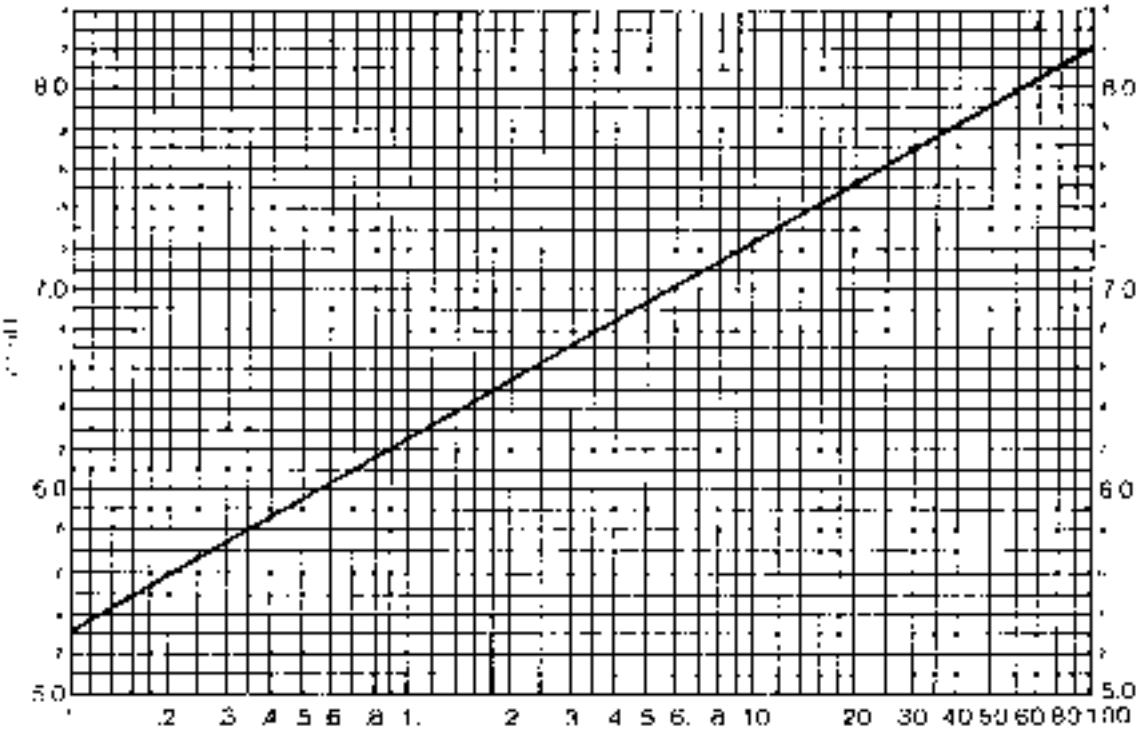
ช่วง pH 6.0-7.0 เป็นช่วงที่ดีที่สุดสำหรับการสับน้ำตะกอน ซึ่งอย่างน้อยต้องเติมสารส้มประมาณ 10 ppm ที่พีเอชที่เหมาะสมจึงจะตกตะกอนได้

ตารางที่ 1.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ลดความกระด้างและความเป็นด่าง 1 พีพีเอ็ม จะทำให้เกิดผลดังนี้

ชื่อพีพีเอ็ม ภาษาอังกฤษ	สูตรเคมี	ความเป็นด่างของพีพีเอ็ม	SiO_2 ในรูป $CaSiO_3$ เพิ่มขึ้นพีพีเอ็ม	Na_2SO_4 เพิ่มขึ้นพีพีเอ็ม	$CaCO_3$ เพิ่มขึ้นพีพีเอ็ม	Total Solids พีพีเอ็ม
Dried Alum	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	0.45	0.37	0.41	0.49	0.41
Ammonia Alum	$Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$	0.22	0.19	0.25	0.29	0.22
Potash Alum	$Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O$	0.19	0.16	0.22	0.25	0.16
Ferrous Sulfate	$FeSO_4 \cdot H_2O$	0.9	0.77	0.71	0.83	0.83
Chlorinated Copperas	$FeSO_4 \cdot 2H_2O + \frac{1}{2}Cl_2 + O_2$	0.9	0.77	0.71	0.83	0.83
Ferric Sulfate	$Fe_2(SO_4)_3$	0.75	0.64	0.67	0.78	0.71
Sulfuric Acid	H_2SO_4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Sulfuric Acid 93.2% 66° Be'	H_2SO_4	0.73	0.62	0.68	0.71	0.64
Sulfuric Acid 77.7% 60° Be'	H_2SO_4	0.62	0.53	0.58	0.60	0.55

ตารางที่ 1.2 ปริมาณความเป็นด่างและปูนขาว 1 พีพีเอ็มจะทำให้เกิดผลดังนี้

ชื่อ ภาษาอังกฤษ	สูตรเคมี 1 พีพีเอ็ม	ความเป็นด่างเพิ่มขึ้นพีพีเอ็ม	Free CO_2 ของพีพีเอ็ม	ความกระด้างเพิ่มขึ้นในรูป $CaCO_3$ พีพีเอ็ม
Sodium bicarbonate	$NaHCO_3$	0.60		
Soda Ash $Na_2O + H_2O \rightarrow 2NaOH$	Na_2CO_3	1.06	0.41	
Caustic Soda $2NaOH + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$	NaOH	1.25	1.10	
Quick Lime $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$	CaO	1.79	1.41	1.79
Hydrated Lime $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$	$Ca(OH)_2$	1.32	1.11	1.32



$$\text{Ratio} = \frac{\text{Methyl Orange Alkalinity (Expressed as ppm } CaCO_3)}{\text{Free Carbon Dioxide (Excess Value as ppm } CO_2)}$$

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นด่างไฮดรอกไซด์ (OH Alkalinity) กับค่าอัตราส่วนโดยเทียบกับค่า pH

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วน $M/(CO_2 + H_2O)$ ที่มีค่าน้อย จะแสดงถึงความเป็นกรดของน้ำที่มีอยู่มาก ซึ่งจะต้องเติมปูนขาวในปริมาณที่มากขึ้น ส่วนค่าที่มีค่ามากจะแสดงถึงน้ำที่มีความเป็นด่างสูง ดังนั้นการเติมปูนขาวจึงน้อยลงเพื่อปรับ pH ให้ได้ 8.5 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดในการตกตะกอนด้วยสารเคมี

น้ำดิบจากแหล่งน้ำต่างกันจะมีสภาพความเป็นกรดด่างแตกต่างกัน น้ำที่มีความเป็นด่างสูงจะมีค่า pH สูงกว่า 8.5 น้ำประเภทนี้จะต้องมีการปรับ pH ลงมาประมาณ 8.5 ก่อนเข้าสู่กระบวนการตกตะกอน ส่วนน้ำที่มีความเป็นกรดสูงจะมีค่า pH ต่ำกว่า 8.5 เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีในกระบวนการตกตะกอน ดังนั้นจึงต้องเติมปูนขาวเพื่อปรับค่า pH ของน้ำให้ได้ค่าเท่ากับ 8.5 ก่อนเข้าสู่กระบวนการตกตะกอนเช่นเดียวกัน

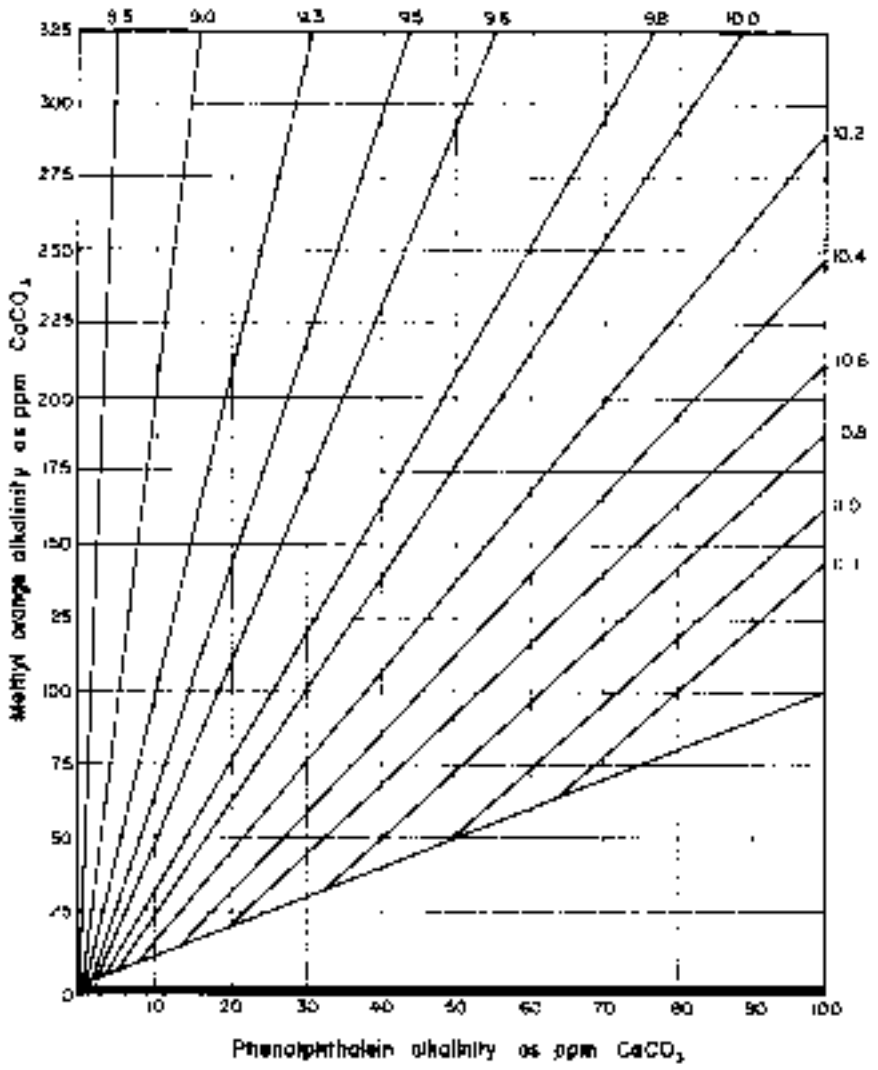
ตัวอย่างที่ 4.1 น้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมีค่า pH น้อยกว่า 8.5 ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่า pH ก่อนเข้าสู่กระบวนการตกตะกอน ดังนี้

(1) ปรับด้วยโซดาแอช (Soda Ash, Na_2CO_3)

$$\text{ปริมาณโซดาแอชที่ใช้} = \frac{2\,CO_2 - M\text{-Alkalinity}}{2.17}$$

(2) ปรับด้วยปูนขาว (Lime, $Ca(OH)_2$)

$$\text{ปริมาณปูนขาวที่ใช้} = \frac{2\,CO_2 + M\text{-Alkalinity}}{4.0}$$



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของค่าด่างและค่าพีเอช ในการหา pH กรณีนี้สำหรับค่าที่มี P-Alkalinity ต่ำกว่าครึ่งหนึ่ง

กรณีที่ 2 ถ้าน้ำมีค่า pH สูงกว่า 8.3 และ P-Alkalinity มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของ M-Alkalinity ดังนี้

(1) ปริมาณด่าง ($Ca(OH)_2$) ที่มีในน้ำ

$$\text{ปริมาณด่างที่มีใน} = \frac{\text{M-Alkalinity} - 2 \times \text{CO}_2}{1.36} \quad \ldots\ldots(1)$$

(2) ปริมาณด่างที่ทำปฏิกิริยากับ CO_2

$$\text{ปริมาณด่างที่ทำปฏิกิริยา} = \frac{\text{M-Alkalinity} + 2 \times \text{CO}_2}{2.44} \quad \ldots\ldots(2)$$

ตารางที่ 2.5 ผลการวิเคราะห์น้ำ

ที่มา : การประปานครหลวง

หน่วย : มิลลิกรัม

ค่าที่ : ค่าที่วัด

ข้อสังเกต : ไม่ได้วัดหรือไม่มีข้อมูล

ข้อสรุป : น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา

	สาร	สัญลักษณ์	Parts Per Million (ppm) as $CaCO_3$			
			1	2	3	4
CATIONS	Calcium	Ca^{2+}	25	25	25	
	Magnesium	Mg^{2+}	13	13	13	
	Sodium	Na^{+}	10	10	9.5	
	Hydrogen Acidity	H^{+}	0	0	0	
	Total Cations		48	48	47	
ANIONS	Bicarbonate	HCO_3^{-}	15	20	21	
	Carbonate	CO_3^{2-}	0	0	0	
	Hydroxide	OH^{-}	0	0	0	
	Phosphate	PO_4^{3-}	0	0	0	
	Chloride	Cl^{-}	1	1	1	
	Sulfate	SO_4^{2-}	1	20	25	
	Nitrate	NO_3^{-}	0	0	0	
	Total Anions		17	41	47	
	Total Hardness		38	63	63	
	Methyl Orange Alkalinity		17	41	41	
	Phenolphthalein Alkalinity		0	0	0	
	Non-carbonate Hardness		0	23	0	
	Non-alkaline Hardness		0	0	0	
			pH 7.0	pH 8.0	pH 9.0	pH 10.0
	Carbon dioxide	CO_2	5	2.5	1.0	
	Silica	SiO_2				
	Iron	Fe				
	Turbidity		1.0		1.0	
	Color		5		2	
	Total Solids (Quantity = SiO_2)					
	pH		7.1	8.0	9.0	

การคำนวณ

[illegible] มีค่าเป็น

มีค่าเป็นบวก [illegible] มีหน่วยเป็น

CO_2 [illegible] มีหน่วยเป็น

[illegible] มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร

ความเป็นด่างของน้ำ = [illegible] = [illegible] มิลลิอีควิวาเลนต์

Free CO_2 ที่เพิ่มขึ้น = [illegible] = [illegible] มิลลิอีควิวาเลนต์

ดังนั้น น้ำมีไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น [illegible] มิลลิอีควิวาเลนต์ และ CO_2 เพิ่มขึ้นเป็น [illegible] มิลลิอีควิวาเลนต์

$$\text{อัตราส่วน} = \frac{\text{M Alkalinity}}{\text{Free } CO_2} = \frac{\text{[illegible]}}{\text{[illegible]}} = \text{[illegible]}$$

จากรูปที่ [illegible] จะได้ว่าน้ำมีค่า pH เพียง [illegible] ซึ่งน้อยกว่าที่ต้องการ (pH [illegible]) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมด่างลงไปเพื่อทำให้ pH ของน้ำสูงขึ้นตามต้องการ ดังรูปที่ [illegible]

$$\text{ปริมาณโซดาแอชที่ใช้} = \frac{[\text{illegible}] \times [\text{illegible}]) \times 50}{\text{[illegible]}} = \frac{\text{[illegible]}}{\text{[illegible]}}$$

$$= \text{[illegible]} \text{ มิลลิกรัมในรูป } Na_2CO_3$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการเติมโซดาแอชนั้นจะมีปริมาณ CO_2 เพิ่มขึ้นด้วย ดังนี้

ความเป็นด่างที่เพิ่มขึ้น = [illegible] = [illegible] มิลลิอีควิวาเลนต์

CO_2 ที่เพิ่มขึ้น = [illegible] = [illegible] มิลลิอีควิวาเลนต์

ดังนั้นจะมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นทั้งสิ้น = [illegible] = [illegible] มิลลิอีควิวาเลนต์

Free CO_2 เพิ่มขึ้น = [illegible] = [illegible] มิลลิอีควิวาเลนต์

อัตราส่วน $\frac{\text{M Alkalinity}}{\text{Free } CO_2} = \frac{\text{[illegible]}}{\text{[illegible]}} =$ [illegible] ดังรูปที่ [illegible] จะได้ค่า pH = [illegible]

ตารางที่ ๔.๔ ผลการวิเคราะห์น้ำ

ที่มา [illegible]

หมายเหตุ : ๑ น้ำบ่อ

๒ น้ำประปา [illegible]

๓ น้ำจากเครื่องกรองน้ำ [illegible]

	ชนิด	สัญลักษณ์	Parts Per Million (ppm) as $CaCO_3$			
			1	2	3	4
CATIONS	Calcium	Ca^{++}	98	24	2.0	
	Magnesium	Mg^{++}	20	4.9	3.1	
	Sodium	Na^{+}	110	110	110	
	Hydrogen Acidity	H^{+}	0	0	0	
	Total Cations		228	139	115	
ANIONS	Bicarbonate	HCO_3^{-}	120	76	110	
	Carbonate	CO_3^{--}	0	0	0	
	Hydroxide	OH^{-}	0	0	0	
	Phosphate	PO_4^{---}	0	0	0	
	Alkalinity		120	76	110	
	Chloride	Cl^{-}	100	60	1.0	
	Sulfate	SO_4^{--}	220	0	0.0	
	Nitrate	NO_3^{-}	0	0	0	
	Total Anions		220	136	111	
	Total Hardness		300	80	16	
	Methyl Orange Alkalinity		120	100	110	
	Phenolphthalein Alkalinity		0	0	0	
	Non-carbonate Hardness		0	0	0	
	Sodium Alkalinity		120	76	2.0	
			ppm	ppm	ppm	ppm
	Carbon dioxide	CO_2	0	2.0	0.0	
	Silica	SiO_2				
	Iron	Fe				
	Turbidity		100		0	
	Color		0		0	
	Total Solids (Calculated)				0	
	pH		7.2		6.0	

การตกตะกอนน้ำที่มีความเป็นด่างสูงและความกระด้างต่ำ

ในกรณีนี้ การใช้งานการตกตะกอนที่ pH ประมาณ 9.5 เพื่อลดความกระด้างถาวร

ปริมาณของ CO_2 ที่ต้องการ = $\frac{\text{M-Alkalinity} \times 44}{50}$

ปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ที่ต้องการ = $\frac{\text{M-Alkalinity} \times 74}{100}$

ในกรณีที่ใช้ Na_2CO_3 ในการตกตะกอน

ปริมาณของ Na_2CO_3 ที่ใช้ = $\frac{(\text{Ca} \times 106) - (\text{M} \times 84)}{100}$ = ... มิลลิกรัม

ต่อมาจะเป็นการใช้ Na_2CO_3 เพื่อกำจัดความกระด้างถาวร ซึ่งมีค่าเท่ากับ ... ppm ดังนั้น ในกรณีนี้จะใช้ Na_2CO_3 ทั้งหมด ... มิลลิกรัม

CO_2 ที่ต้องการในการทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$	=	... × 0.44	= ... มิลลิกรัม
Free CO_2 ที่เพิ่มขึ้น	=	... × 0.44	= ... มิลลิกรัม
ปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ที่ใช้		$\frac{\text{...} + \text{...} + \text{...}}{0.92}$	= ... มิลลิกรัม
ความกระด้างที่เหลืออยู่	=	... × 1.02	= ... มิลลิกรัม
Free CO_2 ที่เพิ่มขึ้น		... × 0.44	= ... มิลลิกรัม
ปริมาณของ Na_2CO_3 ที่ต้องการ	=	... + ... + ...	= ... มิลลิกรัม
Free CO_2	=	... + ... + ...	= ... มิลลิกรัม

ตารางที่ ๓.๗ ผลการวิเคราะห์น้ำ

ที่มา : การประปาส่วนภูมิภาค

หมายเหตุ : ๑) ปี ๒๕๓๑

๒) ค่าน้ำดิบก่อนเข้าเครื่องกรองน้ำ ๓) ค่าน้ำดิบหลังเข้าเครื่องกรองน้ำ ๔) ค่าน้ำประปา

	ชื่อ	ชื่อสัญลักษณ์	Parts Per Million (ppm) as $CaCO_3$			
			๑	๒	๓	๔
CATIONS	Calcium	Ca^{++}	๔๖	๔๗		
	Magnesium	Mg^{++}	๒๑	๒๑		
	Sodium	Na^{+}	๑๖	๑๖		
	Hydrogen Acidity	H^{+}	๐	๐		
	Total Cations		๘๐	๘๒		
ANIONS	Bicarbonate	HCO_3^{-}	๓๐	๓๐		
	Carbonate (Alkalinity)	CO_3^{--}	๐	๐		
	Hydroxide (Alkalinity)	OH^{-}	๐	๐		
	Phosphate (Alkalinity)	PO_4^{---}	๐	๐		
	Chloride	Cl^{-}	๕	๕		
	Sulfate	SO_4^{--}	๒๑	๒๑		
	Nitrate	NO_3^{-}	๐	๐		
	Total Anions		๘๐	๘๐		
	Total Hardness		๔๐	๔๐		
	Methyl Orange Alkalinity		๓๐	๓๐		
	Phenolphthalein Alkalinity		๐	๐		
	Non-carbonate Hardness		๑๐	๑๐		
	Sodium Alkalinity		๐	๐		
			ppm	ppm	ppm	ppm
	Carbon Dioxide	CO_2	๑	๑	๑	
	Silica	SiO_2	๑	๑		
	Iron	Fe	๐	๐		
	Turbidity		๑	๑	๐	๐
	Color					
	Total Solids (Cations + NH_4)					
	pH		๗	๗		

การขจัดสีด้วยสารส้ม

มีที่อยู่ในน้ำดิบ [illegible] ต้องละลายน้ำก่อนใช้งาน ซึ่งจะทำให้น้ำมีค่า pH ลดลง ปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่างของน้ำดิบ

กรณีที่ 1 น้ำดิบมีค่า pH ต่ำกว่า 8.3 ไม่ต้องเติมด่างเพื่อทำปฏิกิริยากับสารส้ม ปริมาณที่ใช้ในการตกตะกอนได้จากสมการ

$$\text{ปริมาณสารส้มที่ใช้} = \frac{0.2 \times CO_2 + \text{M-Alkalinity}}{1.45}$$

$$\text{ปริมาณโซเดียมอะลูมิเนตที่ใช้} = \frac{0.2 \times CO_2 + \text{M-Alkalinity}}{1.02}$$

กรณีที่ 2 น้ำดิบมีค่าด่างต่ำ ปริมาณสารส้มที่ใช้ขึ้นอยู่กับค่าด่างที่ต้องการ เพื่อให้ pH ของน้ำหลังการตกตะกอนได้ตามต้องการ

$$\text{ปริมาณสารส้มที่ใช้} = \frac{\text{M-Alkalinity} - 0.2 \times CO_2}{1.45}$$

$$\text{ปริมาณโซเดียมอะลูมิเนต} (Al_2O_3, 1.5\ H_2O) \text{ที่ใช้} = \frac{\text{M-Alkalinity} - 0.2 \times CO_2}{0.83}$$

เติมสารส้ม 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่าด่างที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา = 35 − (15 × 0.45) = 28

Free CO_2 เพิ่มขึ้น = 2 + (15 × 0.2) = 5

ดังนั้น ต้องเติมด่าง = $\frac{11}{28}$ = 0.39 เท่าของที่ต้องการ เพื่อให้ pH ของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วมีค่าเท่ากับ 8.3 ดังนั้นต้องเติมสารส้มปริมาณกี่มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ pH = 8.3

ปริมาณสารส้มที่ใช้ = $\frac{35 - (0.2 \times 5)}{1.45}$ = 23 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่าด่างที่ต้องเติมเพิ่มขึ้น = 23 × 0.45 × 0.39 = 4 มิลลิกรัมต่อลิตร

Free CO_2 ที่เพิ่มขึ้น = 2 + (23 × 0.2) = 7 มิลลิกรัมต่อลิตร

ดังนั้น ต้องเติมด่าง = $\frac{6}{28}$ = 0.21 เท่าของที่ต้องการ เพื่อให้ pH = 8.3 พอดี

2. **โซเดียมอะลูมิเนต** ($Na_2Al_2O_4$) เมื่อละลายน้ำ จะให้ปฏิกิริยาคล้ายกับสารส้ม ในการใช้งานมักใช้ร่วมกับสารส้ม มีข้อดีดังนี้คือ

ช่วยการตกตะกอนได้ดีในช่วง pH กว้าง

ประหยัดเพราะใช้ปริมาณและต้นทุนน้อยกว่าสารส้ม

ที่ใช้ในการผลิตที่มีสิ่งเจือปน หรือใช้ในการผลิตน้ำดื่ม

- โดยการนำสารส้มมาผสมกับน้ำ ในอัตราส่วน 100 ถึง 200 ppm ขึ้นอยู่กับความขุ่นของน้ำ ซึ่งจะทำให้น้ำมีค่า pH ประมาณ 6.5 ถึง 7.5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของสารแขวนลอย

ปฏิกิริยาการตกตะกอนของสารแขวนลอยด้วยสารส้ม

$$6\,NaAlO_2 + Al_2(SO_4)_3 + 24\,H_2O \rightarrow 8\,Al(OH)_3 + 3\,Na_2SO_4 + 9\,H_2O$$

$$2\,NaAlO_3 + CO_2 + 3\,H_2O \rightarrow Na_2CO_3 + 2\,Al(OH)_3$$

3. เกลือของเหล็ก

(1) **เฟอรัสซัลเฟต** ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า Copperas ในการใช้งานมีข้อดีและข้อเสียดังนี้ ข้อดีคือ เฟอรัสซัลเฟตให้ตะกอนที่มีความหนาแน่นสูง ใช้งานง่าย ราคาถูก ข้อเสียคือ ต้องมีการเติมด่างในการช่วยตกตะกอน ในการใช้งานเฟอรัสซัลเฟตจะต้องอยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ($Fe(OH)_2$) ได้ตะกอนเฟอรัสไฮดรอกไซด์ ซึ่งตะกอนนี้ไม่มีประสิทธิภาพในการตกตะกอน จึงต้องเติมด่างเพื่อให้ได้ตะกอนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะใช้ด่างมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำดิบ ถ้าน้ำดิบมีค่า pH สูงก็จะใช้ด่างน้อย ถ้าน้ำดิบมีค่า pH ต่ำก็จะใช้ด่างมาก ด่างที่นิยมใช้ในการตกตะกอนมีดังนี้

- ปูนขาว
- โซดาแอช
- โซดาไฟ

ในการเติมปูนขาวลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$FeSO_4 \cdot 7H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow Fe(OH)_2 + CaSO_4 + 7H_2O$$

$$4\,Fe(OH)_2 + O_2 + 2\,H_2O \rightarrow 4\,Fe(OH)_3$$

ปริมาณปูนขาวที่ใช้จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่างของน้ำดิบ ซึ่งจะต้องมีค่าความเป็นด่างเหลืออยู่ในน้ำประมาณ 50 ppm ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อให้ได้ตะกอนเฟอรัสไฮดรอกไซด์ที่มีประสิทธิภาพ

ในการใช้โซดาแอชและโซดาไฟในการตกตะกอนนั้น จะต้องมีการเติมสารส้มลงไปด้วย เพื่อให้ได้ตะกอนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำดื่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้โซดาแอชและโซดาไฟในการตกตะกอน

(2) **Chlorinated Copperas** ($FeSO_4 \cdot 7H_2O + \frac{1}{2}Cl_2$) เป็นการนำเอาเฟอรัสซัลเฟตมาใช้ร่วมกับคลอรีน ซึ่งจะใช้ค่า pH สูงกว่าการใช้เฟอรัสซัลเฟตเพียงอย่างเดียว และมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนดีกว่าการใช้เฟอรัสซัลเฟตเพียงอย่างเดียว ในการใช้งานจะต้องมีการปรับค่า pH ของน้ำดิบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมก่อน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนดีขึ้น ในการใช้งานจริงจะต้องมีการทดสอบหาปริมาณที่เหมาะสมก่อนการใช้งานจริง ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำดื่มได้

$$6\ FeSO_4 \cdot 7\ H_2O + 3\ Cl_2 \rightarrow 2\ Fe_2(SO_4)_3 + 2\ FeCl_3 + 7\ H_2O$$

ในกรณีที่ต้องเพิ่มเหล็กในน้ำเพื่อเร่งปฏิกิริยา ก็สามารถใช้เหล็กคลอไรด์ได้

(3) เฟอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$) ใช้ได้ผลดีกับน้ำที่มีค่าด่างสูง pH ที่จับตะกอนได้ดีจะอยู่ในช่วง 4.0 - 11.0 ให้ผลดีกว่าเฟอรัสซัลเฟต ในช่วง pH 5.0 - 8.5 ได้ผลดีมาก และสามารถใช้ได้ผลดีกับน้ำที่มีความเป็นกรดสูงๆ ได้ด้วย ปฏิกิริยาของเฟอริกซัลเฟตกับน้ำที่มีสภาพเป็นด่างตามธรรมชาติ เช่น น้ำที่มีค่าด่างเนื่องจากแคลเซียมไบคาร์บอเนต หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3\ Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2\ Fe(OH)_3 + 3\ CaSO_4 + 6\ CO_2$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + 6\ NaHCO_3 \rightarrow 2\ Fe(OH)_3 + 3\ Na_2SO_4 + 6\ CO_2$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3\ Na_2CO_3 + 3\ H_2O \rightarrow 2\ Fe(OH)_3 + 3\ Na_2SO_4 + 3\ CO_2$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + 6\ NaOH \rightarrow 2\ Fe(OH)_3 + 3\ Na_2SO_4$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3\ Ca(OH)_2 \rightarrow 2\ Fe(OH)_3 + 3\ CaSO_4$$

(4) เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) เฟอริกคลอไรด์ไม่มีการนำมาใช้ในงานด้านการประปาในประเทศไทย เนื่องจากมีปัญหาในการขนส่งและการเก็บรักษา

เฟอริกคลอไรด์ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถปฏิกิริยากับ

- ความเป็นด่าง 0.92 มิลลิกรัม-ต่อลิตร ในรูป $CaCO_3$
- ปูนขาวหรือ 0.78 มิลลิกรัม-ต่อลิตร

$$2\ FeCl_3 + 3\ Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2\ Fe(OH)_3 + 3\ CaCl_2 + 6\ CO_2$$

$$2\ FeCl_3 + 3\ Ca(OH)_2 \rightarrow 2\ Fe(OH)_3 + 3\ CaCl_2$$

การตกตะกอนด้วยเฟอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$)

เติมเฟอริกซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 42 ของน้ำหนัก 50 มิลลิลิตร ลงในน้ำดิบ 1 ลิตร ในขณะกวนเร็ว และต่อเนื่องด้วยการกวนช้าตามสภาวะที่ 3.3 นาที

ความเป็นด่างที่ลดลงเนื่องจากเฟอริกซัลเฟต = 50 × 0.75 × 0.92 = 18 มิลลิกรัม

ความเป็นด่างที่ต้องมีอยู่ = 20 - 10 = 10 มิลลิกรัม

ความเป็นด่างที่ต้องเพิ่มขึ้น = 28 × 0.92 × 0.92 = 24 มิลลิกรัม

ความเป็นด่างที่ต้องเพิ่มขึ้น = 24 × 1.1 = 27 มิลลิกรัม

ดังนั้นต้องเติมปูนขาวอีกประมาณ 17 มิลลิกรัมได้ ใช้เปลี่ยนปูนขาว ($Ca(OH)_2$) ในรูปของ $\frac{17}{1.11}$ = 15 มิลลิกรัม (เพราะปูนขาว 1 มิลลิกรัม ต้องการความเป็นด่างเพิ่มขึ้น 1.11 มิลลิกรัม ดังสมการที่ 3.3)

เติมปูนขาว 15 มิลลิกรัม จะทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้นดังนี้

ความเป็นด่างเพิ่มขึ้น = 15 × 1.36 = 20 มิลลิกรัม

ในขณะเดียวกันตะกอนจะเพิ่มขึ้น 15 มิลลิกรัม ด้วย

เฟอริกซัลเฟตจะทำปฏิกิริยาแล้วได้ตะกอนเหล็กไฮดรอกไซด์ 50 × 0.42 = 21 มิลลิกรัม

ดังนั้น จะต้องเติมปูนขาวเพื่อปรับ pH ของน้ำหลังจากเติมปูนขาวแล้วจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 36

ตารางที่ ๑.๑ ผลการวิเคราะห์น้ำ

ที่มา : [illegible]
หมายเหตุ : น้ำดิบ
[illegible]
[illegible]
[illegible]

	ชนิด	สัญลักษณ์	Parts Per Million (ppm) as $CaCO_3$			
			1	2	3	4
CATIONS	Calcium	Ca^{2+}	29	27	30	13
	Magnesium	Mg^{2+}	20	20	22	2
	Sodium*	Na^{+}	17	16	6	16
	Hydrogen Acidity	H^{+}	0	0	0	0
	Total Cations		52	56	58	31
ANIONS	Bicarbonate Alkalinity	HCO_3^{-}	30	16	32	29
	Carbonate Alkalinity	CO_3^{2-}	0	0	0	0
	Hydroxide Alkalinity	OH^{-}	0	0	0	0
	Phosphate Alkalinity	PO_4^{3-}	0	0	0	0
	Chloride	Cl^{-}	15	12	15	17
	Sulfate	SO_4^{2-}	10	28	29	29
	Nitrate	NO_3^{-}	0	0	0	0
	Total Anions		55	56	76	75
	Total Hardness		49	47	50	47
	Methyl Orange Alkalinity		30	16	32	29
	Phenolphthalein Alkalinity		0	0	0	0
	Non-Carbonate Hardness		19	31	18	18
	Sodium Alkalinity		0	0	0	0
			[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	Carbondioxide	CO_2	0	17	0	0
	Silica	SiO_2				
	Iron	Fe				
	Turbidity		0			0
	Color					
	Total Solids (Cations + SiO_2)		0			0
	pH*		7.0	6.8	6.6	6.8

[illegible] pH [illegible] (M-Alkalinity [illegible]) [illegible] M-Alkalinity [illegible] pH [illegible] P-Alkalinity [illegible] $\frac{4}{1.78}$ [illegible] P-Alkalinity [illegible] pH [illegible]

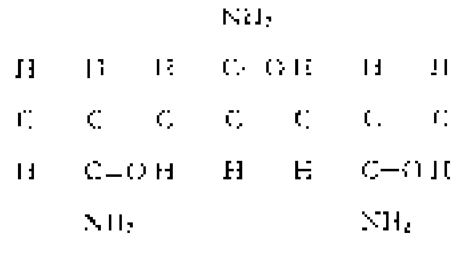
[illegible]

1. [illegible]
2. [illegible]
3. [illegible] pH [illegible]

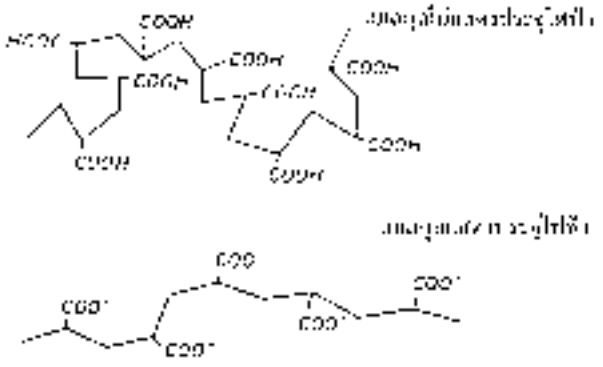
3.1.4 การเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน (Coagulant Aids or Polyelectrolytes)

[illegible] Polyelectrolytes [illegible] Polyacrylamides, Polyamines, Polyacrylates, Polyethyleneimine [illegible] Ionic Strength [illegible] Absorption Activity [illegible] Polyelectrolytes [illegible]

1. Anionic มีประจุลบ
2. Cationic มีประจุบวก
3. Ampholytic มีทั้งประจุบวกและลบ
4. Non-ionic ไม่แตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า



รูปที่ [illegible] สูตรโครงสร้างของ Polyacrylamide



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างของโพลีอิเล็กโตรไลต์

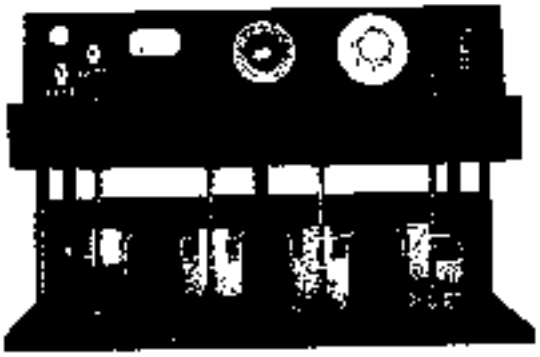
ชนิด Anionic และ Non-ionic Polyelectrolytes มีประโยชน์ในการแยกตัวของอนุภาคที่มีประจุลบ ทำให้เกิดการรวมตัวและเกิดตะกอนขึ้น ในขณะที่ชนิด Cationic ซึ่งมีประจุบวกมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคที่มีประจุลบได้ดีกว่าชนิดอื่น ๆ ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการปรับสภาพน้ำที่มีความขุ่นต่ำ ๆ ในขณะที่ชนิด Non-ionic ซึ่งมีประจุเป็นกลางจะมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคที่มีประจุลบได้ดีในน้ำที่มีความขุ่นสูง ๆ ในการใช้ Polyelectrolytes ช่วยในการตกตะกอนนี้ ต้องมีการผสมน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อให้สารกระจายตัวได้ทั่วถึงและทันเวลาก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ขึ้น

3.1.3 การทดสอบปริมาณสารละลายที่เหมาะสม

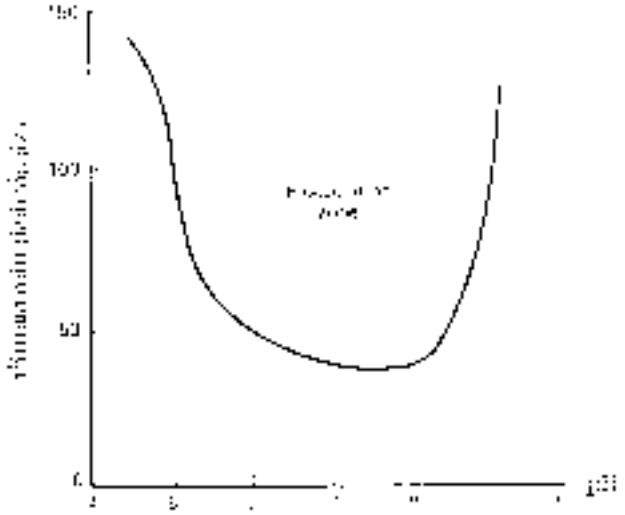
เนื่องจากอนุภาคที่มีประจุต่างชนิดกันและต่างขนาดกัน ในอนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันก็มีขนาดต่างกันได้ ดังนั้นการใช้ Polyelectrolytes ที่มีประจุชนิดเดียวกันและมีปริมาณที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการทดสอบนี้จะทำให้ทราบถึงปริมาณที่เหมาะสมของ Polyelectrolytes ที่ใช้ในการทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคได้ดีที่สุด ในการทดสอบนี้จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Jar Test

ในการทดสอบนี้จะต้องปรับค่าพีเอชของน้ำให้อยู่ที่ช่วงที่เหมาะสมก่อน

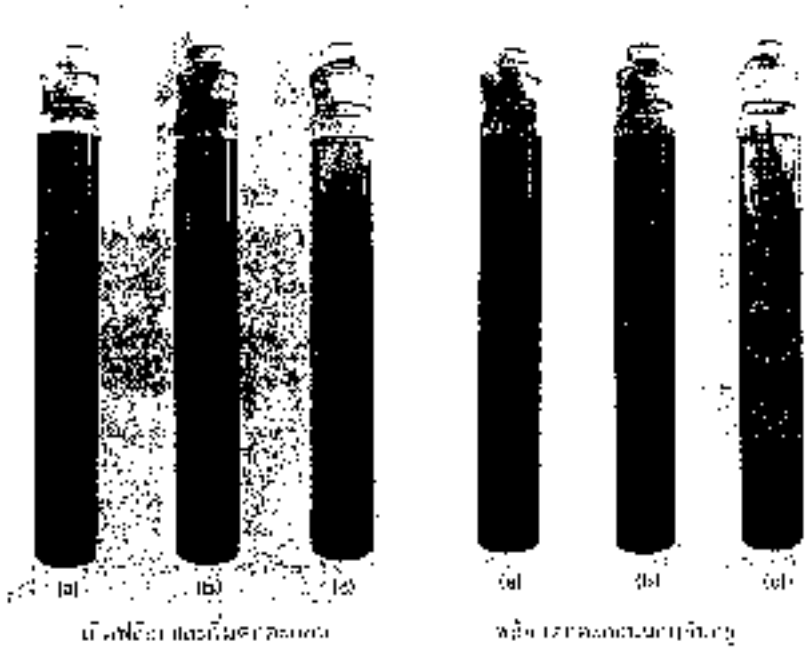
ในกรณีที่ต้องการใช้เครื่อง Jar Test ในการทดสอบ ผู้ทดสอบจะต้องเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ Jar Test



รูปที่ 3.13 ผลของค่า pH และปริมาณอาร์ซีนในการตกตะกอน



รูปที่ 3.14 การทดสอบการตกตะกอนโดยใช้กระบอกตวง

3.1.6 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตัดและรวมตัวในฟลักก

1. ความเป็นกรด - ด่าง เมื่อที่ใช้ในการแต่ละครั้ง ควรใช้ค่าที่เหมาะสมที่สุด pH อยู่ในช่วง 6.5 - 7.5 และที่ pH ต่ำกว่าหรือสูงกว่านี้ จำนวนสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ค่าน้ำที่ใช้ในการตกตะกอนเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการปรับค่าความเป็นกรด - ด่าง ของน้ำดิบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมาก ในการทำน้ำประปา ดังนั้นจุดประสงค์ที่ pH ที่ดีที่สุดสำหรับการตกตะกอน

2. **เกลือแร่ต่าง ๆ** การมีจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณเกลือแร่ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งเกลือแร่ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำนี้ จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำ ดังนี้

(1) เกลือแร่ต่าง ๆ จะช่วยปรับ pH ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

(2) เกลือแร่ต่าง ๆ จะช่วยในการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์

(3) เกลือแร่ต่าง ๆ จะช่วยในการสร้างสารประกอบที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น วิตามิน

(4) เกลือแร่ต่าง ๆ จะช่วยในการสร้างเอนไซม์ต่าง ๆ ของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ชอบที่จะอยู่ในน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง คือ มีค่า pH ประมาณ 7 ซึ่งจะสังเกตได้จากการที่น้ำมีกลิ่นเหม็นน้อย ถ้าน้ำมีสภาพเป็นกรดหรือด่างมาก ๆ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ดังนั้น ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ จึงอยู่ในช่วงประมาณ 6.5 - 8.5 แต่อย่างไรก็ตาม จุลินทรีย์บางชนิดก็สามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีค่า pH ต่ำกว่า 6.5 หรือสูงกว่า 8.5 ก็ได้ เช่น

3. **คุณสมบัติของความร้อน** การที่จุลินทรีย์ในน้ำจะสามารถเจริญเติบโตและทำให้เกิดโรคได้ นอกจากจะต้องมีปริมาณของสารอาหารที่เหมาะสมแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำด้วย ถ้าน้ำมีอุณหภูมิต่ำ จุลินทรีย์ก็จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีอุณหภูมิสูงมาก ๆ จุลินทรีย์ก็จะตายได้ ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ จึงอยู่ในช่วงประมาณ 25 - 35 องศาเซลเซียส

4. **ปริมาณของสารเคมีที่ช่วยฆ่าเชื้อโรค** ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จะต้องมีการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ เช่น คลอรีน ซึ่งเป็นสารเคมีที่นิยมใช้กันมากในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ในการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคในน้ำนั้น จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างคลอรีนกับน้ำ ได้เป็นกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งกรดไฮโปคลอรัสนี้เองที่จะเป็นตัวฆ่าเชื้อโรค ดังนั้น ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยคลอรีนนั้น จะต้องทำให้น้ำมีค่า pH ประมาณ 6.5 - 8.5 เพื่อให้เกิดกรดไฮโปคลอรัสได้มาก ๆ เพราะถ้าน้ำมีค่า pH สูงกว่านี้ จะทำให้เกิดกรดไฮโปคลอรัสได้น้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคลดลง ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีค่า pH ต่ำกว่านี้ จะทำให้เกิดกรดไฮโปคลอรัสได้มาก แต่จะทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริกมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนท่อและอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบประปาได้ง่าย

5. **อุณหภูมิ** เมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ความหนืด (Viscosity) ของน้ำจะลดลง ทำให้การตกตะกอนของสารแขวนลอยต่าง ๆ ในน้ำดีขึ้น และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนก็จะมีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วย นอกจากนี้ ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนก็จะลดลงด้วย ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคดีขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ของสารต่าง ๆ ในน้ำก็จะเกิดได้เร็วขึ้นด้วย

6. **การกวน** เพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเชื้อโรคในน้ำ กับสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีและทั่วถึง ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำนั้น จะต้องมีการกวนน้ำให้ทั่วถึงด้วย ซึ่งการกวนน้ำนี้ จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเชื้อโรคในน้ำกับสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคดีขึ้นด้วย

ในการกวนน้ำเพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเชื้อโรคในน้ำกับสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีและทั่วถึงนั้น จะต้องมีการกวนน้ำอย่างรุนแรงในช่วงเวลาสั้น ๆ ในช่วงแรกที่มีการเติมสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคลงไปในน้ำ ซึ่งเรียกว่า การกวนแบบเร็ว (Rapid Mixing) ส่วนในช่วงต่อมาจะต้องมีการกวนน้ำอย่างช้า ๆ เป็นเวลานาน ๆ เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของตะกอนขนาดเล็กเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเรียกว่า การกวนแบบช้า (Slow Mixing) ทั้งนี้ เพื่อให้ตะกอนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้ สามารถตกตะกอนลงสู่ก้นบ่อได้ง่าย ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนแขวนลอยในน้ำดีขึ้นด้วย

๓. **อัตราการเกิดฟล็อก** ในระหว่างการกวนผสมเพื่อให้เกิดฟล็อก จะมีอนุภาคแขวนลอยที่ถูกทำให้ไม่เสถียรแล้วเกิดการชนกันและรวมตัวกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดฟล็อกคือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอย ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ความหนืดของน้ำ และค่าความเร็วในการกวนผสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Camp and Stein ดังนี้

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

โดยที่ G = Velocity Gradient หน่วย 1/วินาที

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ หน่วย กิโลกรัมแรงวินาทีต่อตารางเมตร

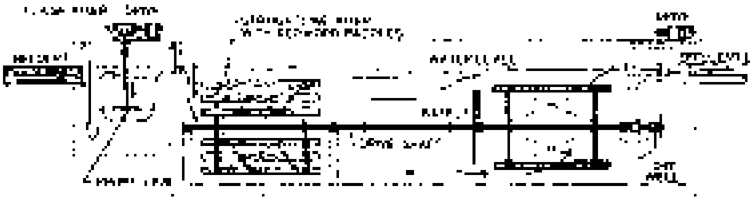
V = ปริมาตรของน้ำที่ถูกกวนผสม ลูกบาศก์เมตร

P = กำลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำ กิโลวัตต์

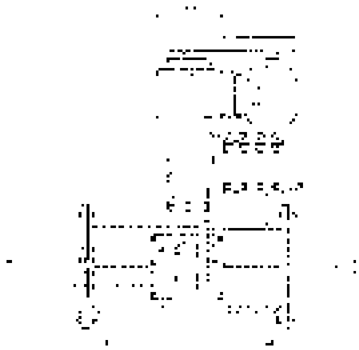
ค่าอัตราการผสมเร็วที่เหมาะสมในขั้นตอนการทำฟล็อกจะขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำที่ต้องการทำให้ใส ตลอดจนขนาดและความหนาแน่นของฟล็อกที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าอัตราการผสมเร็วที่เหมาะสมนี้ ได้มีการศึกษาวิจัยไว้ดังนี้

เวลาการผสมเร็ว	ค่า G
๒๐ วินาที	๑,๐๐๐
๓๐ วินาที	๙๐๐
๔๐ วินาที	๗๐๐
๖๐ วินาที	๖๐๐

๓.๑.๗ การผสมเร็ว (Flash Mix)



รูปที่ [illegible]



รูปที่ [illegible]

5.1.8 การกวนช้า (Flocculation)

ในการรวมตะกอน [illegible] ตะกอนเล็ก ๆ ให้เป็นฟล็อกหรือตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้คือ

1. ลักษณะของตะกอนหรือสารแขวนลอยในน้ำ
2. ปริมาณของสารเคมีที่ใช้
3. ความเร็วของการกวนซึ่งเรียกว่า G

ในถังกวนช้า (Flocculator) จะมีการกวนอย่างช้า ๆ เพื่อให้ตะกอนชนกัน [illegible] และตกตะกอนได้ [illegible] ค่า GCt

G = Velocity Gradient หน่วย วินาที

C = ความเข้มข้นของตะกอน

t = ระยะเวลาการกวน วินาที

[illegible] GCt [illegible] 200 [illegible] (Baffle) [illegible] Velocity Gradient [illegible]

ในการออกแบบ [illegible] Recommended Standards for Water Works, Great Lakes-Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers (GLUMRB) [illegible]

ข้อแนะนำสำหรับถังความเร็ว มีดังนี้

รูปที่ ... ถังความเร็วแบบต่าง ๆ

3. ต้องออกแบบรางน้ำในแนวรัศมีในทางราบ ให้มีความลาดเอียงเข้าหาศูนย์กลาง และมีขนาดพอที่จะรับน้ำได้ ในกรณีที่ออกแบบให้มีการไหลแบบ ...

4. ความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าถังความเร็วนี้ ให้มีค่าน้อยกว่า ... ฟุต/วินาที และไม่ควรน้อยกว่า ... ฟุต/วินาที ในกรณีที่น้ำมีความเร็วมากกว่าที่กำหนดนี้ ต้องมีวิธีการลดความเร็วของน้ำก่อนเข้าถังความเร็ว

5. ในการออกแบบถังความเร็วนี้ ให้คำนึงถึงการกระจายความเร็วรอบขอบ (Peripheral Speed) ของใบพัดด้วย

6. ถังความเร็วต้องมีช่องระบายอากาศ ... ตารางนิ้ว ต่อกำลังม้าที่ได้จากการคำนวณ และต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า ... ตารางนิ้ว

3.1.9 การตกตะกอน (Sedimentation)

ในการออกแบบโครงการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับน้ำ จะต้องคำนึงถึงปัญหาเรื่องตะกอนที่ปนมากับน้ำด้วยเสมอ ทั้งนี้เพราะตะกอนจะทำให้เกิดการสึกกร่อนของเครื่องจักรกลต่าง ๆ ที่ใช้น้ำ และยังทำให้เกิดการตกตะกอนในอ่างเก็บน้ำ ทางน้ำ และคลองส่งน้ำ ทำให้ความจุของอ่างเก็บน้ำลดลง ทางน้ำและคลองส่งน้ำตื้นเขิน ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งน้ำลดลง ...

การตกตะกอนในอ่างเก็บน้ำ (Settling Velocity) ความเร็วตกตะกอน คือ ความเร็วที่ตะกอนตกลงสู่ก้นอ่างเก็บน้ำ ในน้ำที่อยู่นิ่ง ๆ ความเร็วตกตะกอนขึ้นกับขนาดและรูปร่างของตะกอน ความหนาแน่นของตะกอน และความหนืดของน้ำ ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ 3.17

สมการนี้ใช้ได้กับตะกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ... มิลลิเมตร ... ตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่า ... มิลลิเมตร ให้ความเร็วตกตะกอนเป็นไปตามกฎของสโตกส์ (Stokes Law) ...

โดยทั่วไปแล้วจะคำนวณหาความเร็วตกตะกอนโดยใช้กราฟ ซึ่งได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ...

$$V = \frac{\ldots}{\ldots}$$

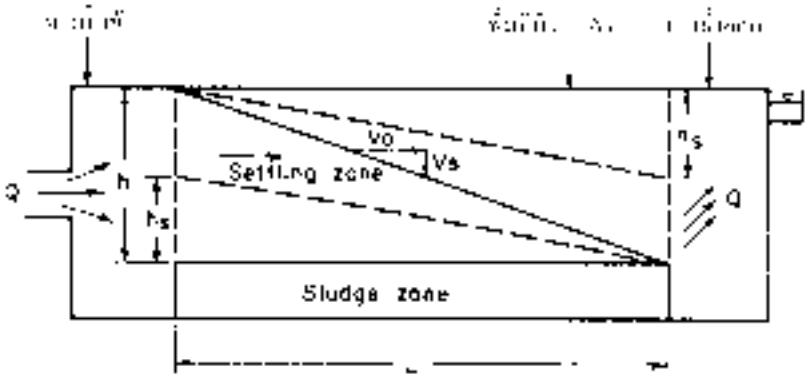
[illegible]

[illegible]

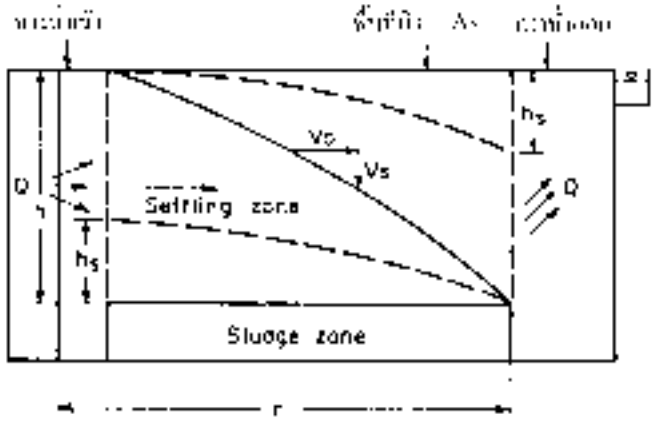
[illegible]

[illegible]

[illegible] Surface Loading [illegible]



[illegible]



[illegible]

$$V_o = Q/A$$

V_o = [illegible]

Q = [illegible]

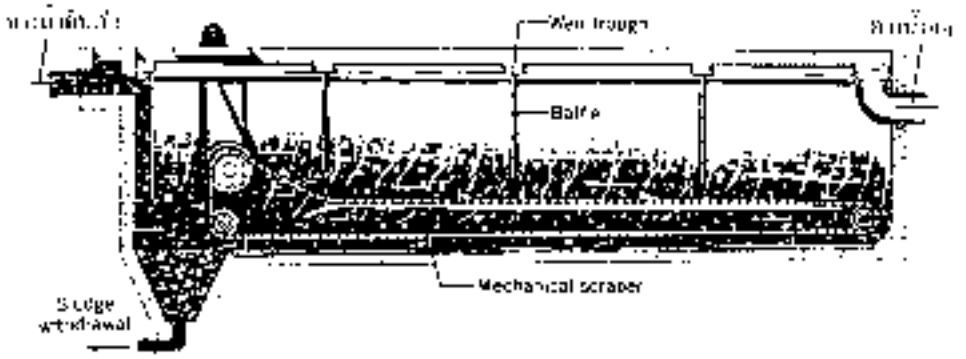
A = [illegible]

[illegible]

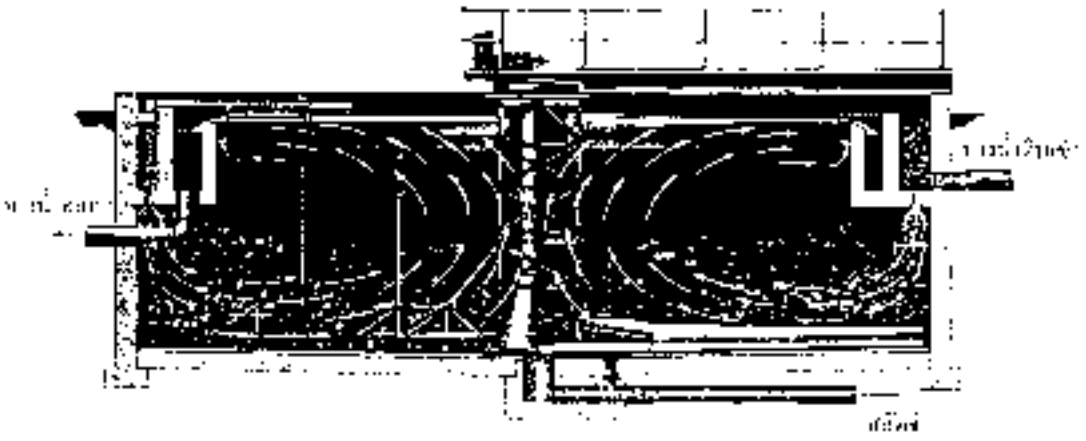
$$v = Q/A$$

v = [illegible]

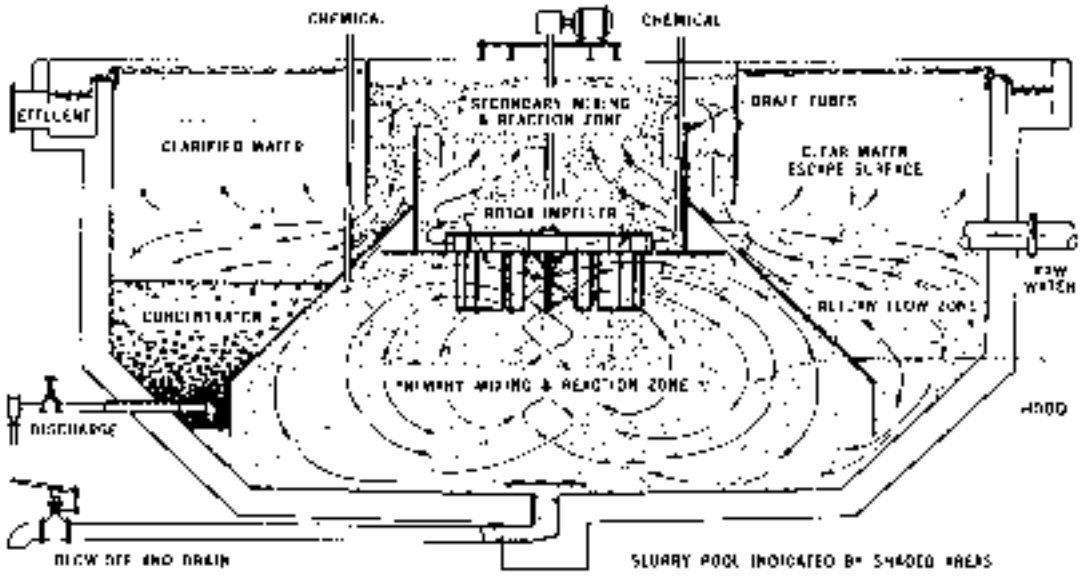
รูปที่ 3.5 ลักษณะการไหลในถังตกตะกอน



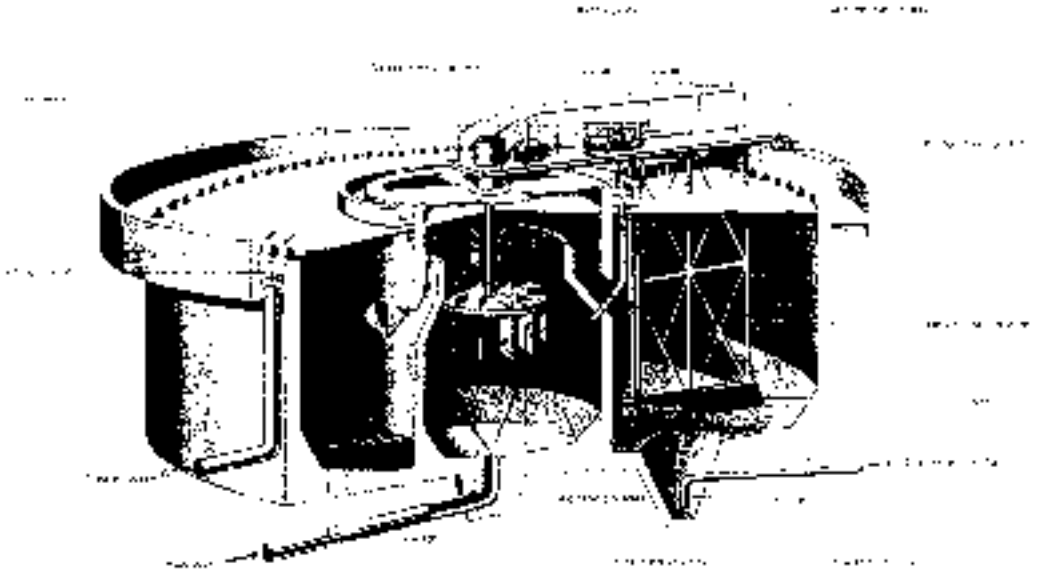
รูปที่ 3.6 (ก) ถังตกตะกอนแบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.6 (ข) ถังตกตะกอนแบบกลม

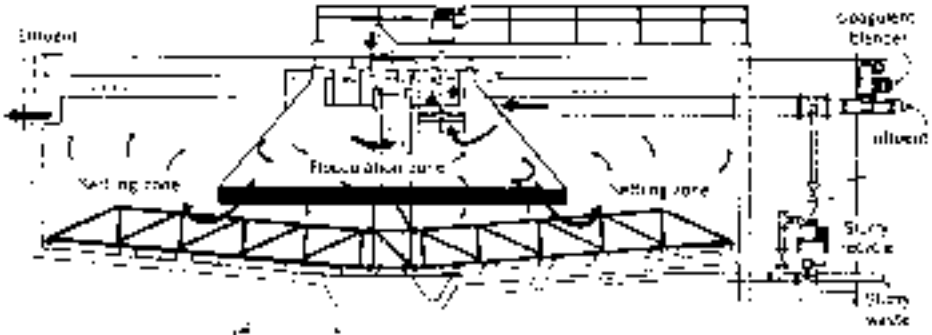


รูปที่ 3.20 ข้อความภาษาอังกฤษ (ตัวอย่าง)



รูปที่ 3.21 ข้อความภาษาอังกฤษ (ตัวอย่าง)

ในรูปที่ 3.20 และ 3.21 นี้ แสดงถึงการสัมผัสของอนุภาคแข็ง (Solids Contact) ซึ่งจะเกิดขึ้นในถังผสม ถังปฏิกิริยา และถังตกตะกอน ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น ในถังตกตะกอนแบบ Upflow ที่มีการผสมน้ำดิบและน้ำยาเคมีในถังปฏิกิริยาก่อนที่จะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอน ทำให้เกิดการสัมผัสของอนุภาคแข็งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้น

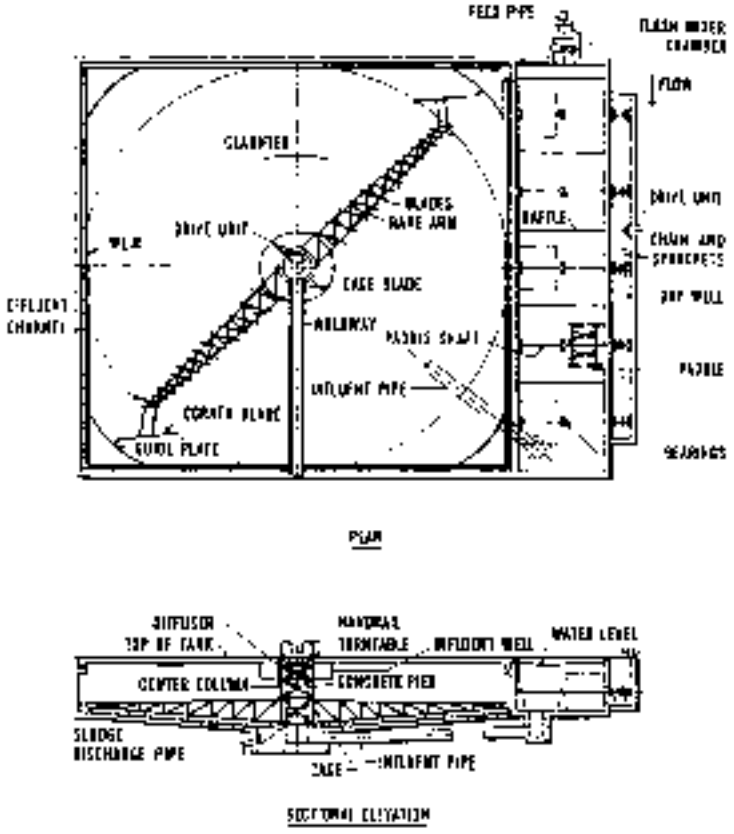


รูปที่ 3.32 ตัวอย่างของเครื่องแบบ Flocculator Clarifier

3.1.10 ปัจจัยในการออกแบบถังตกตะกอน

สามารถสรุป GLUMRB ได้ข้อแนะนำในการออกแบบถังตกตะกอนดังนี้

1. มีการกระจายน้ำเข้าให้สม่ำเสมอ
2. ความเร็วที่น้ำไหลผ่านช่องเข้าและออก ต้องอยู่ในช่วง
3. Weir Loading ในถังตกตะกอนขั้นต้นที่ตามด้วยถังเติมอากาศ ต้องไม่เกิน
4. ปริมาณน้ำไหลล้นขอบ ต้องไม่เกิน



รูปที่ 3.33 ตัวอย่างถังตกตะกอนแบบ Dorr-Oliver

ตัวอย่างการคำนวณ

ตามรูปที่ ๑๒ ตลาดน้ำแห่งหนึ่ง [illegible] ต้องการทราบว่าในแต่ละวันมีคนมาเดินตลาดกี่คน เพื่อที่จะได้ทราบว่าในแต่ละวันจะมีรายได้จากค่าเช่าที่ [illegible] ตลาดน้ำแห่งนี้มีทั้งหมด ๑๐๐ ร้านค้า ๑๐ ร้านมีโรงเก็บน้ำมัน ๑ ถัง ส่วนที่เหลือเป็นร้านค้าที่ขายของกินเล่น ๑๒ ถัง และร้านน้ำมันขาย ๑๐๐ ถัง ให้ทราบว่าเมื่อคำนวณออกมาแล้ว ๑ ถังจะมีน้ำมันกี่ลิตร เพื่อจะได้ [illegible]

วิธีทำ

ให้ [illegible] = [illegible] ถังมาตรฐานต่อวัน

= ๑๒๐ ถังมาตรฐานต่อวัน

ดังนั้น จำนวนคนที่เดินตลาดน้ำต่อวัน

$$= \frac{\text{[illegible]}}{\text{[illegible]}} \times \frac{\text{วันต่อปี}}{\text{ปี}} = \text{[illegible]}$$

ขั้นตอนที่ ๒ หาปริมาณน้ำมันที่ GLU MRB ใช้

หาจากปริมาณน้ำมันที่ [illegible] ในแต่ละวันที่ขาย

$$= \frac{\text{๑๐ ถัง} \times \text{๒๐ ลิตร} + \text{๑ ถัง}}{\text{๑๒๐ ถังมาตรฐานต่อวัน}} = \text{[illegible]}$$

ดังนั้น GLU MRB ใช้น้ำมันเฉลี่ย ๑ ลิตรต่อคน

ขั้นตอนที่ ๓ หาปริมาณน้ำมันที่ GLU MRB ใช้ต่อปี

$$= \frac{Q}{V} = \frac{\text{[illegible]}}{\text{๑๐ ลิตร} \times \text{๑ ลิตร}} = \text{[illegible]}$$

ดังนั้นในหนึ่งปี GLU MRB ใช้น้ำมันประมาณ ๑๐ ถังมาตรฐาน

หาจำนวนถังน้ำมันที่ GLU MRB ต้องการในแต่ละปีที่ใช้ในการขนส่งครั้งละ

$$= \frac{\text{๑๐ ถัง} \times \text{๑ ลิตร} \times \text{๑๐ ลิตร}}{\text{๑๒๐ ถังมาตรฐานต่อวัน}} \times \frac{\text{๑ ปีมีกี่วัน}}{\text{๑๐ ครั้ง}} = \text{๑ ถังมาตรฐาน}$$

ดังนั้น GLU MRB ต้องการใช้น้ำมันในการขนส่งครั้งละ ๑ ถังมาตรฐาน

$$\text{ต้นทุนน้ำมัน} = \frac{\text{[illegible]}}{\text{๑๐๐ ลิตร}}$$

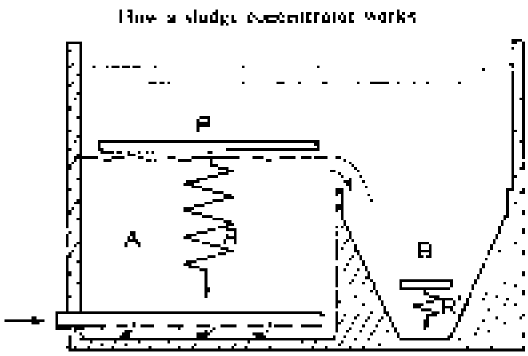
[illegible]

ดังนั้นต้นทุนที่ GLU MRB ต้องเสียไปในการขนส่งครั้งละ [illegible]

[illegible]

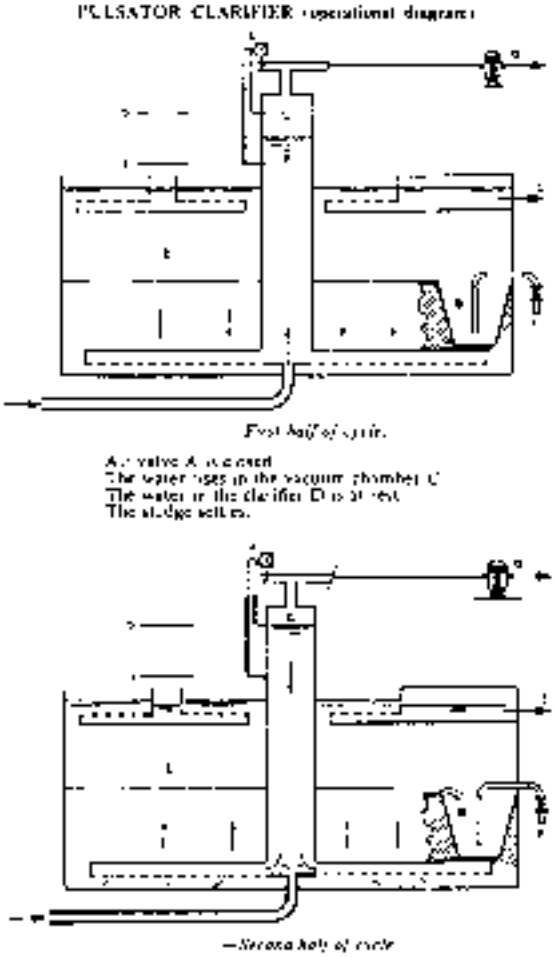
3.1.11 Sludge Blanket Clarifier [illegible]

[illegible]

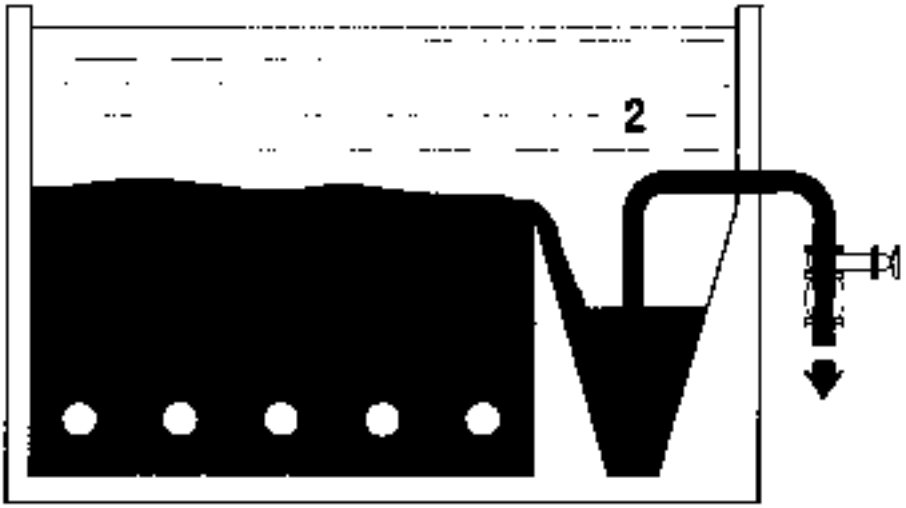


รูปที่ 3.34 [illegible]

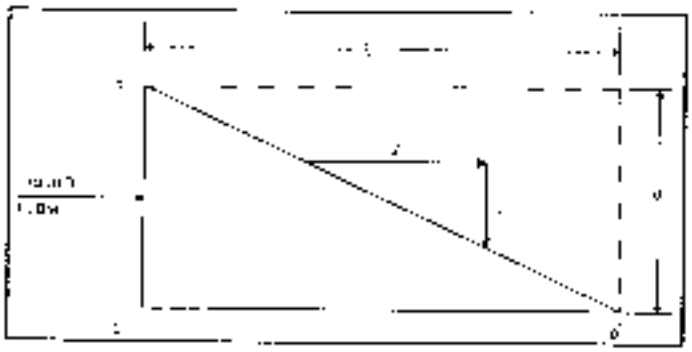
[illegible]



รูปที่ 3.25 หลักการทำงานของ Pulsation Sludge Blanket Clarifier



รูปที่ 3.26 การทำงานของชั้นปกคลุมตะกอนในการกรองน้ำ 1. Sludge Blanket 2. Sludge Concentrator



รูปที่ 3.23 แสดงการตกตะกอนของอนุภาคในบ่อตกตะกอน

V_s = [illegible]

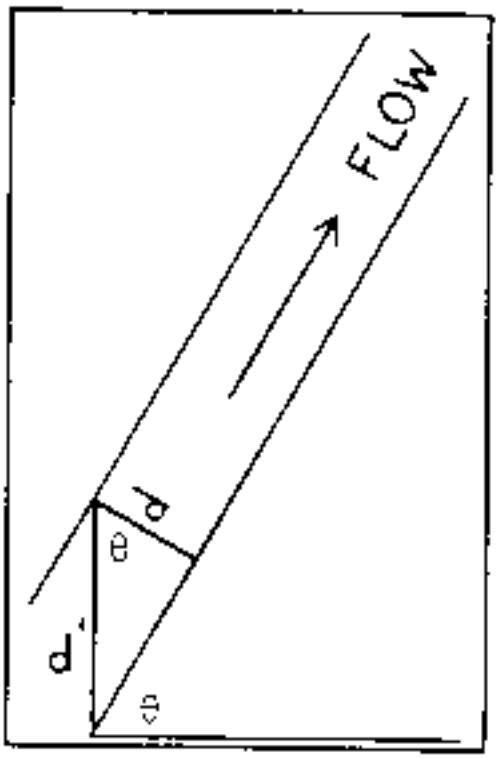
[illegible] = [illegible]

[illegible] = [illegible]

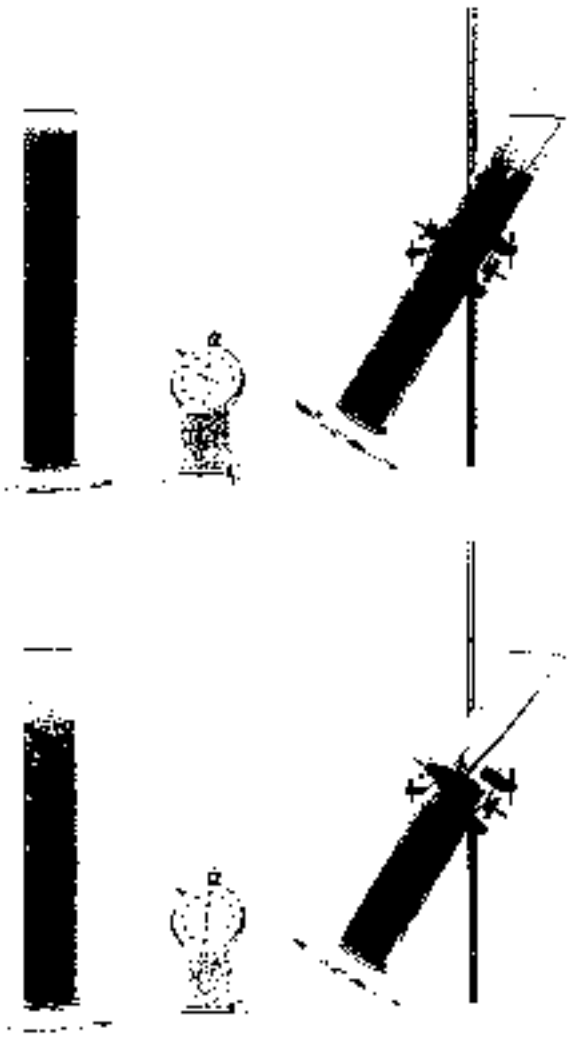
[illegible] = [illegible]

[illegible] V_s [illegible] $\frac{Q}{A}$ [illegible]

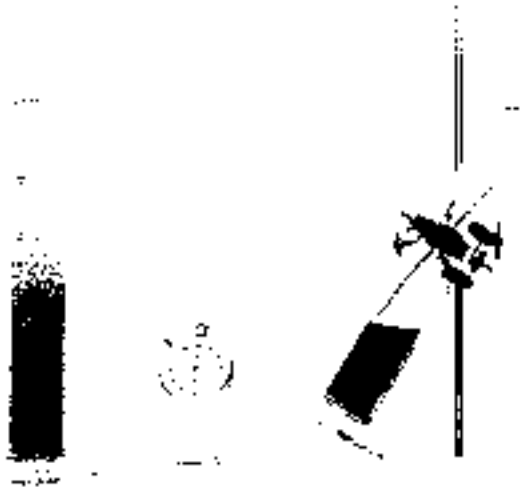
$$V_{max} = \frac{L}{d} \times V$$

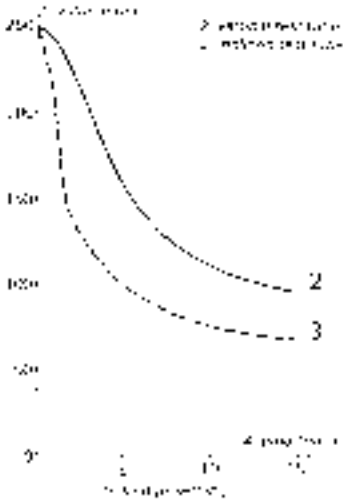


รูปที่ 3.24 แสดงระยะทางที่อนุภาคตกตะกอนในแนวเฉียง

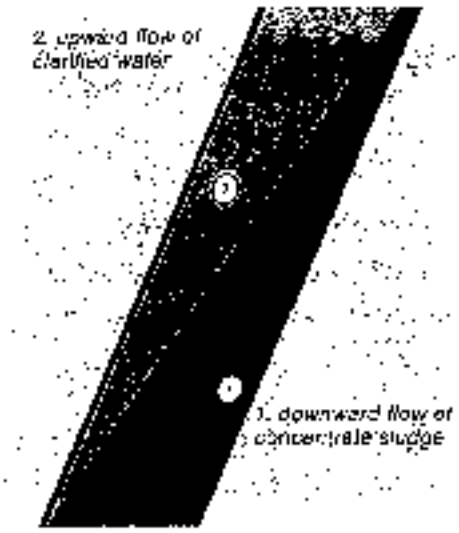


รูปที่ 3.21 แสดงการทดลองหาอัตราเร็วเสียง

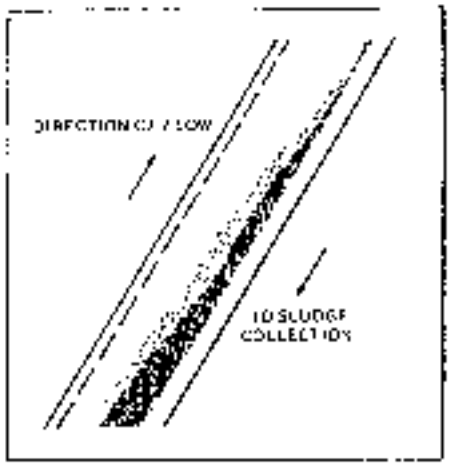




รูปที่ ๖.๑๐ กราฟแสดงอัตราการลดลงของน้ำในบ่อดินและบ่อซีเมนต์

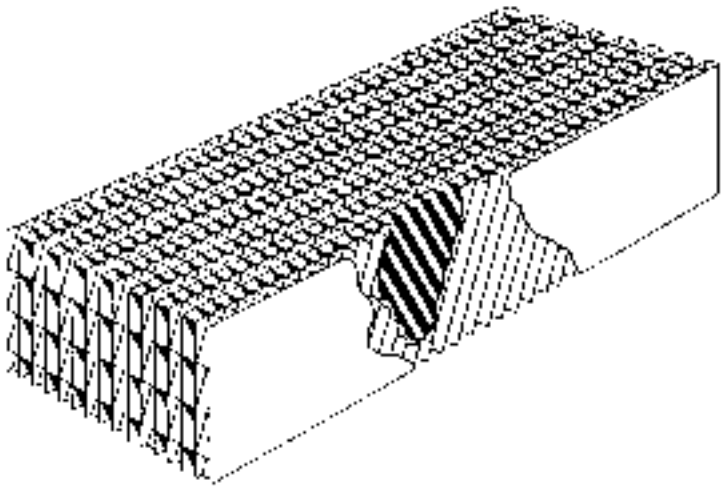


รูปที่ 3.31 การเคลื่อนที่ของน้ำใสขึ้นและตะกอนลงในท่อเอียง



รูปที่ 3.32 การไหลของตะกอนในท่อเอียง

ท่อเอียงที่ใช้งานกันทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกลูกฟูกที่ตั้งเอียงทำมุมประมาณ 60 องศา กับแนวระดับ ดังรูปที่ 3.33 ซึ่งมีรูปแบบการไหลที่เรียกว่า แผ่นเรียบ (Laminar) ซึ่งมีค่าเรย์โนลด์น้อยกว่า 2000 ทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้น



รูปที่ 3.33 รูปทรงของแผ่นเอียง

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของถังตกตะกอนขึ้นกับปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ไหลผ่านถังนั้นๆ ซึ่งปริมาณของแข็งแขวนลอยนี้ขึ้นกับคุณลักษณะของตะกอนที่ไหลเข้าถังตกตะกอน ซึ่งได้แก่ ขนาด รูปร่าง และความถ่วงจำเพาะของตะกอนนั่นเอง ในกรณีที่ตะกอนมีขนาดใหญ่ รูปร่างกลมเรียบ และมีความถ่วงจำเพาะสูง ตะกอนจะตกลงสู่ก้นถังได้เร็ว ทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าตะกอนมีขนาดเล็ก รูปร่างไม่กลมเรียบ และมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ตะกอนจะตกลงสู่ก้นถังได้ช้า ทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนต่ำลง ตะกอนที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะไม่สามารถตกลงสู่ก้นถังได้เลย ตะกอนเหล่านี้จะถูกเรียกว่า คอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่ตะกอนมีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันอยู่ที่ผิว ทำให้เกิดแรงผลักกันระหว่างตะกอนด้วยกัน ทำให้ตะกอนไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเคมีลงไปในน้ำ เพื่อทำให้ประจุไฟฟ้าที่ผิวตะกอนเป็นกลาง ซึ่งเรียกว่า การทำให้เสถียร (Destabilization) ทำให้ตะกอนรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเรียกว่า การทำให้เกิดตะกอน (Flocculation) ซึ่งทำให้ตะกอนตกลงสู่ก้นถังได้เร็วขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้น ดังรูปที่ 3.34 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการ

[illegible]

[illegible]

[illegible]

$$Re = \frac{DVp}{\mu}$$

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

V = ความเร็วในการไหล

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

μ = ความหนืดของของไหล

Re = Reynold Number ไม่มีหน่วย

[illegible]

การไหลแบบราบเรียบ Re [illegible]

การไหลแบบปั่นป่วน Re [illegible]

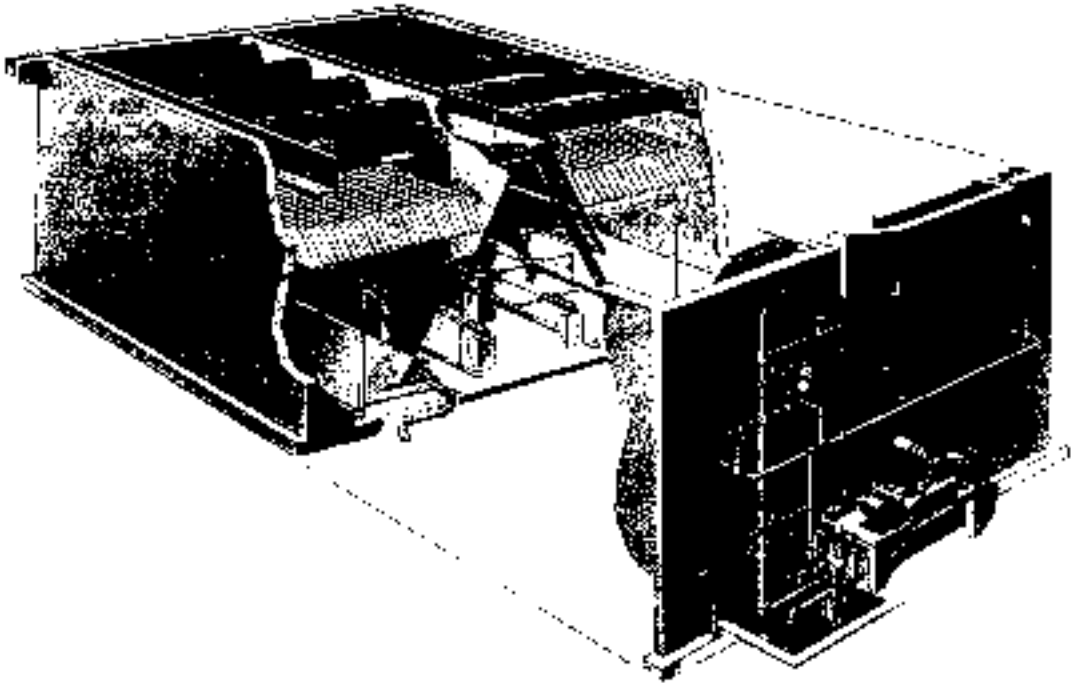
[illegible]

เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent Diameter) คำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

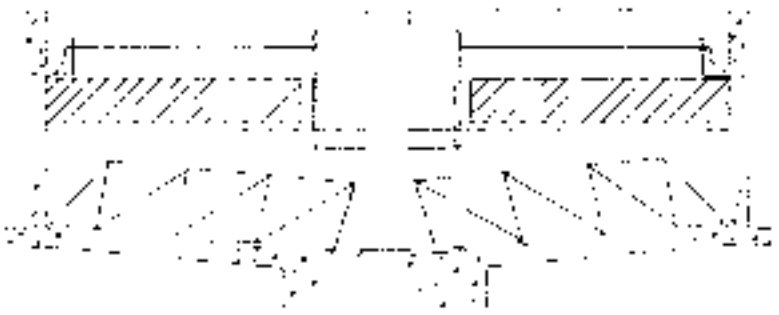
เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (D) = $\frac{4 \times \text{พื้นที่หน้าตัดของไหล}}{\text{เส้นรอบรูป}}$

ตารางที่ [illegible] คุณสมบัติของเซลล์ที่มีรูปทรงต่าง ๆ

รูปทรง	พื้นที่หน้าตัด (ตารางนิ้ว)	เส้นรอบรูป (นิ้ว)	เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (นิ้ว)
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]



รูปที่ 3.14 การติดตั้งแผงกรองในช่องกรองอากาศ



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างแสดงวิธีการติดตั้งแผงกรองแบบต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน

ตัวอย่าง ...

$$\text{...} = \frac{\text{...}}{\text{...}}$$

$$= \frac{\text{...}}{\text{...}} \qquad \text{...}$$

...

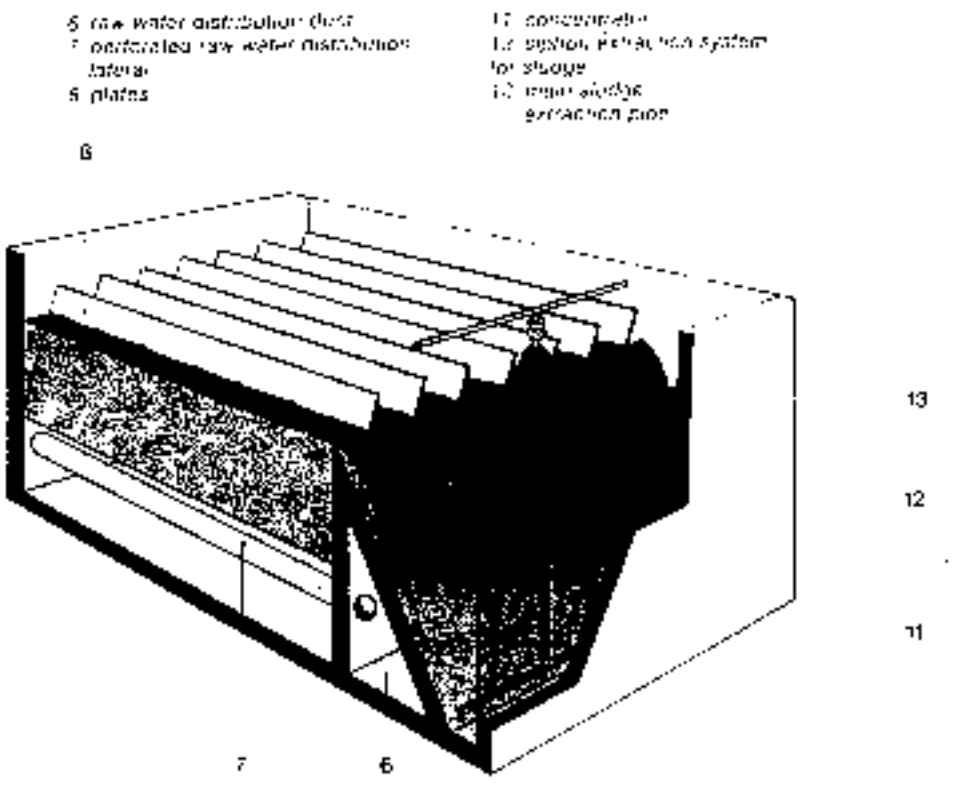
- ... =
- μ = ...

$$\text{Re} = \frac{\text{...}}{\mu}$$

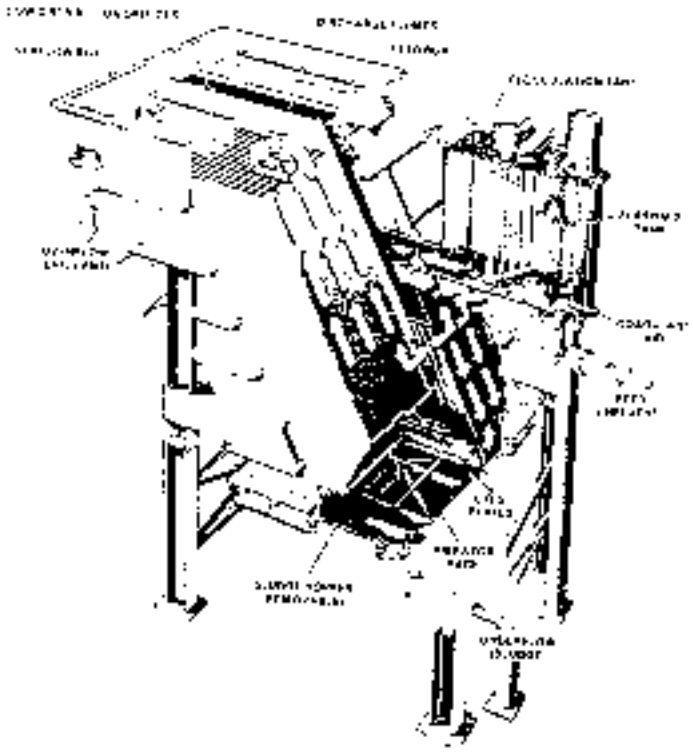
$$\text{...} = \frac{\text{...}}{\text{...}} \qquad \text{...}$$

...

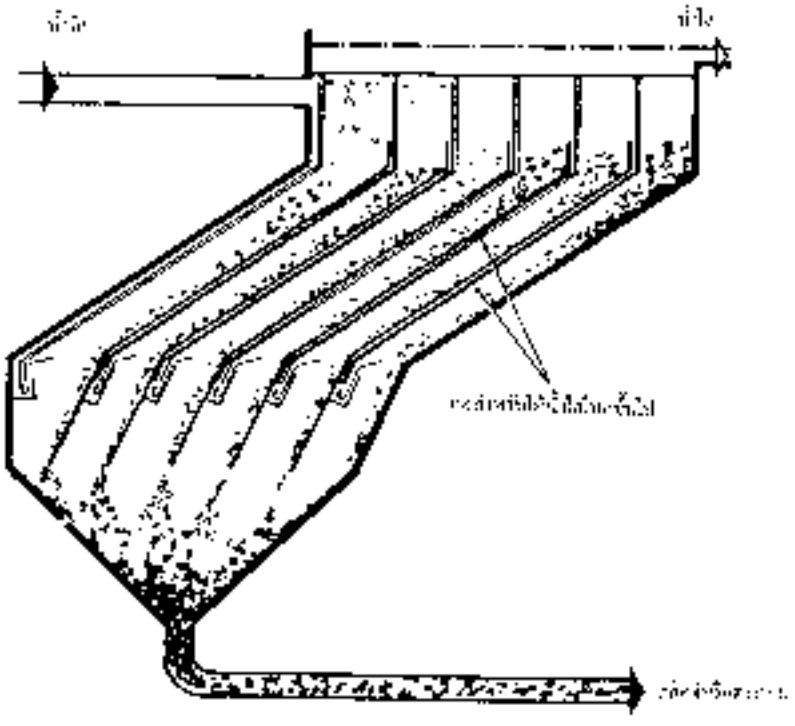
$$\text{Re} = \frac{\text{...}}{\text{...}} \qquad \text{...}$$



รูปที่ 3.31 ถังตกตะกอน Pulsation Sludge Blanket Clarifier ที่มีแผงเอียงติดตั้งอยู่



รูปที่ 3.37 Lamella Gravity Settlers



รูปที่ 3.38 Lamella Separator

บรรณานุกรม

1. กฤษฎา กาญจนสุนทร, สมชาย. "การออกแบบ ในถังตกตะกอน." วารสารสิ่งแวดล้อม ประปาแห่งประเทศไทย 7 (ตุลาคม-ธันวาคม 2522).
2. Al-Layla, M.A., Ahmad, S. and Middlebrooks, E.J. **Water Supply Engineering Design.** Michigan : Ann Arbor Science Publishers, 1978.
3. AWWA. **Water Quality and Treatment.** New York : McGraw Hill, 1971.
4. Chen, Y.R., Thanh, N.C. and Lohani, B.N. "Design Criteria for Inclined Tube Settlers." Thesis No. EV-79-20, AIT, 1979.
5. Cruz-Paz, L.F., Muttamara, S. and Polprasert, C. "Influence of Particle Size on Coagulation." Thesis No. EV-79-21, Asian Institute of Technology, 1979.
6. **Degremont Technical Bulletin-The Pulsator.**
7. **Degremont Technical Bulletin-The Superpulsator.**
8. Degremont. **Water Treatment Handbook.** 1968 and 1973 edition. Degremont S.A.
9. Hammer, M.J. **Water and Waste-Water Technology.** New York : John Wiley & Sons, 1975.
10. Hudson, Jr., H.E. **Water Clarification Processes Practical Design and Evaluation.** New York : Van Nostrand Reinhold Co., 1980.
11. Keys, R.O. and Hogg, R. **Mixing Problems in Polymer Flocculation.** AIChE Symposium Series Vol. 75, 1979.
12. Kurita. **Water Treatment Handbook.** Kurita Water Industries.
13. Lowe, C.P. "Clarification." **Effluent and Water Treatment Journal.** (April 1979).
14. **Permutit Technical Bulletin.** Vol. 8, No. 2, Oct. 1961.
15. **Permutit Technical Training Seminar Manual.** The Permutit Co.
16. Proceedings. **AWWA Seminar on Polyelectrolytes Aids to better Water Quality.** Chicago, Illinois, (June 4, 1972).
17. **Process Design Manual for Suspended Solid Removal.** U.S. Environmental Protection Agency, (January 1979).
18. Rajagopalan, R. and Karis, T.E. **Effect of Electrokinetics on the Removal of Colloidal Particles from Liquid.** AIChE Symposium Series, Vol. 75, 1979.
19. **Technical Information.** Sanyo Chemical Industries.

20. Thipsuwan, C. "Application of Inclined Plate on the Separation of Oil and Water" Thesis No. ENG-, AIT, 1978.

21. Tiranon, A.D. "The Removal of Suspended Solids and Colour in Sodye Rocket Clarifiers" **Effluent and Water Treatment Journal**, (April 1978).

22. Vasutadilok na P., Thanh, N.C. and Polprasert, C. "Use of Inclined Tube Settlers in Water Treatment systems" Thesis No. ENG, AIT, 1978.

23. Walker, R. **Water Supply-Treatment and Distribution**, New Jersey: Prentice Hall, 1978.

24. **Water and Waste Treatment Data Book**, The Permutit Co. 1961.

25. Yamamoto, M. **Principle of Boiler Water Treatment-External Treatment**, Kenryu Publishing Co.

3.2 การกรอง (Filtration)

การกรอง เป็นกระบวนการแยกของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) ออกจากน้ำ โดยการผ่านน้ำลงบนตัวกลางที่มีรูพรุน (Porous Medium) ซึ่งตัวกลางที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ทราย ซึ่งจะมีขนาดสม่ำเสมอ (Uniform Size) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

ตารางที่ 3.2 ขนาดของตัวกลางที่กรองได้

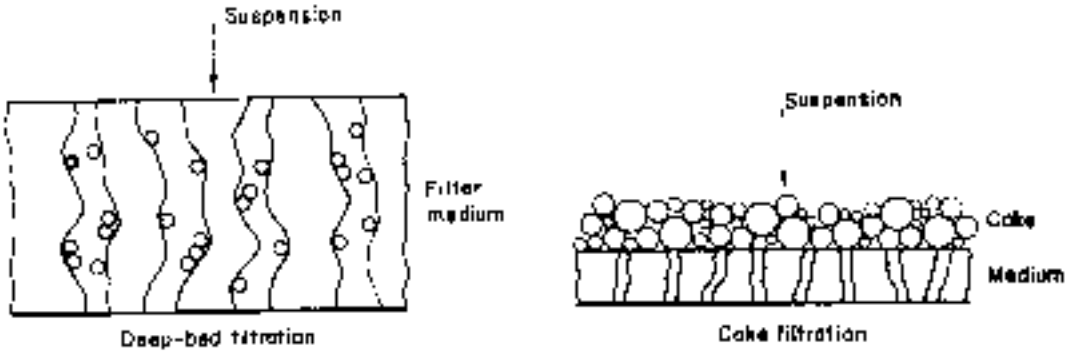
	ขนาด (มิลลิไมครอน)
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
โปรโตซัว	[illegible]
[illegible]	[illegible]

3.2.1 กลไกของการกรอง

การกรอง เกี่ยวข้องกับกลไกทางกายภาพ (Physical) เคมี (Chemical) และชีวภาพ (Biological) ที่เรียกว่า Particle Destabilization และ Particle Transport ซึ่งเป็นกลไกที่เกี่ยวข้องกับการจับตัวกัน (Coagulation)

การกรองแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Deep Bed Filtration
2. Cake Filtration



รูปที่ 3.39 กลไกการกรองแบบ Deep-Bed และแบบ Cake

ในการกรองแบบ Deep Bed นั้นจะมีการสะสมตัวของสิ่งสกปรกอยู่ภายในชั้นกรองเป็นจำนวนมาก ในขณะที่การกรองแบบ Cake จะมีการสะสมตัวของสิ่งสกปรกอยู่ที่ผิวหน้าของตัวกลางกรองเป็นส่วนใหญ่

ที่สัมผัสกับเม็ดกรองมาก จึงทำให้น้ำไหลผ่านได้ยาก เกิดการสูญเสียความดัน (Head Loss) สูง ซึ่งที่ประสิทธิภาพในการกรอง เมื่อการสูญเสียความดันสูงขึ้นจนถึงจุดที่กำหนดไว้ จะต้องทำการล้างย้อนกลับ (Back Washing) เพื่อนำเอาสิ่งสกปรกที่ติดค้างออก

ขั้นตอนการกรองน้ำหยาบด้วยกรองช้า มีขั้นตอนดังนี้

1. ดักตะกอนและสิ่งสกปรกต่าง ๆ ไม่ให้ผ่านเข้าไปในชั้นทรายกรองได้

2. โดยการที่จุลินทรีย์และตะกอนต่าง ๆ ไปสะสมตามช่องว่างของทรายกรอง หรือเกาะติดอยู่ที่ผิวของเม็ดทรายที่ลูกน้ำไหลผ่าน ในเมื่อมีปริมาณจุลินทรีย์และตะกอนที่ถูกดักไว้มากขึ้นเรื่อย ๆ ประสิทธิภาพในการกรองก็จะดีขึ้นไปด้วย

3. ตะกอนและสิ่งสกปรกที่ถูกดักไว้ - ไว้โดยวิธีการดูดซับ (Absorption) การใช้งานร่วมกับสารส้ม (Filter Aid) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับให้ดีขึ้นอีกด้วย ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้กับจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในชั้นทรายกรองช้าได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการดูดซับอีกประเภทหนึ่งที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่ถูกดูดซับ (Effect Adhesive Force) กับแรงเฉือนของน้ำ (Shearing Strength) ของฟล็อก นอกจากนี้ยังขึ้นกับคุณสมบัติของอนุภาคและสารละลาย คุณสมบัติของไฟฟ้าที่สำคัญคือค่าซีตา (Zeta Potential) หรือ Electrochemical Force

3.2.2 การเตรียมน้ำที่จะเข้ากรอง

ก่อนน้ำที่จะกรองให้ได้ผลดีจะต้องผ่านการจับตัว การรวมตัว และการตกตะกอน เพื่อให้น้ำใสสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 5 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) คุณสมบัติของน้ำที่จะเข้าเครื่องกรองขึ้นกับปัจจัยนี้

1. ความขุ่นของน้ำ (Turbidity)

2. ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย

ในกรณีที่ความขุ่นของน้ำต่ำ และความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยต่ำ อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะไม่สัมผัสกันเกิดฟล็อกได้ เครื่องกรองจึงสามารถดักอนุภาคเล็กนี้ได้ แต่ในกรณีจะมีการรวมตัวกันแต่ฟล็อกเล็กนี้มีสภาพต่อแรงดูดต่ำ ไม่สามารถต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องได้ ดังนั้นน้ำดิบจำเป็นจะต้องมีความขุ่นหรือความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยที่เหมาะสม ถึงแม้ว่าความขุ่นและความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยจะมีค่าต่ำ ๆ ระบบก็สามารถดูดซับได้ดีกว่าน้ำที่มีความขุ่นสูง

3.2.3 คุณลักษณะของฟล็อกที่มีผลต่อคุณภาพการกรอง

ความแข็งแรงของฟล็อก	สภาพการกรอง
ต่ำมาก	ความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองจะเพิ่มขึ้นทันทีที่เริ่มกรอง ความดันสูญเสีย (Head Loss) น้อยมาก ฟล็อกแตกง่าย
ต่ำ	ความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองจะเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มกรอง ความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ฟล็อกแตกง่าย
ปานกลาง	ความขุ่นของน้ำผ่านการกรองจะไม่เพิ่มขึ้นทันที และมีการสูญเสียความดันเพิ่มขึ้นในอัตราปกติ
สูง	ฟล็อกจะถูกดักเข้าไปในเนื้อทรายเป็นส่วนใหญ่

เพราะฉะนั้น ถ้าน้ำดิบมีความขุ่นมากกว่าค่านี้ ก็จำเป็นต้องมีการลดความขุ่นก่อน จึงจะนำเข้าสู่ระบบกรองได้ เพื่อที่จะได้ไม่เกิดการอุดตันของสารแขวนลอยในชั้นกรองเร็วเกินไป ซึ่งจะทำให้ต้องล้างบ่อกรองบ่อยครั้งขึ้น

3.2.4 มาตรฐานความขุ่นของน้ำก่อนเข้าเครื่องกรอง

สำหรับ Rapid Sand Filter น้ำที่จะเข้าเครื่องได้นั้นจะต้องมีค่าความขุ่นไม่เกิน 10 JTU และสำหรับเครื่องกรองที่ใช้วัสดุกรองแบบ (Mixed-Media) จะกรองน้ำที่มีความขุ่นได้ถึง 50 JTU ในบางครั้งที่มีฝนตกหนัก ความขุ่นของน้ำดิบจะสูงขึ้นมาก บางครั้งอาจสูงถึง 200 JTU ก็มีเหมือนกัน ในกรณีนี้ต้องลดความขุ่นของน้ำให้ได้ตามที่ต้องการก่อน จึงจะนำเข้าเครื่องกรองได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความขุ่นของน้ำดิบจะอยู่ในช่วง 20 ถึง 100 JTU และ 100-200 JTU ก็มีบ้างเหมือนกัน

3.2.5 หลักการกรอง

น้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้วจะมีความขุ่นประมาณ 1 ถึง 10 JTU ซึ่งจะถูกนำเข้าสู่เครื่องกรอง (ฟิลเตอร์) ซึ่งจะทำหน้าที่กรองตะกอนที่เหลือออกไป ในการกรองนั้นจะมีกลไกหลายอย่างเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ซึ่งกลไกเหล่านี้จะทำงานร่วมกันไปในช่วงต่างๆ ของการกรองในระดับที่แตกต่างกัน เมื่อตะกอนและสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่ในน้ำสารกรองถูกกรองออกไป ตัวสารกรองก็จะอุดตันมากขึ้นๆ ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองลดลง ดังนั้นเมื่อถึงเวลาหนึ่งก็จำเป็นต้องล้างสารกรองเพื่อให้กลับมามีประสิทธิภาพในการกรองดีดังเดิม ในการล้างสารกรองนั้นจะใช้น้ำล้างไหลย้อนขึ้นไปในชั้นกรองด้วยอัตราการไหลที่สูงพอที่จะทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวขึ้นประมาณ 10-20 % ของความหนาเดิม ทั้งนี้เพื่อให้เม็ดสารกรองแต่ละเม็ดมีโอกาสได้ถูกล้างอย่างทั่วถึง ในขณะเดียวกันก็ต้องไม่ทำให้สารกรองหลุดออกไปกับน้ำล้างด้วย ซึ่งจะเป็นต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำล้างให้เหมาะสม ในการล้างสารกรองนั้นจะใช้น้ำล้างประมาณ 2-4 % ของน้ำที่ผ่านการกรองมาแล้ว ในขณะล้างสารกรองจะทำหน้าที่เป็นถังกรองสำหรับกรองน้ำล้างไปในตัวด้วย จึงจำเป็นต้องมีการเก็บน้ำล้างช่วงแรกๆ ที่มีความสกปรกสูงทิ้งไป เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้างที่สกปรกมากๆ ไหลกลับเข้าไปในถังน้ำใสได้ ในการล้างสารกรองนั้นจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำไปในกระบวนการนี้ประมาณ 2-4 % ของน้ำที่ผ่านการกรองมาแล้ว ดังนั้นจึงควรออกแบบให้มีการนำน้ำล้างกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วย เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียน้ำไปในกระบวนการนี้ (Head Loss) ซึ่งจำเป็นต้องมีการใช้น้ำในการกรองน้ำมากขึ้นด้วย

3.2.6 สารกรอง (Filter Media)

สารกรองที่มีคุณสมบัติในการกรองที่ดี ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ต้องไม่ให้อนุภาคหรือสิ่งสกปรกแขวนลอย (Suspended Matter) ในน้ำผ่านสารกรองไปได้
2. ต้องสามารถกักเก็บอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็กๆ ไว้ในช่องว่างระหว่างเม็ดได้ง่ายในการล้างน้ำ
3. สารกรองนี้จะต้องมีความแข็งแรงทนทาน ไม่ละลายหรือสลายตัวได้ง่ายในน้ำ

การพิจารณาขนาดและคุณภาพของสารกรองนั้นขึ้นกับคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. Effective Size (E.S.) หรือขนาดที่ต้องการ
2. Uniformity Coefficient (U.C.) หรือค่าประสิทธิภาพของการกรอง

ทั้งสองค่านี้จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องกรองน้ำ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

Effective Size คือ ขนาดของสารกรองที่มีการร่อนผ่าน 10 โดยน้ำหนักของสารกรองมีขนาดเล็กกว่าขนาดที่กำหนด เมื่อเวียนเทียบกับปริมาณสารกรองทั้งหมด และสารกรองอีกร้อยละ 90 โดยน้ำหนักจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่กำหนด ตามมาตรฐาน U.S. มีค่าขนาดต่ำสุดของมิลลิเมตรที่ผ่านได้ (Particle Size Variation) ส่วน **Uniformity Coefficient** คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดที่ผ่านได้ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของสารกรองมีขนาดเล็กกว่าขนาดที่กำหนด และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่กำหนด

ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์สารกรองชนิดหนึ่งพบว่า มีร้อยละ 10 ของสารกรองมีขนาดเล็กกว่า 0.40 มิลลิเมตร และร้อยละ 60 มีขนาดเล็กกว่า 0.64 มิลลิเมตร

$$\text{ตัวนั้น Effective Size} = 0.40 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{Uniformity Coefficient} = \frac{0.64}{0.40} = 1.6$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอมากกว่า 1.7 ขึ้นไป แสดงว่า ขนาดของเม็ดสารกรองทั้งหมดมีขนาดใกล้เคียงกันมาก โดยที่ U.C. จะมีค่าใกล้เคียง 1.0 ค่า E.S. และ U.C. ของสารกรองที่ใช้งานการพิจารณาตามมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุขสหรัฐอเมริกา สำหรับเครื่องกรองแบบเร็ว (Quick Filter) ใช้ทรายซิลิกาที่มี E.S. 0.45-0.55 มิลลิเมตร และ U.C. ไม่เกินกว่า 1.75 สำหรับเครื่องกรองแบบ Pressure Filter ใช้ถ่านแอนทราไซท์ มี E.S. 0.50 - 0.60 และ U.C. ไม่เกิน 1.7

3.2.7 ชนิดของสารกรอง

สารกรองที่นิยมใช้กันมากมี 4 ชนิดคือ

1. **ทรายละเอียด (Fine Sand)**
   - E.S. = 0.45-0.55 มิลลิเมตร
   - U.C. = 1.5 (Max.)
2. **ถ่านแอนทราไซท์ (Anthracite)**
   - E.S. = 0.65 - 0.75 มิลลิเมตร
   - U.C. = 1.85
3. **หินปูน (Calcite of Calcium Carbonate)**
   - E.S. = 0.35-0.65 มิลลิเมตร เฉลี่ย 0.45 มิลลิเมตร
   - U.C. = น้อยกว่า 2 ปกติ 1.4
4. **ถ่านดูดซึม (Activated Carbon)**
   - E.S. = 0.05 - 0.50 มิลลิเมตร เฉลี่ย 0.45 มิลลิเมตร
   - U.C = น้อยกว่า 2 ปกติ 1.5

ตารางที่ ๔.๓ คุณสมบัติของสารกรองชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	รูปร่าง	ความพรุนโดยปริมาตร	ความแน่นเฉพาะอนุภาค	ความพรุนขณะขยายตัว	ขนาดช่อง Effective size เมตร
ทรายซิลิกา	กลม	๐.๔	๒.๖	๔๐	๐.๔-๑.๐
ถ่านหินแอนทราไซต์	หลายเหลี่ยม	๐.๔	๑.๔	๕๐	๐.๔-๑.๐
ถ่านหินบิทูมินัส	หลายเหลี่ยม	๐.๔	๑.๒	๕๐	๐.๔-๑.๐
ถ่านหินลิกไนต์	หลายเหลี่ยม	๐.๔	๑.๔	๕๐	๐.๔-๑.๐
ไดอะตอม	-	๐.๙-๐.๙๕	๒.๐-๒.๓	-	๐.๐๑-๐.๑
เกลือแกรนิตไฮดรัส	หลายเหลี่ยม	๐.๕	๒	๒๐	๐.๔-๑.๔
เกลือแกรนิตไฮดรัส	กลม	๐.๕	๒	๒๐	๐.๔-๑.๐

ทราย ทรายที่ใช้ในการกรองน้ำดื่มในปัจจุบันนี้ เป็นทรายซิลิกา ซึ่งในการกรองน้ำนั้นจะมีการล้างทรายเป็นระยะ ๆ ด้วยน้ำ เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ติดมากับน้ำ ในการล้างทรายนี้ ความเร็วของการไหลที่ใช้ล้างนั้นจะต้องไม่มีทรายปนไปกับน้ำล้าง (Loss of sand) ซึ่งนับเป็นค่าใช้จ่ายประการหนึ่ง เพราะเมื่อสิ้นเปลืองทรายไปมาก ๆ จะทำให้ความสูงของทรายในถังกรองลดลง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกรองน้ำ ในการล้างทรายนั้นจะใช้น้ำล้างไหลย้อนขึ้นไปในถังกรองด้วยความเร็วประมาณ ๑๐ ถึง ๑๕ เมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ล้างนั้นจะต้องทำการกวนทรายด้วย เพื่อให้ทรายที่จับตัวกันเป็นก้อนแยกออกจากกันได้ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างทรายนี้ประมาณร้อยละ ๒ ถึง ๕ ของน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว

ถ่านแอนทราไซต์ ใช้แทนทรายในถังกรองน้ำได้ เพราะจะให้ปริมาณน้ำที่ผ่านการกรองได้มากกว่า เพราะความเร็วและความพรุนในช่องว่างของถ่านแอนทราไซต์ที่มีขนาดเท่ากับทรายนั้นจะมีประสิทธิภาพเท่ากัน ขนาดของถ่านแอนทราไซต์ที่นิยมใช้กันในต่างประเทศนั้นจะมีขนาดประสิทธิผล (Effective size) ประมาณ ๐.๙ ถึง ๑.๐ มิลลิเมตร ส่วนความสูงของถังกรองน้ำที่ใช้ถ่านแอนทราไซต์นั้นจะมีประมาณ ๑.๕ ถึง ๒ เท่าของความสูงของทรายในถังกรองน้ำที่ใช้ทราย เพราะถ่านแอนทราไซต์มีความพรุนในขณะขยายตัวมากกว่าทราย ในการล้างถังกรองน้ำที่ใช้ถ่านแอนทราไซต์นั้น จะต้องใช้ความเร็วของน้ำล้างประมาณ ๑๕ ถึง ๒๐ เมตรต่อชั่วโมง ในขณะล้างนั้นจะต้องมีการกวนถ่านแอนทราไซต์ด้วย เพื่อให้ถ่านที่จับตัวกันเป็นก้อนแยกออกจากกันได้ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างถังกรองน้ำที่ใช้ถ่านแอนทราไซต์นี้ ประมาณร้อยละ ๒ ถึง ๕ ของน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว ซึ่งนับว่าเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับการล้างถังกรองน้ำที่ใช้ทรายเป็นสารกรอง ถ่านแอนทราไซต์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันนี้ มีราคาสูงกว่าทรายประมาณ ๒ ถึง ๓ เท่า ดังนั้นการใช้ถ่านแอนทราไซต์เป็นสารกรองจึงมีราคาแพงกว่าการใช้ทรายเป็นสารกรอง แต่เนื่องจากถ่านแอนทราไซต์มีความพรุนในขณะขยายตัวมากกว่าทราย ทำให้ปริมาณน้ำที่ผ่านการกรองได้มากกว่า ดังนั้นจึงนับว่าเป็นการประหยัดในด้านการก่อสร้างถังกรองน้ำ ซึ่งอาจทำให้ราคาของถังกรองน้ำที่ใช้ถ่านแอนทราไซต์เป็นสารกรองต่ำกว่าถังกรองน้ำที่ใช้ทรายเป็นสารกรองก็ได้

หินปูน หินปูนเป็นหินที่มีประโยชน์ที่นำมาใช้ในการปรับคุณภาพน้ำ มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน ๆ ที่จะใช้กรองน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) ต่ำกว่า ๖.๕ ให้มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหินปูนกับน้ำที่มีกรดคาร์บอนิกอยู่ในน้ำ ซึ่งทำให้หินปูนละลายได้ ดังสมการต่อไปนี้

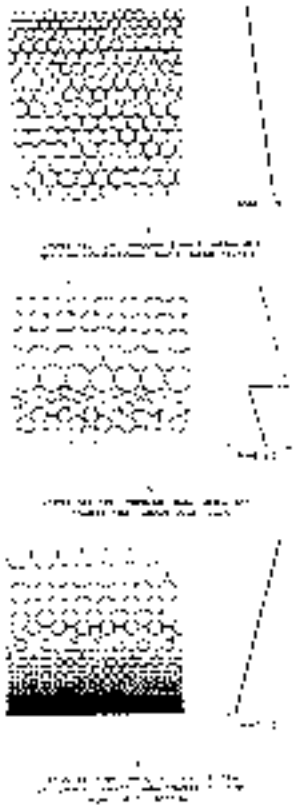
$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$$

ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อน้ำมีค่า pH ต่ำกว่า ๗ ดังนั้นการใช้หินปูนเป็นสารกรองจึงเหมาะที่จะใช้กับน้ำที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า ๖.๕ ซึ่งเป็นน้ำที่มีความเป็นกรดสูง ทำให้หินปูนละลายได้ดี ทำให้ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้น ในการล้างถังกรองน้ำที่ใช้หินปูนเป็นสารกรองนั้น จะต้องล้างด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชสูงกว่าน้ำที่ผ่านการกรอง เพื่อขจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างหินปูนกับน้ำที่มีกรดคาร์บอนิกอยู่ในน้ำ

ถ่านกัมมันต์ *Activated Carbon* ถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption) สารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิว (Surface Area) ต่อหน่วยน้ำหนักประมาณ ๑๐๐ ถึง ๑,๐๐๐ ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านที่

[illegible]

Total Surface Area (m^2/g)		950–1,500
Bulk Density (lb/ft^3)		26
Particle Density, Wetted in Water (g/cm^3)		1.3–1.4
Effective Size (mm)		0.8–0.9
Uniformity Coefficient	Max.	1.9
Mean Particle Diameter (mm)		1.5–1.7
Iodine Number	Min.	950
Abrasion Number	Min	75
Ash	Max.	4 %
Moisture	Max.	2 %



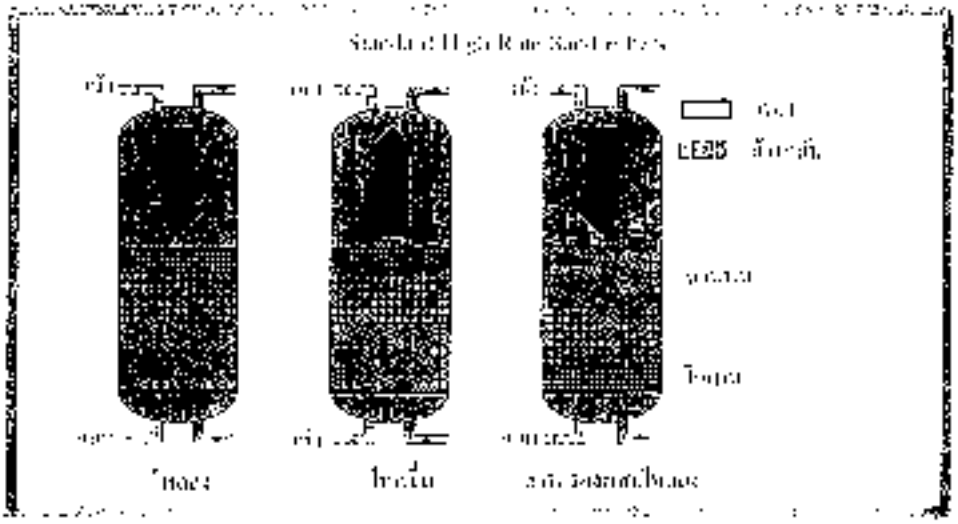
รูปที่ 3.ac การเรียงตัวของสื่อกรองแบบต่าง ๆ

3.2.8 ระบบการกรอง [illegible]

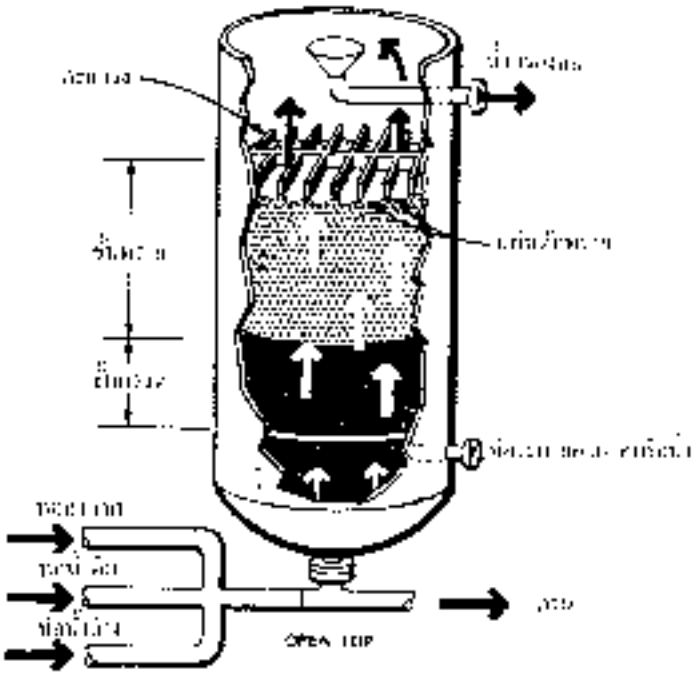
1. **แบบสารกรองเดี่ยว-ไหลลง** [illegible] (Void) [illegible] Head Loss [illegible] (High Solid Loading) [illegible]

[illegible]

2. **สารกรองเดี่ยว ไหลขึ้น** [illegible] Fluidized Bed [illegible] Open Area [illegible]



รูปที่ 3.41 เครื่องกรองน้ำใช้แบบแรงดันและแบบเพรสชัวร์



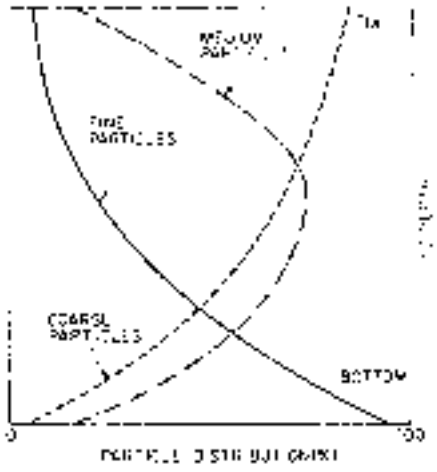
รูปที่ 3.42 เครื่องกรองน้ำสารกรองพีเอ-ไฮดรอน

ตารางที่ ๑๑ แสดงข้อจำกัดในการกรองตะกอนแขวนลอยที่ได้จากการกรองด้วย ๆ และน้ำกรองที่มีความขุ่นต่าง ๆ ของเครื่องกรองแบบไหลขึ้น

ขนาดของการกรอง เกรดอนุภาคที่สม่ำเสมอ	ตะกอนแขวนลอย พีพีเอ็ม		ประสิทธิภาพการกรอง ร้อยละ
	เข้าถังกรอง	ออกจากถังกรอง	
๑.๑	๑๐๐	๑	๙๙
๑.๕	๑๐๐	๓	๙๗
๒.๐	๑๐๐	๕	๙๕
๒.๕	๑๐๐	๗	๙๓
๓.๐	๑๐๐	๑๐	๙๐
๓.๕	๑๐๐	๑๕	๘๕
๔.๐	๑๐๐	๒๐	๘๐

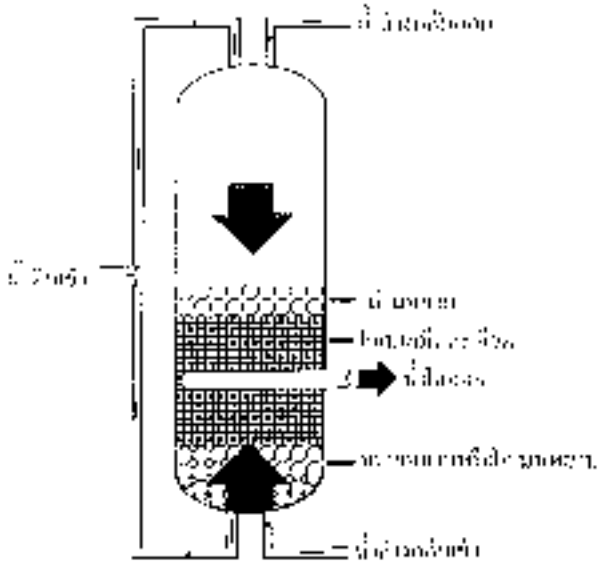
๓. สารกรองผสม-ไหลลง ใช้ทรายและถ่านหินเป็นสารกรอง ทรายมีขนาดประสิทธิผลเล็กกว่าและสม่ำเสมอกว่าถ่านหิน ๒ เท่า หลังการล้างกรองแล้ว ทรายและถ่านหินจะแยกชั้นกันอยู่ ทรายอยู่ด้านล่างเพราะมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าถ่านหิน ส่วนถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าทรายจึงอยู่ด้านบน ขนาดและความหนาของสารกรองที่ใช้ในการกรองผสมมีดังนี้

ถ่านหิน ขนาดประสิทธิผล ๑.๖ มม.	หนา ๔๐ ซม.
ทราย ขนาดประสิทธิผล ๐.๔๕ มม.	หนา ๒๐ ซม.
ไกเนต (Garnet) ขนาดประสิทธิผล ๐.๒๕ มม.	หนา ๑๐ ซม.



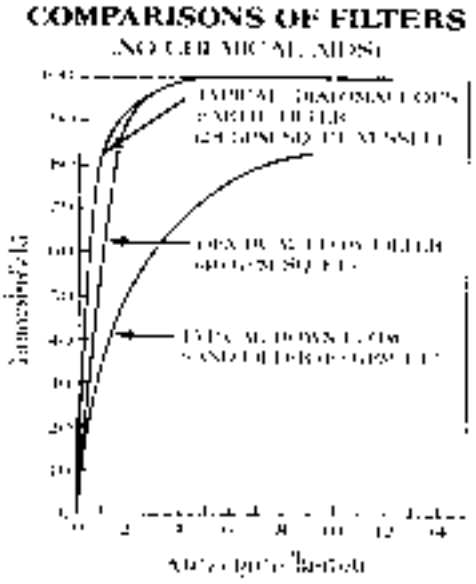
รูปที่ ๑๑ การเรียงลำดับของสารกรองแต่ละชนิดของการกรองผสม

ในการล้างถังกรองแบบไหลขึ้นนี้ ต้องปรับอัตราการไหลของน้ำล้างให้สูงขึ้นจนกระทั่งสารกรองขยายตัวออก ซึ่งจะทำให้ทรายและถ่านหินมีการขยายตัวประมาณ ๑๕-๒๐ เปอร์เซ็นต์ การขยายตัวนี้ทำให้น้ำไหลผ่านสารกรองได้สะดวก สิ่งสกปรกจะถูกชะล้างออกได้ง่าย ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างสารกรองผสมนี้ประมาณ ๑๐ นาที



รูปที่ 3.44 เครื่องกรองน้ำแบบสารกรองคู่-ไหลลงทาง

4. สารกรองคู่-ไหลลงทาง ปัจจุบันการกรองน้ำที่ใช้สารกรองคู่ชนิดต่างๆ เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย ทั้งสองส่วนคือ ทั้งไหลขึ้นและไหลลง การที่ใช้สารกรองคู่ก็เพื่อให้มีขนาดการกรองเพิ่มสูงกว่าการกรองชนิดเดียว ดังเช่น Ultra High Rate Filter ที่จะไหลผ่านสารกรองที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสุดจะเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้นกรอง ดังนั้นการกรองน้ำจากแม่น้ำลำคลองที่มีสารแขวนลอยในปริมาณสูงมากจะเป็นการกรองที่ดีมาก ถึงแม้ว่าจะมีการกรองแบบใช้แรงดันจะมีข้อดีกว่าการกรองแบบใช้แรงโน้มถ่วงของโลกก็ตาม แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่ เช่น ในการล้างทำความสะอาดสารกรองคู่ไม่สามารถทำได้ง่าย การกรองแบบนี้จะนำประโยชน์ของการใช้สารกรองคู่ไปใช้ในการกรองแบบไหลลงทางอย่างเดียว ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการกรองดีกว่าการกรองแบบไหลขึ้นทางเดียว

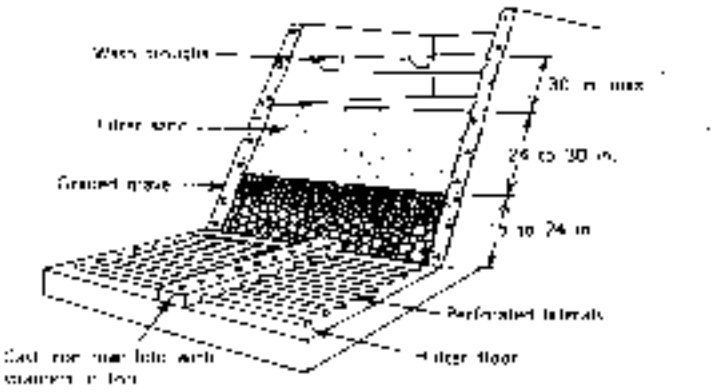


รูปที่ 3.45 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองของสารกรองคู่และสารกรองแบบต่างๆ

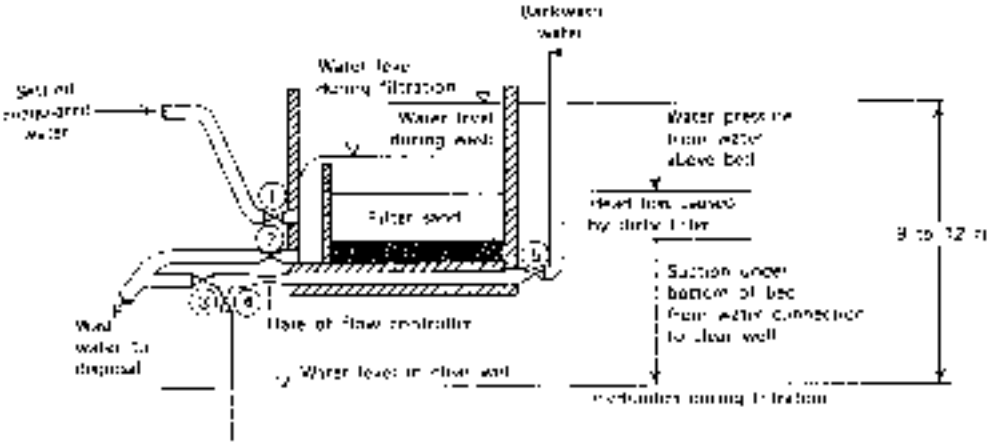
3.2.9 ชนิดของเครื่องกรอง

1. ถุงกรองไม่ใช้แรงดัน (Gravity Filter)
   (1) เครื่องกรองช้า (Slow Sand Filter)
   (2) เครื่องกรองเร็ว (Rapid Sand Filter)
   (3) เครื่องกรองล้างด้วยน้ำอัดย้อนกลับ (Self Back Washing)
2. ถังกรองใช้แรงดัน (Pressure Filter)
   (1) ถังตั้ง (Vertical)
   (2) ถังนอน (Horizontal)

เครื่องกรองช้า เป็นเครื่องกรองที่ใช้กันมาก มีขนาดใหญ่ ใช้ทรายเป็นตัวกรอง ทรายที่ใช้ควรมีขนาดสม่ำเสมอ ทรายที่ใช้ มีขนาดประสิทธิผล (effective size) 0.25 - 0.35 มิลลิเมตร ความสม่ำเสมอ (uniformity coefficient) ไม่เกิน 3 ความหนาของชั้นทรายประมาณ 24 - 30 นิ้ว ความเร็วในการกรองประมาณ 2 - 6 แกลลอนต่อตารางฟุตต่อชั่วโมง ความสูงของน้ำเหนือชั้นทรายประมาณ 3 - 5 ฟุต



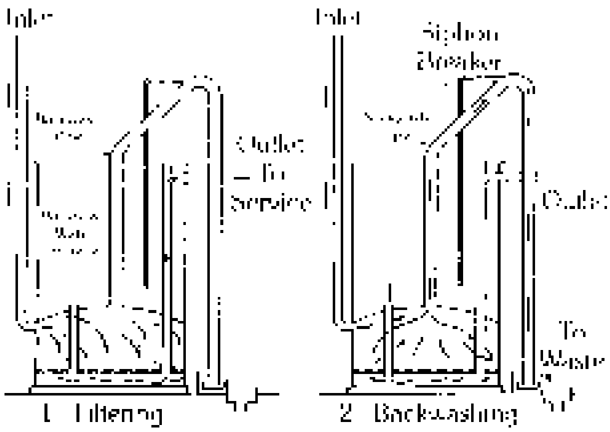
รูปที่ 3.46 เครื่องกรองช้าใช้แรงโน้มถ่วง



รูปที่ 3.47 ภาพและเปรียบเทียบการใช้แรงดันของน้ำในเครื่องกรองแบบใช้แรงโน้มถ่วง

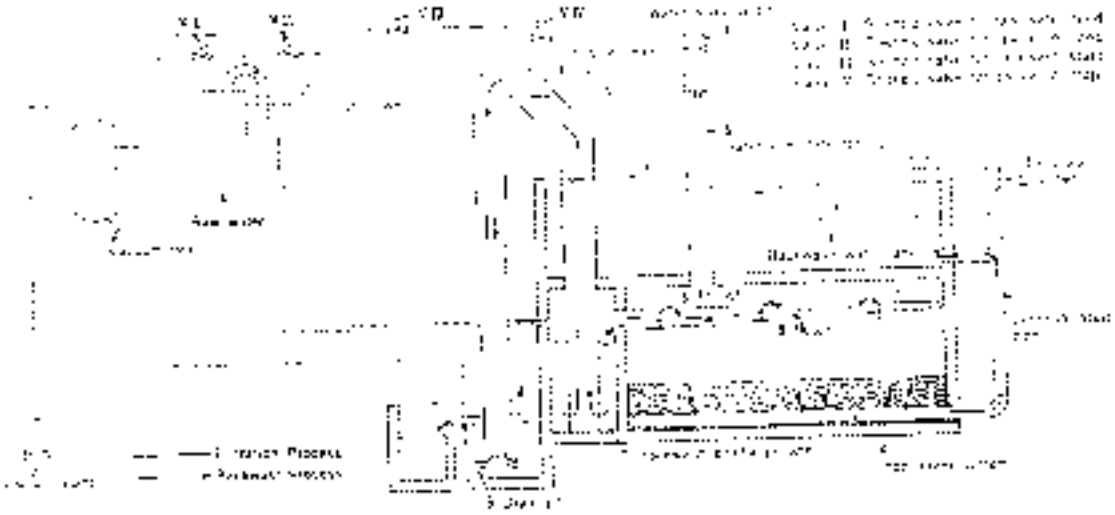
เครื่องกรองเร็ว [illegible] 1,000 [illegible]

เครื่องกรองล้างกลับอัตโนมัติ [illegible] (รูปที่ 3.48) [illegible] 20 [illegible] Siphon Breaker [illegible]

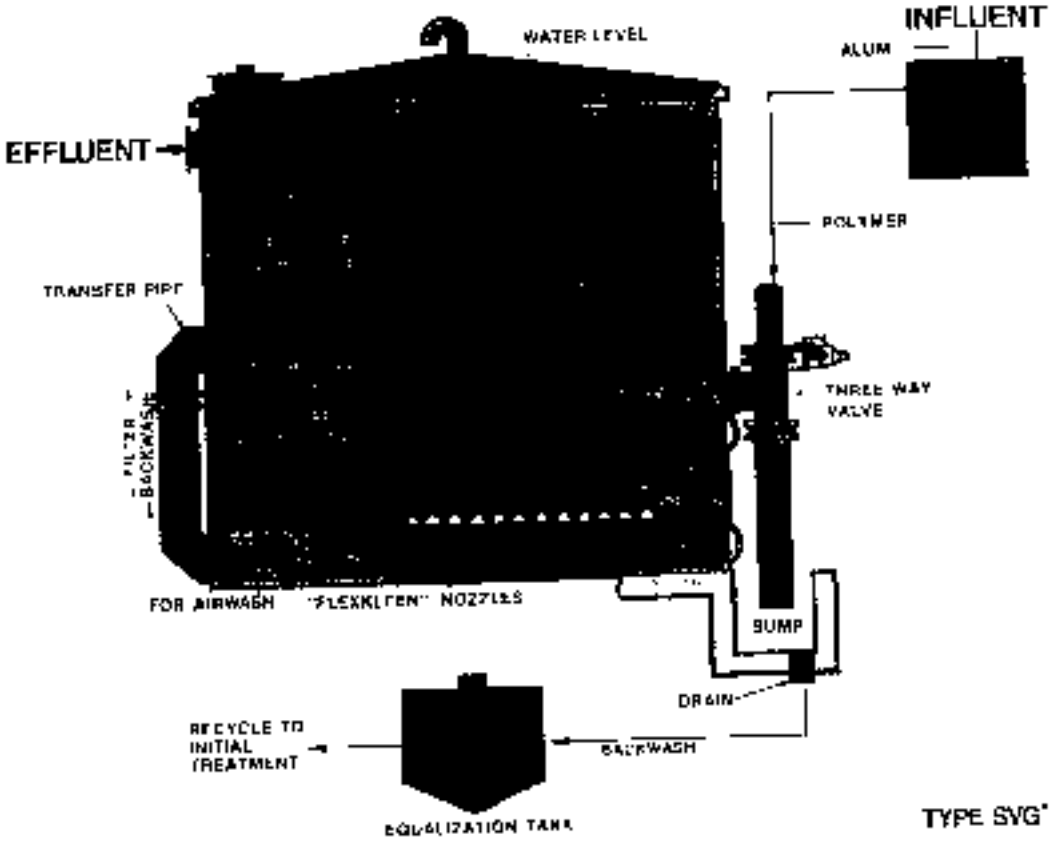


รูปที่ 3.48 ลักษณะการกรองและล้างกลับของ Permutit Gravity Filter

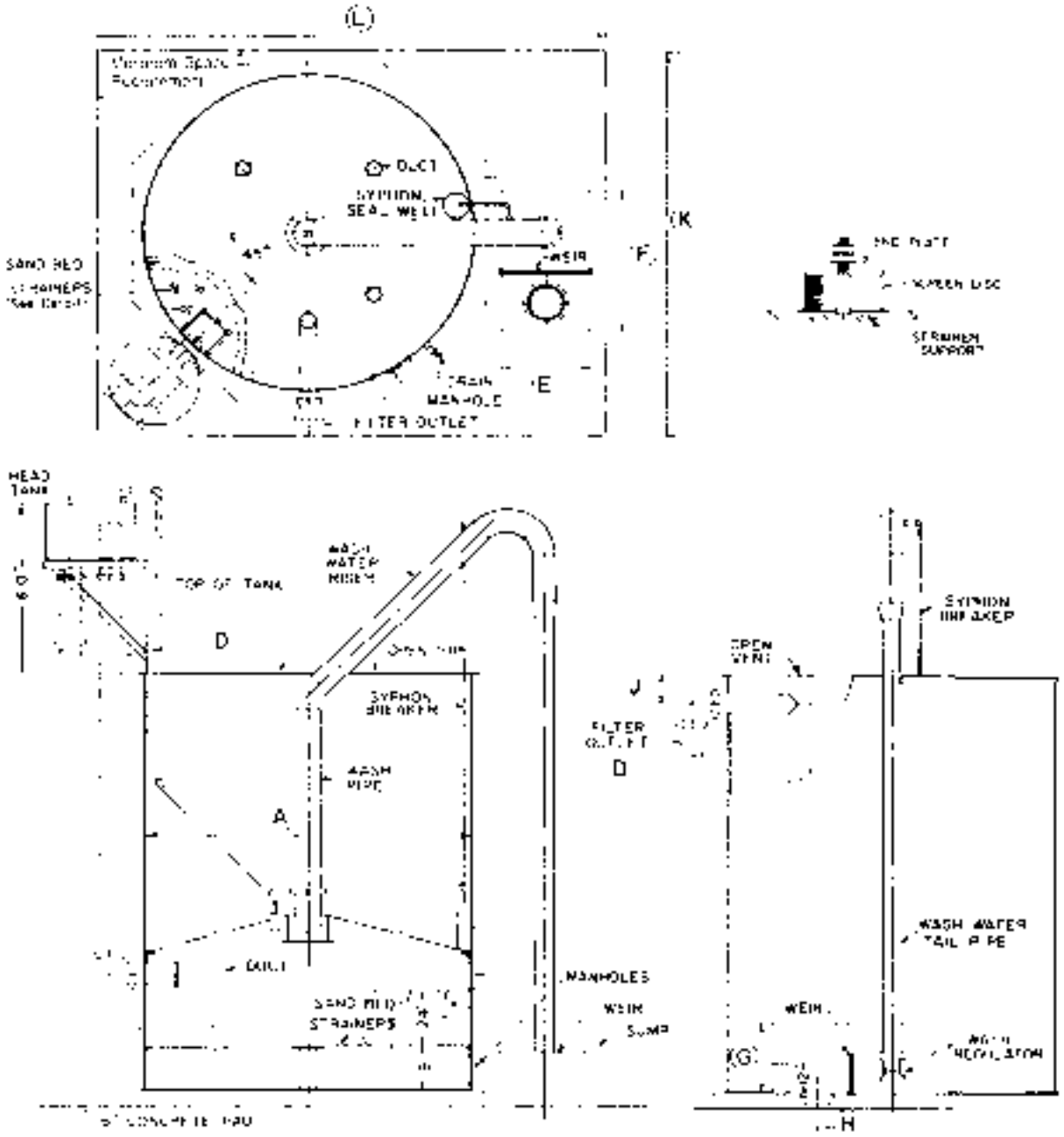
นอกจากนี้ยังมีแบบอื่น ๆ (รูปที่ 3.49) [illegible] Head Loss [illegible] ต่อไป



รูปที่ 3.49 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องกรองด้วยถังกรองโพลิเมอร์ แบบ Kurita



รูปที่ 3.50 Envirotech Automatic Granular Media Filter

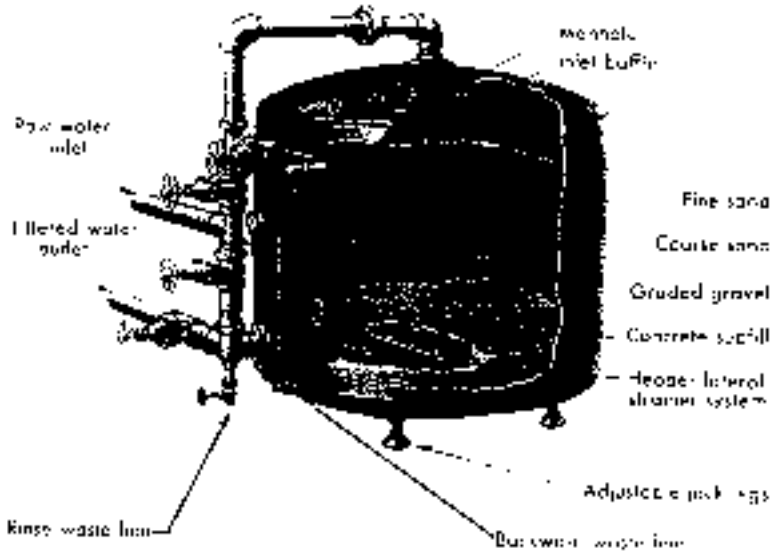


รูปที่ 1.51 Permutit Automatic Valveless Gravity Filter

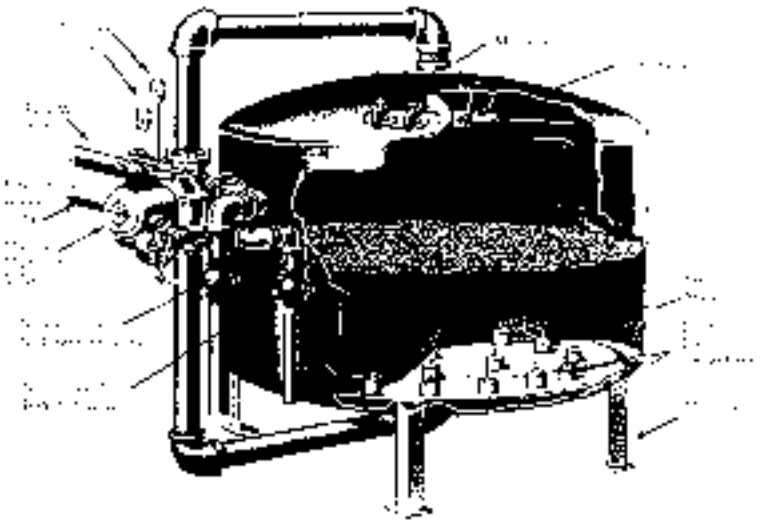
เครื่องกรองมีแรงดันแบบพิเศษ ในการใช้งานจริงของเครื่องกรองแบบมีแรงดันนั้น ถ้าหากว่าเราต้องการที่จะให้น้ำที่ผ่านการกรองแล้วมีความสะอาดมากขึ้น เราก็จำเป็นที่จะต้องเพิ่มความหนาของชั้นทรายให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันมากขึ้นด้วย (Head Loss) ดังนั้นในการที่จะให้เครื่องกรองมีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยที่ไม่ต้องเพิ่มความหนาของชั้นทรายนั้น ก็จำเป็นที่จะต้องเพิ่มแรงดันให้กับน้ำที่ไหลผ่านเข้าไปในเครื่องกรองด้วย ซึ่งเครื่องกรองแบบนี้เรียกว่า

ตารางที่ ... ผลการวิเคราะห์ความเร็วของน้ำตัวกลางขนาดต่างๆ ของการทรายกรองน้ำ

ความเร็วในการไหล เมตรต่อชั่วโมง	Effective Grain Size มิลลิเมตร
...	...
...	...
...	...
...	...

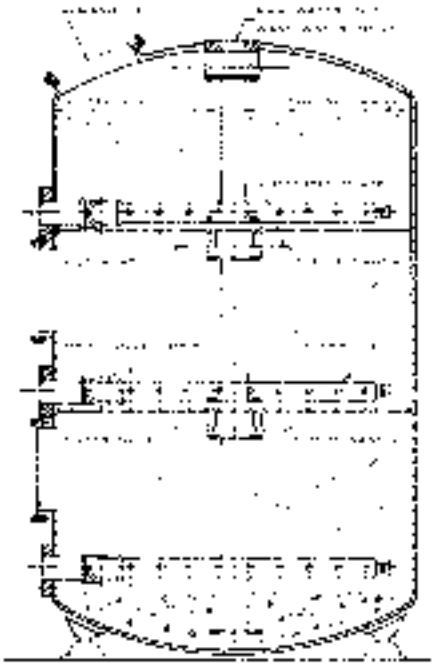


รูปที่ ... เครื่องกรองแบบถังมีชั้นทรายขนาดต่าง ๆ



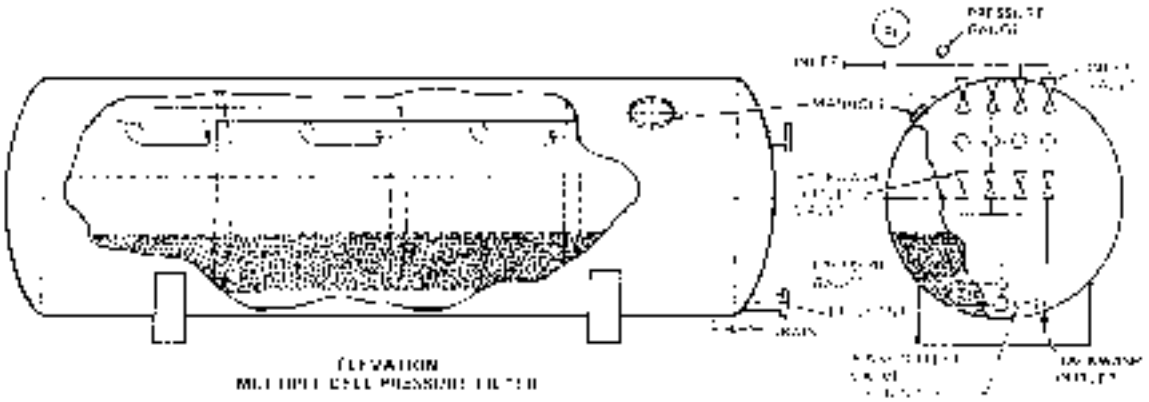
รูปที่ ๔.๑ เครื่องกรองแบบตั้งมีเครื่องพรา

ในการกรองเพื่อประสิทธิภาพสูงของเครื่องกรอง ต้องมีการใช้ Stainer ร่วมกับการใช้สารช่วยกรอง ไม่ต้องมีขั้นตอนการกรองขั้นรองเข้า คือ ขั้นตอนการกรองหยาบของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วนี้จะมีปริมาณของแข็งที่ต้องการกรองออกน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถใช้ระยะเวลาในการกรองได้นานขึ้น ทำให้ประหยัดเวลาในการทำงานได้มาก



รูปที่ ๔.๒ เครื่องกรองแบบแผ่นกรอง

เครื่องกรองมีแรงดันแบบนอน โดยทั่วไปที่ใช้ในการกรองน้ำดื่ม จะไม่ค่อยนิยมใช้ เนื่องจากมีข้อเสียหลายประการ เช่น มี Head Loss ผ่านชั้นกรองสูง ซึ่งมีผลให้ต้องใช้พลังงานในการสูบน้ำมากขึ้น ในการล้างทำความสะอาดจะใช้อัตราการไหลสูงมาก ประมาณ 2 เท่าของอัตราการกรอง ทำให้สิ้นเปลืองน้ำที่ใช้ในการล้างมาก และต้องใช้ปั๊มขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการสูงขึ้น



รูปที่ 3.11 เครื่องกรองมีแรงดันแบบนอน

3.2.10 อัตราการไหลสำหรับชั้นกรองต่าง ๆ ของเครื่องกรองมีแรงดันต่าง ๆ

1. การกรอง (Filtration)
   (1) เครื่องกรองทรายชั้นเดียว ใช้อัตราการกรองประมาณ 2 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (2) เครื่องกรองทรายแบบสองชั้น ใช้อัตราการกรองประมาณ 3 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (3) เครื่องกรองสามชั้น ประกอบด้วย กรวด ทราย และแอนทราไซท์ ใช้อัตราการกรองประมาณ 4 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (4) เครื่องกรองถ่าน Activated Carbon ใช้อัตราการกรองประมาณ 2 แกลลอนต่อตารางฟุต
2. การล้างกลับ (Back Washing)
   (1) เครื่องกรองทรายชั้นเดียว ใช้อัตราการล้างประมาณ 10-15 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (2) เครื่องกรองสองชั้น ทราย และแอนทราไซท์ ใช้อัตราการล้างประมาณ 15-20 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (3) เครื่องกรองสามชั้น ประกอบด้วย กรวด ทราย และแอนทราไซท์ ใช้อัตราการล้างประมาณ 15-18 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (4) เครื่องกรองถ่าน Activated Carbon ใช้อัตราการล้างประมาณ 15 แกลลอนต่อตารางฟุต
3. กรองซ้ำ (Rinse)
   (1) เครื่องกรองทรายชั้นเดียว ใช้อัตราการกรองประมาณ 2-3 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (2) เครื่องกรองสองชั้น ทราย และแอนทราไซท์ ใช้อัตราการกรองประมาณ 3-4 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (3) เครื่องกรองสามชั้น ประกอบด้วย กรวด ทราย และแอนทราไซท์ ใช้อัตราการกรองประมาณ 3-4 แกลลอนต่อตารางฟุต
   (4) เครื่องกรองถ่าน Activated Carbon ใช้อัตราการกรองประมาณ 2 แกลลอนต่อตารางฟุต

3.2.11 ประสิทธิภาพในการกรอง

ประสิทธิภาพในการกรองขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

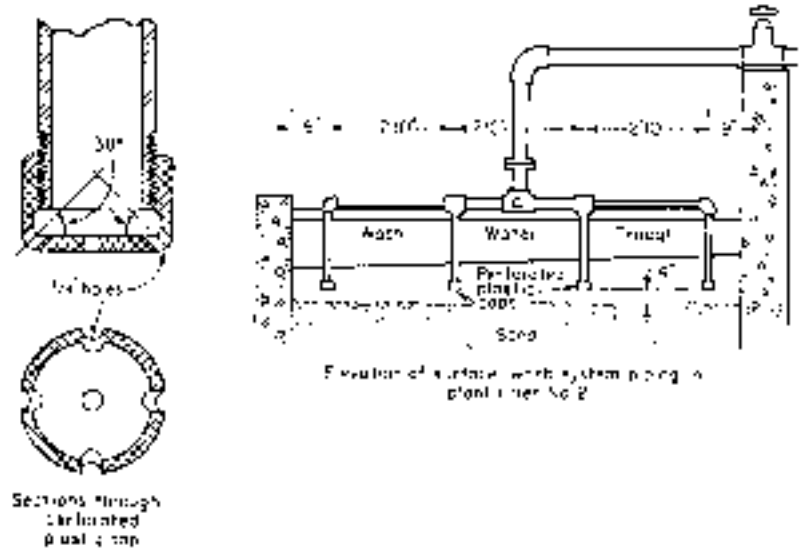
1. การเตรียมน้ำก่อนเข้ากรอง
2. วิธีการทำความสะอาดตัวกรอง
3. พิกัด Head Loss ของเครื่องกรอง
4. ขนาดของเม็ดทราย
5. ความเร็วในการกรอง (Speed of Filtration)
6. ความสามารถในการอักขันตะกอน (Solids Holding Capacity)

3.2.12 การเตรียมน้ำก่อนเข้ากรอง

ในน้ำดิบที่จะเข้ากระบวนการมีความขุ่นมัวและเพียงใด ที่จะทำให้ประสิทธิภาพของการกรองเพิ่มขึ้นมาก เพราะการอุดตันจะเกิดช้า ช่วงเวลาที่ใช้งานของน้ำจะนานขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นที่เข้ากรองมีความขุ่นเกินพิกัดมาก นอกจากจะทำให้เครื่องกรองอุดตันเร็วแล้วยังทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลงด้วย ดังนั้นน้ำที่ผ่านการกรองมีความขุ่นสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ (เพราะความขุ่นบางส่วนในน้ำดิบจะถูกกักไว้ที่ผิวหน้าของชั้นทรายกรองเป็นส่วนใหญ่)

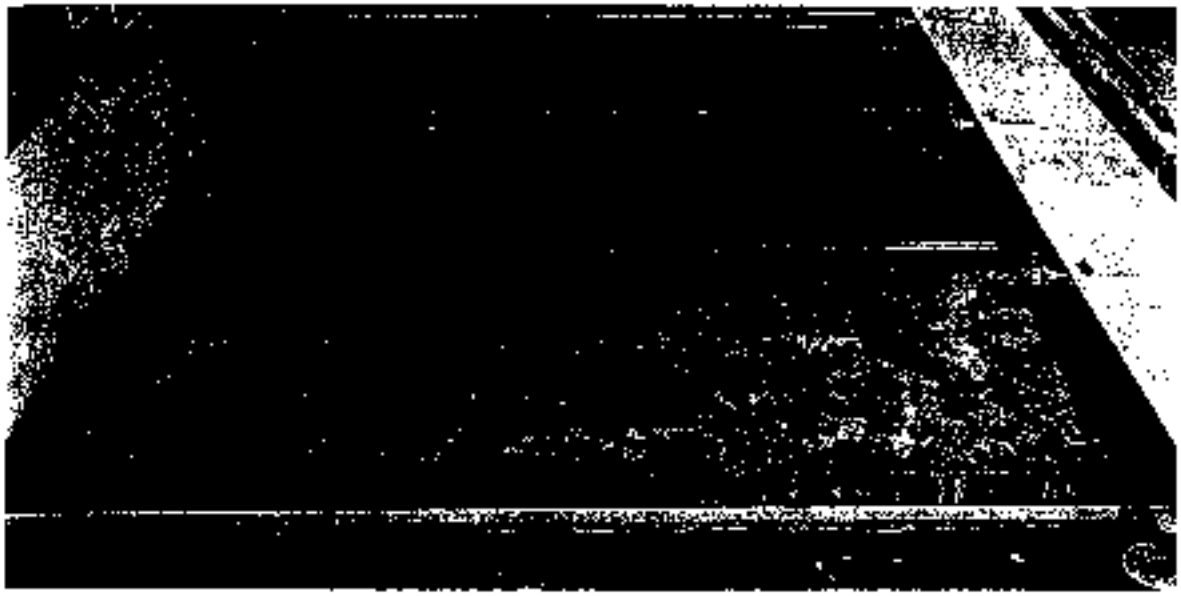
3.2.13 วิธีการทำความสะอาดตัวกรอง

การทำความสะอาดวัสดุกรองเพื่อให้ตะกอนหรืออนุภาคที่ดูดซับอยู่ให้หลุดออกไปกับน้ำล้าง นอกจากการล้างแล้วยังมีวิธีการอื่นในการทำความสะอาดอีกหลายวิธี เช่น ใช้เครื่องมือที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มความเร็วสูง ในการล้างน้ำมักใช้อัตราการไหล 3-5 เท่าของอัตราการกรอง ทั้งนี้ต้องมีน้ำในปริมาณมากเพื่อการล้างน้ำ นับว่าเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งสำหรับโรงกรองในชนบทที่ขาดแคลนน้ำ ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง เพื่อประหยัดน้ำในการล้างน้ำจึงนิยมใช้ลมร่วมกับการล้างน้ำ



รูปที่ 3.5c รายละเอียดหัวฉีดล้างผิวหน้า

ความดันต่ำ และอนุภาคละลายต่าง ๆ ที่ขั้นตอนของน้ำดื่มไม่ต้องการ แม้ว่าน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ ออกไปแล้วก็ตาม จะมีจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย ตะไคร่น้ำ และแพลงก์ตอนสัตว์ ปนมาด้วย ดังนั้นจึงมีวิธีการใช้น้ำล้างผิวหน้าของชั้นกรองทราย (Surface Washing) ร่วมกับการล้างย้อนกลับ ซึ่งมีข้อมูลให้ละเอียดที่จับอยู่บนผิวหน้าทรายหลุดลอยขึ้นไปได้ และใช้ใบพาย (Mechanical Rakes) ที่ติดอยู่ในชั้นกรองทราย ช่วยกวนทรายในขณะที่มีการล้างย้อนกลับ



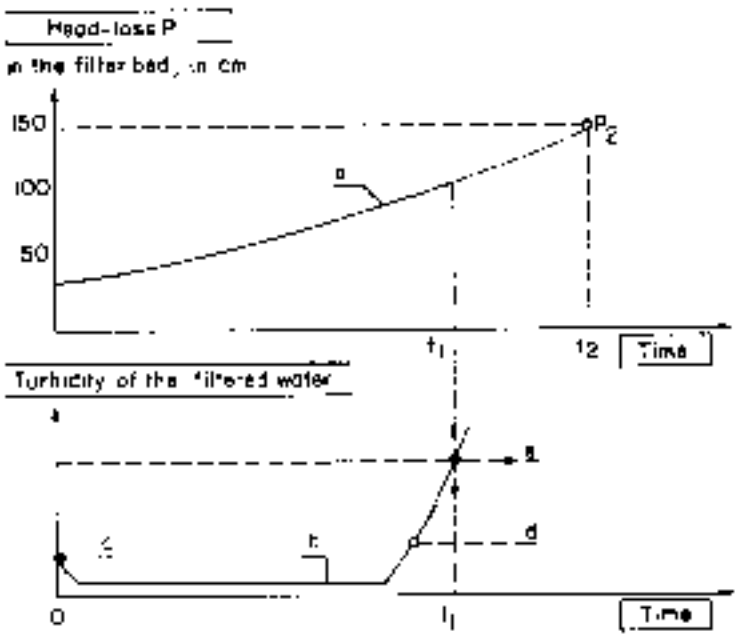
รูปที่ 3.13 การใช้อากาศเป่าจากล่างเพื่อล้างผิวหน้า

3.2.14 พิกัด Head Loss ของเครื่องกรอง

เครื่องกรองใสที่มีค่าแรงดันสูญเสีย (Pressure Drop) ในการกรองสูงที่จะมีช่วงระยะเวลาการกรองนานก่อนจะถึงจุดที่มีความขุ่นเริ่มไหลออกมากับน้ำ (Break Through) ดังนั้น เครื่องกรองที่มีค่าแรงดันสูญเสียความดันสูง ก็จะมีประสิทธิภาพในการกรองสูงด้วย

ตารางที่ 3.14 ค่า Pressure Drop และ Head Loss ของเครื่องกรองแบบต่าง ๆ

	Pressure Drop ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	Head Loss ฟุตของน้ำ
เครื่องกรองแบบมีแรงดัน	3 - 5	7 - 12
เครื่องกรองแบบไม่มีแรงดัน	0.5 - 0.9	6 - 8
เครื่องกรองแบบใช้ผ่านถ่านกัมมันต์	1.5 - 2.0	6 - 8
เครื่องกรองถ่าน Activated Carbon	3 - 5	7 - 12



รูปที่ 3.58 ค่าดัชนีการเปลี่ยนแปลงความขุ่นและความดันในการกรองน้ำ

P_2 ค่าที่ Head Loss สูงสุดที่ยอมให้ในการออกแบบถังกรอง

a การเพิ่มขึ้นของ Head-Loss ในแต่ละช่วงเวลา

b การเพิ่มขึ้นของความขุ่นในแต่ละช่วงเวลา

c จุดเริ่มล้างถังกรอง

d จุดเริ่มการรั่วของสิ่งแขวนลอย

e ค่าที่ยอมให้ของสิ่งแขวนลอยในน้ำกรอง

3.2.15 ขนาดของมีเดียทราย

ผู้ใช้ต้องกำหนดขนาดของทรายที่จะใช้ เช่น Effective Size และ Uniformity Coefficient ที่เหมาะสม การกำหนดขนาดที่จะใช้ควรมี U.C. ไม่เกิน 1.5 และไม่ควรเกิน 2 ถ้า E.S. ของมีเดียมีขนาดเล็กจะทำให้ Head Loss สูงขึ้นมาก และทำให้ระยะเวลาการใช้งานของถังกรองสั้นลง ถ้าขนาดของมีเดียใหญ่เกินไป ประสิทธิภาพในการกรองจะลดลง ทำให้น้ำกรองมีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นการเลือกขนาดของมีเดียจึงต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบ และคุณภาพน้ำที่ต้องการ ความสัมพันธ์ระหว่าง E.S. และ Head Loss สามารถพิจารณาได้จากสมการ Kozeny

$$\text{Penetration} \propto \text{Effective Size}$$

$$\text{Head Loss} \propto \frac{1}{(\text{E.S.})^4}$$

3.2.16 ความเร็วการกรอง

ความเร็วของน้ำในการกรองนั้นไม่มีผลต่อคุณภาพของน้ำที่ผ่านการกรอง แต่จะมีผลต่อระยะเวลาการใช้งานของถังกรอง เพราะเกี่ยวข้องกับปริมาตรของตะกอนที่ถูกกักไว้ในถังกรอง และ Head Loss ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียพลังงานของน้ำในขณะผ่านมีเดียกรอง

ในการกรองนั้น Head Loss จะเกิดขึ้นเมื่อมีอนุภาคที่เกาะอยู่ที่

Head Loss =

ν = ค่าความหนืดของน้ำที่ใช้ในการกรอง มีหน่วย ตามหน่วยของความเร็ว หรือแรง หรือแรงต่อพื้นที่

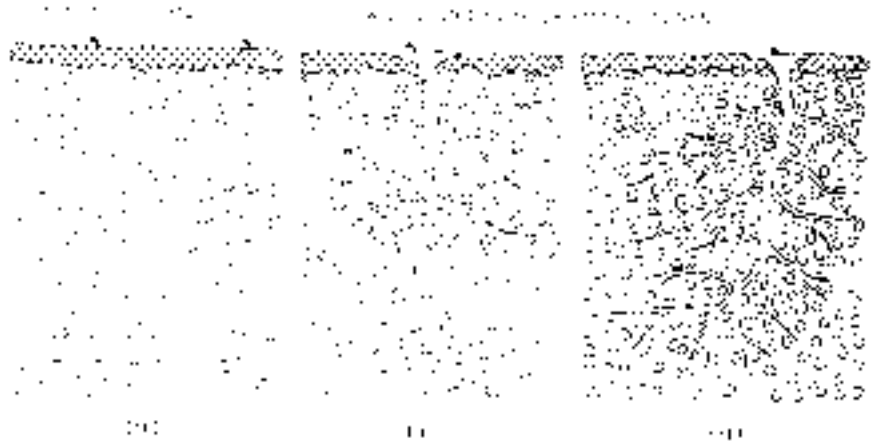
จะเห็นได้ว่าการเริ่มการกรองใหม่ๆ ในช่วงแรกของการกรอง ตะกอนจะถูกดักจับอยู่ที่ผิวหน้าของชั้นทราย ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเล็กลง ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเร็วในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้ค่าความหนืดของน้ำมีมากขึ้น ส่งผลให้ค่า Head Loss เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการเริ่มต้นการกรองใหม่ๆ ในช่วงแรกของการกรอง ตะกอนที่ถูกดักจับอยู่ที่ผิวหน้าของชั้นทรายจะมีขนาดเล็กกว่าขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้ตะกอนสามารถหลุดลอดผ่านชั้นทรายลงไปได้ ตะกอนที่หลุดลอดผ่านลงไปได้นี้ เรียกว่า ตะกอนแขวนลอย (Suspended Solid) ไม่ทำให้ Head Loss เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

3.3.17 ความสามารถในการดักจับตะกอน

ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ใช้ในการกรองน้ำนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าขนาดของตะกอนที่ถูกดักจับ ทำให้ตะกอนไม่สามารถหลุดลอดผ่านไปได้ ซึ่งความสามารถในการดักจับตะกอนของชั้นทรายกรองนี้ เรียกว่า ความสามารถในการอุ้มตะกอน (Solids Holding Capacity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการกรอง ขนาดของเม็ดทราย และความลึกของชั้นทราย ความสามารถในการอุ้มตะกอนนี้ เรียกว่า Solids Holding Capacity ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการกรอง ขนาดของเม็ดทราย และความลึกของชั้นทราย ในการกรองน้ำนั้นจะกรองเอาตะกอนที่ขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างเม็ดทรายไว้ที่ผิวหน้าของชั้นทราย ตะกอนที่ขนาดเล็กกว่าช่องว่างระหว่างเม็ดทรายจะหลุดลอดผ่านลงไปได้ ตะกอนที่หลุดลอดผ่านลงไปได้นี้ เรียกว่า ตะกอนแขวนลอย (Suspended Solid) ไม่ทำให้ Head Loss เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

3.3.18 ปัญหาในการกรอง

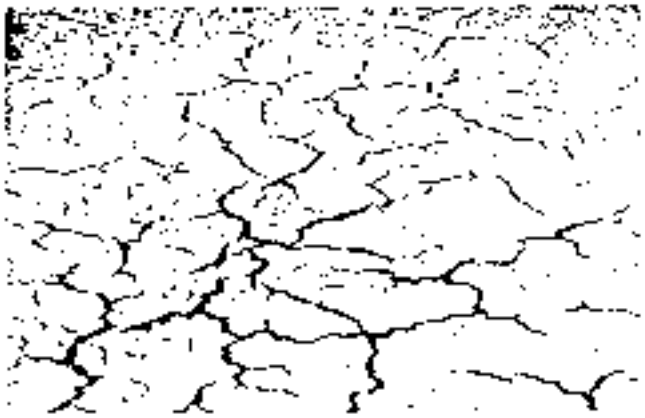
1. **การอุดตันผิวหน้าของชั้นทรายกรองและการแตกแยกของผิวหน้า** ในการกรองน้ำนั้น ตะกอนที่ถูกดักจับอยู่ที่ผิวหน้าของชั้นทรายกรองนั้น ในช่วงแรกของการกรองตะกอนจะถูกดักจับอยู่ที่ผิวหน้าของชั้นทราย ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเล็กลง



รูปที่ 3.39 แสดงการอุดตันผิวหน้าของชั้นทรายกรองและการแตกแยกของผิวหน้า

ฟล็อกแข่งไปกับน้ำเมื่อสารกรองจะเริ่มใช้งานใหม่ ๆ หลังล้างจะมีขนาดเล็กประมาณ 0.1 มิลลิเมตร สารกรองที่มีรูปร่างกลม เช่น เม็ดทรายที่มีขนาด 0.5 มิลลิเมตร จะมีขนาดของช่อง 0.1 0.2 มิลลิเมตร ถ้าเป็นสารกรองมีรูปร่างคม เช่น ถ่านแอนทราไซต์ 1.2 มิลลิเมตร ช่องว่างจะมีขนาด 0.3 0.6 มิลลิเมตร

ในรูปที่ 3.60 (ก) แสดงถึงลักษณะการแขวนลอยหลักใหญ่ ๆ อยู่บนผิวหน้าสารกรองเป็นส่วนใหญ่ เพราะหลักมีขนาดใหญ่ และเคลือบเป็นฟล็อกเล็ก ๆ ก็จะเป็นแบบ Cake Filtration ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำ เครื่องกรองจะอุดตันเร็ว ระยะเวลาการใช้งานของจะสั้น ในรูปที่ 3.60 (ข) จะเป็นกรณีที่ฟล็อกและตะกอนแขวนลอย ๆ เกาะตัวเข้าไปในเนื้อสารกรองได้บ้าง การกรองเริ่มมีลักษณะของ Deep Bed Filtration แต่ก็มีบางส่วนที่มีลักษณะเป็น Cake Filtration ถ้าใช้สารกรองขนาดหรือสารกรองหยาบ ปัญหาการอุดตันผิวหน้าจะลดน้อยลงมาก เพราะสารกรองจะมีช่องว่างมากกว่า ในกรณีที่เป็น Cake Filtration นั้น ผิวหน้าของชั้นสารกรองจะเกิดการแตกแยกได้



รูปที่ 3.60 การแพร่กระจายของผิวหน้าชั้นสารกรอง

รูปที่ 3.61 แสดงลักษณะการอุดตันของผิวหน้าชั้นสารกรองลึกลงไป 3 นิ้ว

2. **ระยะเวลาใช้งานกรองสั้น** เนื่องจากมี Head Loss เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การที่เครื่องกรองมีการสูญเสียความดันเพิ่มขึ้นมาก เพราะมีการเพิ่ม Solids Loading ขึ้น เช่น ในการล้างน้ำที่ใช้ล้างจะมีความขุ่นมากกว่าปกติมาก แต่ความสามารถในการพักจับตะกอนของชั้นสารกรองมีน้อยลง ทำให้ชั้นสารกรองอุดตันได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้การเติมสารเคมีช่วยเพื่อเกาะจับบนเม็ดสารกรองก็ทำให้ชั้นสารกรองมี Head Loss เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

4. **น้ำที่กรองมีความขุ่นสูงออกมา** ในบางครั้งอาจพบว่าน้ำที่ผ่านการกรองแล้วมีความขุ่นสูงกว่าปกติ ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น น้ำดิบมีความขุ่นสูงเกินกว่าที่ระบบจะรับได้ หรือการใช้งานระบบที่ผิดวิธี เช่น การใช้อัตราการกรองที่เร็วเกินไป หรือการล้างย้อนที่ไม่สะอาดพอ ทำให้ตะกอนสะสมอยู่ในชั้นกรองมากเกินไป

5. **มีเศษดิน โคลน (Mud Ball) อยู่บนผิวหน้าของชั้นสารกรอง** ในบางครั้งเมื่อมีการล้างย้อนกลับ อาจพบว่ามีเศษดิน โคลน หรือตะกอนขนาดใหญ่ ที่ไม่สามารถแยกตัวออกจากชั้นสารกรองได้ ซึ่งอาจเกิดจากการที่น้ำล้างย้อนมีแรงดันไม่เพียงพอ หรือมีการอุดตันของตะกอนในบางจุด ทำให้ชั้นสารกรองมีการจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น ในการล้างครั้งต่อไป ก้อนโคลนเหล่านี้จะแตกตัวและลอยขึ้นมาอยู่ด้านบน ทำให้ชั้นสารกรองมีการอุดตันมากขึ้น (Clogged) เกิดการสูญเสียแรงดันน้ำ (Head Loss) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

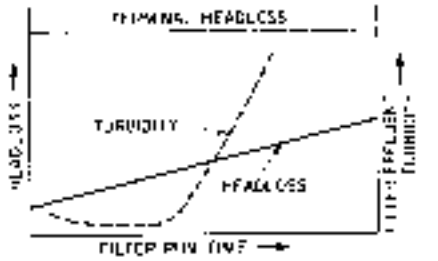
ตารางที่ 4.5 การวัดปริมาณเศษดิน โคลนที่จับเป็นก้อน (Mud Ball) อยู่ในสารกรอง ซึ่งบอกถึงสภาพของสารกรอง

ปริมาณเศษดินและตะกอนที่จับเป็นก้อนโคลนในสารกรอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สภาพของสารกรอง
0 – 0.1	ดีมาก
0.1 – 0.2	ดี
0.2 – 0.5	พอใช้
0.5 – 1.0	ต้องปรับปรุง
1.0 – 2.0	ไม่ค่อยดี
2.0 – 5.0	ไม่ดี
มากกว่า 5.0	แย่มาก

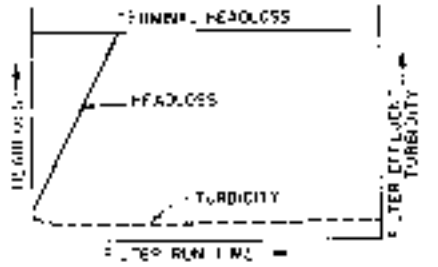
ในการใช้งานเครื่องกรอง ควรตรวจวัดค่าปริมาณเศษดินและตะกอนที่จับเป็นก้อนในสารกรองเป็นประจำ ตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.5 เพื่อให้สามารถปรับปรุงการทำงานของระบบได้อย่างเหมาะสม ในการล้างย้อนนั้น ต้องใช้อัตราการไหลที่สูงพอ ประมาณ 30 เมตรต่อชั่วโมง และต้องใช้เวลาในการล้างนานพอสมควร

5. **มีพรายหรือไปรับน้ำกรอง** ในการกักเก็บน้ำดิบในบ่อพักน้ำดิบ ซึ่งมีการเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศแบบน้ำพุ ทำให้มีการหมุนเวียนของน้ำในบ่อพักน้ำดิบ และมีโอกาสที่จะมีพรายน้ำหลุดออกไปกับน้ำดิบ ซึ่งต้องมีการติดตั้งตะแกรงดักพรายน้ำที่ท่อน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบกรองด้วย

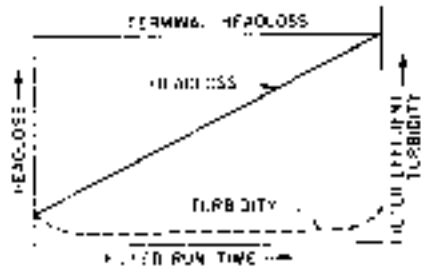
6. **การสูญเสียสารกรอง** ถ้ามีการล้างย้อนกลับด้วยอัตราการไหลที่สูงเกินไป จะทำให้สารกรองประเภทถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ในการล้างแต่ละครั้ง สูญเสียไปมากกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งอาจเกิดจากการที่ไม่ได้ปรับอัตราการไหลของน้ำล้างย้อนให้เหมาะสม หรือการที่ไม่ได้ปิดวาล์วน้ำดิบก่อนการล้างย้อน ทำให้น้ำดิบไหลเข้าสู่ระบบกรองในขณะที่ทำการล้างย้อนด้วย ทำให้อัตราการไหลของน้ำล้างย้อนสูงเกินกว่าที่ควรจะเป็น ส่งผลให้สารกรองที่ถูกล้างออกไปกับน้ำล้างย้อนมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารกรองเพิ่มเข้าไปในระบบเป็นประจำ



(a) POLYMER DOSE INADEQUATE



(b) POLYMER DOSE EXCESSIVE



(c) OPTIMUM POLYMER DOSE

รูปที่ 3.13 ผลการใช้สารโพลีเมอร์ในการรวมตะกอน

BIBLIOGRAPHY

1. Al-Layla, M.A., Ahmad, S. and Middlebrooks, E.J. **Water Supply Engineering Design.** Michigan : Ann Arbor Science Publishers, 1978.
2. AWWA. **Water Quality and Treatment.** New York : McGraw Hill, 1971.
3. AWWA. **Water Treatment Plant Design.** New York : American Water Works Associations, 1969.
4. Binh, N.C. "Optimization of the Inclined Tube Settler and Anthracite Sand Filter." Thesis No. 934. AIT, 1978.
5. Brady, M.A. and Lumpkins, R.L. "Performance of Dual-Media Filters." **Chemical Engineering Progress** (April 1977).
6. Culp, G.L. and Culp, R.L. **New Concepts in Water Purification.** New York : Van Nostrand Reinhold Co., 1974.
7. Culp, R.L. and Culp, G.L. **Advanced Waste Water Treatment.** New York : Van Nostrand Reinhold Co., 1971.
8. Degremont. **Water Treatment Handbook.** Degremont, S.A. 1979.
9. Dickey, G.D. **Filtration.** New York : Reinhold Publishing Corp., 1961.
10. Duggal, K.N. **Elements of Public Health Engineering.** New Delhi : S. Chand & Co., 1971.
11. Fisher, D.F. "Filtration." **Effluent and Water Treatment Journal** (April 1978).
12. Givens, D.P. and Lash, L.D. "What look for in Granular Media Filters." **Chemical Engineering Progress** (December 1978).
13. Hammer, M.J. **Water and Waste-Water Technology.** New York : John Wiley & Sons, 1975.
14. Hiron, L. and Whitehall, K.V. "Investigating Reduced Hydraulic Throughput of Sand Filters". **Effluent and Water Treatment Journal** (January 1979).
15. Johnson, J.G. "Advanced Filtration Technique." **Effluent & Water Treatment Journal** INSIGHT Special issue by Degremont Laing.
16. Lash, L. "Scale-up of Granular Media Filters." **Chemical Engineering Progress.** (April 1977).
17. Lohwongwatana, S. "Performance Comparison of the Multi Media Filter and the Deep Sand Filter." Thesis No. 1086. AIT, 1977.

18. Mohler, J.C. and Chase, L.T. "Removing Colloidal Solids Via Up Flow Filtration," Chemical Engineering Progress (April 1977).

19. Oulman, C.S., Sastri, A.M. and Bauhane, E.R. Direct Filtration : Particle Removal with Polymers. AIChE Symposium Series, Vol. 75, 1979.

20. The Permutit Co. Permutit Automatic Valveless Gravity Filter Bulletin 4351 G

21. The Permutit Co. Permutit Technical Training Seminar Manual.

22. U.S. Environmental Protection Agency. Process Design Manual for Suspended Solid Removal (January 1975)

23. U.S. Environmental Protection Agency. Process Design Manual for Suspended Solids Removal. (October 1971).

24. Purchas, D.B. Industrial Filtration of Liquids. London : Leonard Hill Books, 1971.

25. Skeat, W.O. Water Quality and Treatment. Manual of British Water Engineering Practice. Vol. 3 London : The Institution of Water Engineers, 1969.

26. Suttle, H.K. Process Engineering Technique Evaluation Filtration. Morgan-Grampian Ltd. Kent, 1969

27. Svarovsky, L. "Advances in Solid-Liquid Separation I. Filtration and Allied Operations." Chemical Engineering, (July 2, 1979)

28. Combustion Engineering. Technical Information, CE Natco

29. Vigneswaran, S. "Comparative Study of Rapid Filtration Techniques for Turbid Waters." Thesis No. 1407, AIT, 1978.

4 การไล่ก๊าซ

แหล่งน้ำตามธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำผิวดินหรือแหล่งน้ำใต้ดิน มักจะมีก๊าซชนิดต่าง ๆ ละลายอยู่ในน้ำเสมอ เช่น ก๊าซออกซิเจน (O_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซที่ละลายในน้ำแหล่งนี้สามารถขจัดออกจากน้ำได้โดยให้น้ำสัมผัสอากาศ (Aeration)

4.1 ก๊าซที่จะจัดได้โดยวิธีสัมผัสกับอากาศ

1. **ก๊าซที่ทำให้เกิดรส กลิ่น** เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารอินทรีย์บางชนิดที่ระเหยได้

2. **ก๊าซที่ทำให้น้ำมีคุณสมบัติกัดกร่อน** เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซออกซิเจน ถึงแม้ว่าจะทำให้เกิดการกัดกร่อน แต่วิธีการไล่ก๊าซโดยให้สัมผัสกับอากาศจะไม่ทำให้มีมากเท่ากับการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป

3. **ก๊าซอื่น ๆ** เช่น ก๊าซมีเทน (CH_4) ในน้ำบาดาล

ตามกฎของดอลตัน การละลายของก๊าซในน้ำขึ้นอยู่กับความดันย่อย (Partial Pressure) ของก๊าซนั้นในบรรยากาศ ก๊าซต่าง ๆ เมื่อละลายน้ำจะแตกตัว (Ionize) ให้ดังนี้

$$H_2O + CO_2 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$

$$H_2S \rightleftharpoons H^+ + HS^-$$

$$H_2O + NH_3 \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$$

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแอมโมเนีย จะละลายในน้ำได้สูงสุด 1,750 3,980 และ 500,000 มิลลิโมล ตามลำดับ ความสัมพันธ์ของก๊าซเหล่านี้ที่ความดันบรรยากาศจะมีค่าเทียบเป็นร้อยละ เช่น ที่จะดับน้ำกระด้าง อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส น้ำที่สมดุลกับบรรยากาศจะมีก๊าซในโตรเจนละลายอยู่ 15.5 มิลลิโมล ออกซิเจน 9.4 มิลลิโมล คาร์บอนไดออกไซด์ 0.3 มิลลิโมล ถ้าให้น้ำแหล่งนี้ได้สัมผัสกับอากาศตามธรรมชาติจนถึงขนาดอยู่ในสภาพสมดุล น้ำจะมีก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนละลายอยู่จนเต็มที่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จะไม่สามารถละลายอยู่ในน้ำได้

ตารางที่ ๔.๑ อัตราการละลายของก๊าซต่าง ๆ ในน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	CO_2	อากาศ	N_2	O_2
๐	๑.๗๑๒	๐.๐๒๙๐	๐.๐๑๔๑	๐.๐๑๐๗
๕	๑.๔๐๑	๐.๐๒๐๔	๐.๐๑๐๘	๐.๐๑๔๗
๑๐	๑.๑๑๑	๐.๐๑๓๔	๐.๐๑๑๕	๐.๐๑๐๗
๑๕	๑.๐๓๐	๐.๐๑๐๗	๐.๐๑๐๔	๐.๐๑๐๓
๒๐	๐.๘๓๖	๐.๐๑๐๔	๐.๐๑๐๑	๐.๐๑๐๔
๒๕	๐.๗๑๖	๐.๐๑๐๒	๐.๐๑๐๑	๐.๐๑๐๗
๓๐	๐.๖๖๐	๐.๐๑๐๔	๐.๐๑๐๑	๐.๐๑๐๔
๓๕	๐.๖๐๗			-
๔๐	๐.๕๙๑	๐.๐๑๐๑	๐.๐๑๐๒	๐.๐๑๐๔
๔๕	๐.๕๗๑	-	-	
๕๐	๐.๔๐๘	๐.๐๑๐๑	๐.๐๑๐๖	๐.๐๑๐๙
๘๐	๐.๐๙๖	๐.๐๐๙๖	๐.๐๐๙๖	๐.๐๐๙๖
๗๐	๐.๐๑๐		-	
๙๐		๐.๐๐๗๑	๐.๐๐๔๐	๐.๐๐๘๑
๑๐๐	-	๐	๐	๐

การลดลงของก๊าซที่ละลายในน้ำเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดเดือด จะเป็นไปตามสมการ

$$C_t = S - (C_a - S)\,10^{-\alpha V t}$$

C_t = ความเข้มข้นของก๊าซในน้ำที่เวลาใด ๆ

S = ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในน้ำที่สามารถละลายในน้ำได้สูงสุด

C_a = ความเข้มข้นของก๊าซในน้ำก่อนการให้ความร้อน

A = พื้นที่ผิวของการสัมผัสระหว่างน้ำและก๊าซ

V = ปริมาตรของน้ำ

α = สัมประสิทธิ์ของการแพร่ของก๊าซในน้ำ

t = ระยะเวลาที่น้ำมีโอกาสสัมผัสกับอากาศ

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของการถ่ายเทก๊าซขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

๑. อุณหภูมิ อุณหภูมิสูงขึ้น น้ำจะละลายก๊าซต่าง ๆ ได้น้อยลง

๒. ความเข้มข้นของก๊าซในน้ำ

๓. พื้นที่ผิวของการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ

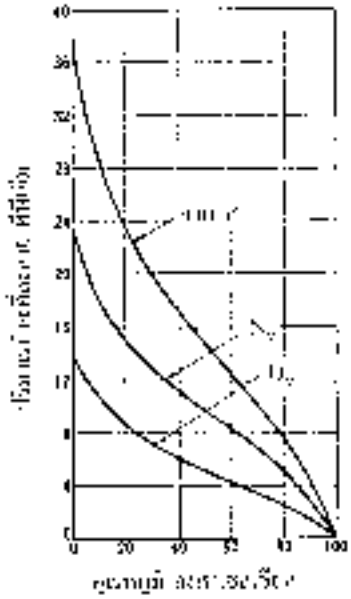
๔. ปริมาณของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำ ณ ขณะนั้นเทียบกับความสามารถ

๕. ปริมาณน้ำหรือก๊าซที่สัมผัสกับอากาศในเวลานั้น

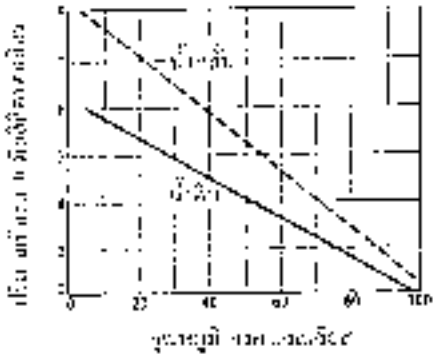
ตารางที่ 4.2 การละลาย ความนำไฟฟ้า และ pH ของน้ำกลั่นคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ความกดบรรยากาศ ๑ ที่ ๒๐° C

ความดันย่อยของ CO_2 บรรยากาศ	การละลายในน้ำ		ความนำไฟฟ้าไมโครโม	pH
	ทีพีเป็นในรูป CO_2	ทีพีเป็นในรูป $CaCO_3$		
1	1,300	2,600	90	3.9
10^{-1}	130	260	15	4.4
10^{-2}	13	26	4	4.9
10^{-3}	1.3	2.6	1.0	5.4
3×10^{-4}	0.39	0.78	0.6	5.6

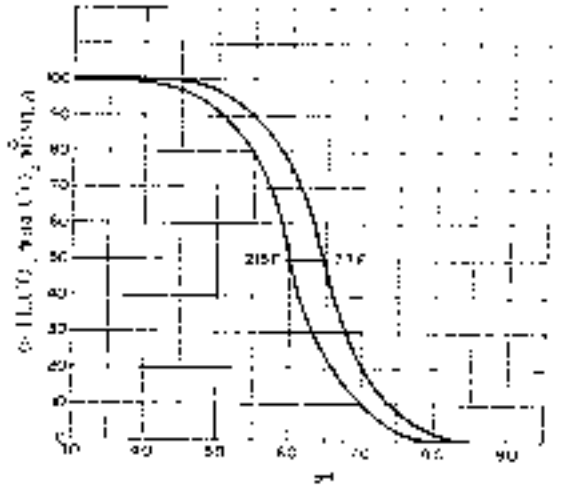
๑ เป็นความดันย่อยของ CO_2 ในบรรยากาศ



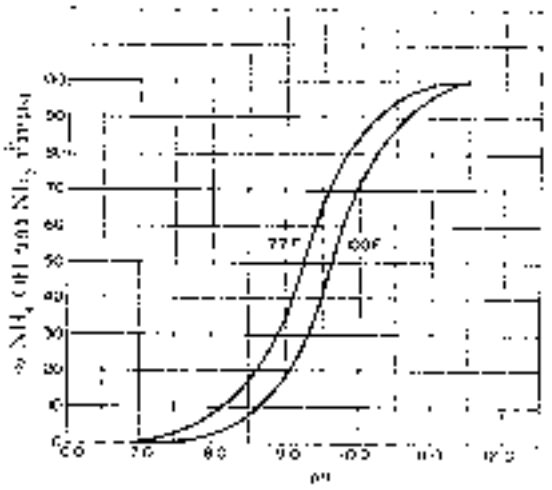
รูปที่ 4.7 อัตราการละลายของหินปูนในน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ



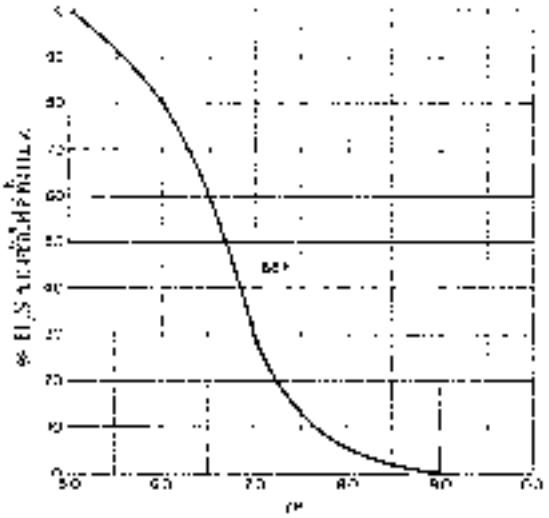
รูปที่ 4.8 การละลายของหินปูนในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 ร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายได้ที่ pH ต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 ขีดละของก๊าซแอมโมเนียที่ละลายได้ที่ pH ต่าง ๆ



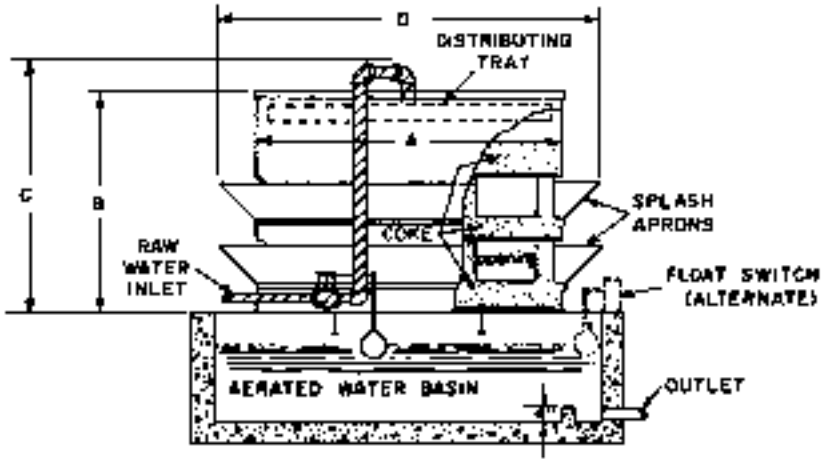
รูปที่ 4.5 ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ขจัดได้ที่ pH ต่าง ๆ

วิธีการใส่ก๊าซเพื่อเติมอากาศในน้ำดังกล่าวนี้ยังมีวิธีการอื่นอีกหลายวิธี เช่น การใช้เครื่องกลเติมอากาศ ที่สามารถขจัดก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำได้ และวิธีการออกซิเดชัน (Oxidation) การเติมอากาศโดยใช้เครื่องใส่ก๊าซ (Aerator) ที่นิยมใช้ในโรงงานกรองน้ำ มีดังนี้

1. ปริมาณก๊าซที่ละลายในน้ำ
2. ขอบเขตหรือประสิทธิภาพการขจัด
3. มีการชะล้างเหล็ก แมงกานีส หรือสารอินทรีย์ต่าง ๆ หรือไม่
4. ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้งาน

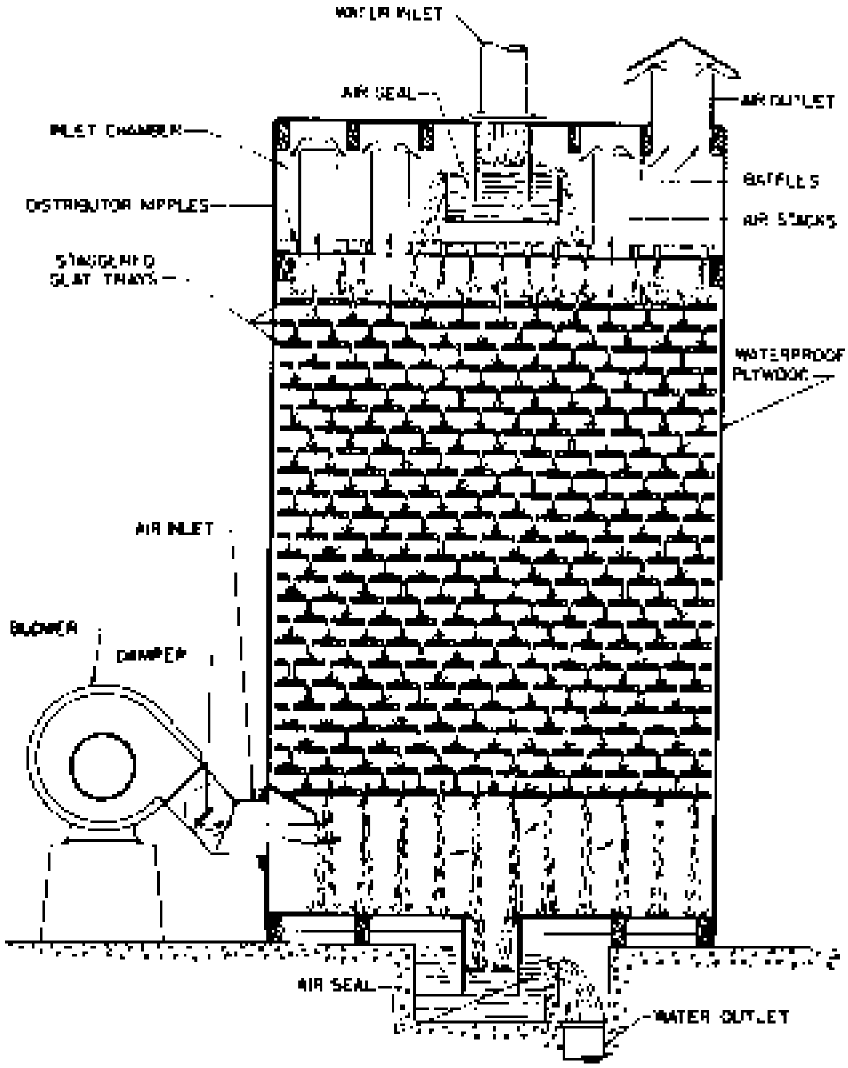
เมื่อการพิจารณาเรียบร้อยแล้ว ก็สามารถเลือกใช้เครื่องใส่ก๊าซแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. แบบถาดโค้ก (Coke-tray Aerator)
2. แบบทอดแบ่ง (Forced Draft Aerator)
3. แบบหอใส่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Decarbonator Tank)

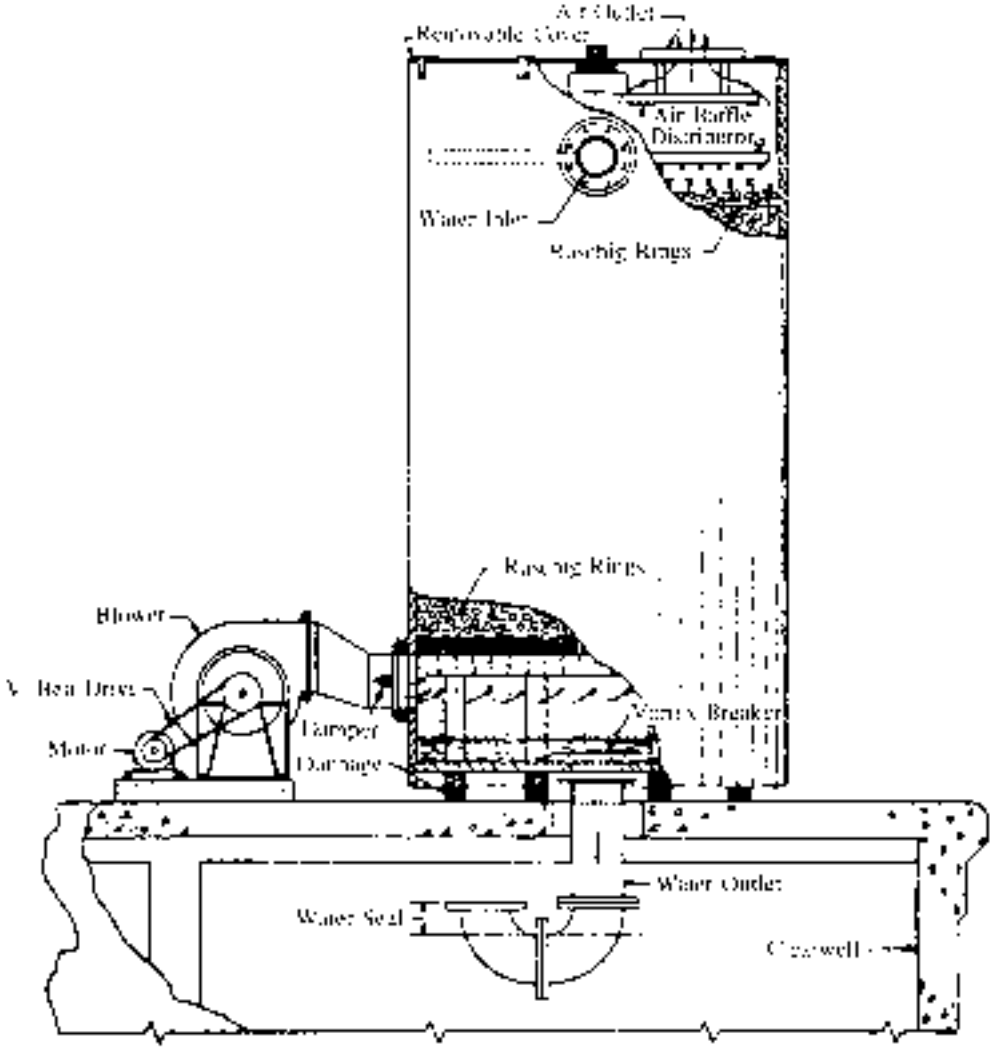


รูปที่ 4.6 เครื่องใส่ก๊าซแบบ Coke-tray Aerator

1. **เครื่องไล่ก๊าซแบบหอถ่านโค้ก** เหมาะที่จะใช้สำหรับการกำจัดเหล็กและแมงกานีส โดยการออกซิไดซ์กับออกซิเจนในอากาศ ส่วนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เป็นเพียงผลพลอยได้เท่านั้น ทั้งนี้เพราะการไล่ก๊าซจะเกิดได้มากน้อยเพียงใดขึ้นกับสภาพบรรยากาศ เช่น มีลมแรงหรือไม่ การไล่ก๊าซนี้จึงไม่สามารถจะกำหนดได้ว่า สามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่าใด โครงสร้างเป็นหอรูปทรงกระบอกหรือสี่เหลี่ยม ทำเป็นถาดเป็นชั้น มีราว 3-4 ชั้น ในแต่ละชั้นจะมีถ่านโค้กบรรจุอยู่ ถ้าเลือกใช้ของที่หาได้ในท้องถิ่น ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหอ โดยคิดเป็นอัตราการรับภาระของหอ (Loading) เท่ากับ ๕๐ ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ในการติดตั้งจะตั้งหออยู่บนถังพัก เพื่อให้น้ำที่ไหลผ่านถาดของหอผ่านชั้นถ่านโค้กต่าง ๆ ซึ่งจะไหลกระเซ็นกระจายไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดถ่านลงสู่ถังพักข้างใต้ เมื่อลงสู่ถังพักแล้วควรจะปล่อยทิ้งไว้ระยะหนึ่งเพื่อจะตกตะกอนหรือกรอง ในกรณีที่ใช้ในการกำจัดเหล็กนั้นต้องพักน้ำไว้ในถังอยู่ 15-30 นาที ขณะเดียวกันก็ต้องพักน้ำในถังนี้ เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีและการตกตะกอนมีเวลามากพอที่จะละลายหรือตกตะกอนได้สมบูรณ์



รูปที่ 4.7 เครื่องไล่ก๊าซแบบหอลมเร่ง (Forced Draft Aerator)

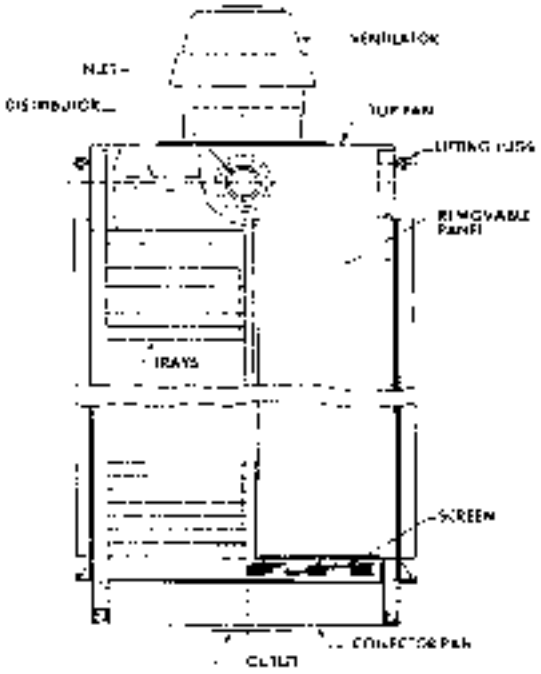


รูปที่ 4.8 หอคอยบรรจุ Raschig Ring

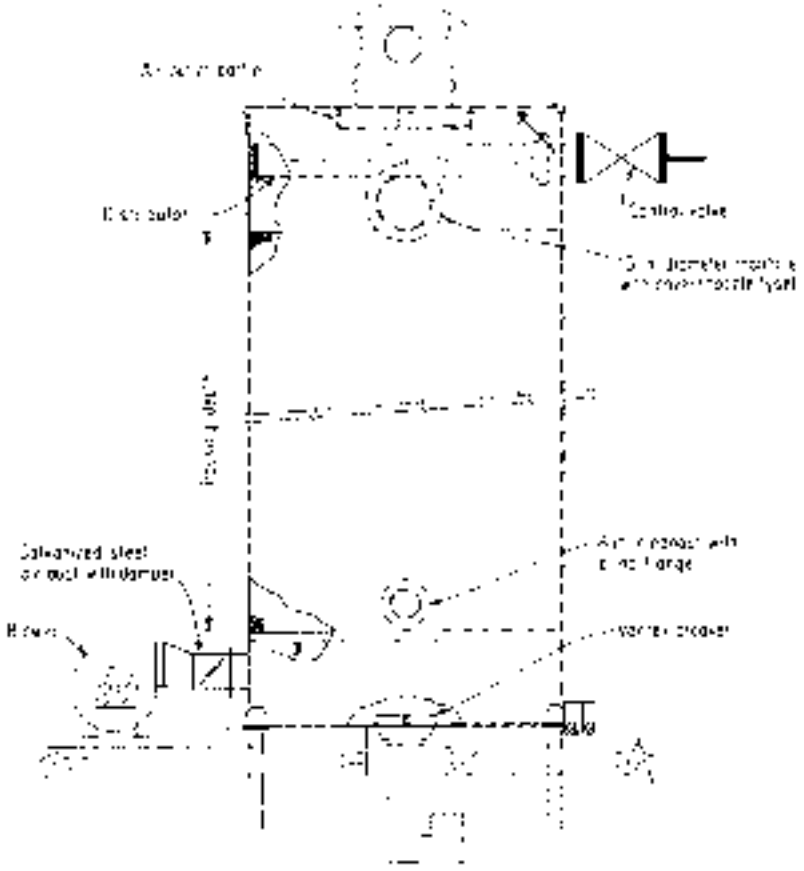
2. **เครื่องใส่ก๊าซแบบหอคอยแรง** เป็นเครื่องที่ใช้ในการดูดก๊าซเข้าสู่ของเหลว โดยอาศัยแรงดันของของเหลวที่ไหลผ่านหัวฉีดหรือคอคอด ทำให้เกิดความดันต่ำขึ้นที่บริเวณนั้น ก๊าซจึงถูกดูดเข้ามาผสมกับของเหลวได้ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นเครื่องใส่ก๊าซแบบหอคอยแรงที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นหัวฉีดหรือคอคอด ส่วนที่เป็นท่อผสม และส่วนที่เป็นดิฟฟิวเซอร์ ของเหลวที่ไหลผ่านหัวฉีดหรือคอคอดจะมีความเร็วสูงขึ้น ทำให้ความดันบริเวณนั้นต่ำลง ก๊าซจึงถูกดูดเข้ามาผสมกับของเหลวในส่วนที่เป็นท่อผสม ของผสมระหว่างของเหลวกับก๊าซจะไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ของของผสมให้เป็นพลังงานศักย์ ทำให้ความดันของของผสมสูงขึ้น ก่อนที่จะไหลออกจากเครื่องใส่ก๊าซ ในการออกแบบเครื่องใส่ก๊าซแบบหอคอยแรงนี้ ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้ คือ ความดันของของเหลวที่ไหลผ่านหัวฉีดหรือคอคอด ขนาดของหัวฉีดหรือคอคอด ขนาดของท่อผสม และมุมของดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์กันอย่างซับซ้อน ดังนั้นในการออกแบบเครื่องใส่ก๊าซแบบหอคอยแรงจึงต้องอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของเครื่องไล่ก๊าซแบบหลุมก่อสร้าง Degassing ที่ใช้ในการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของ ฟูส เมอร์ริน ฯ ชั้น

ความจุ (แกลลอนน้ำหนัก)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ฟุต นิ้ว)	พื้นที่ภายใน (ตารางฟุต)	ขนาดเครื่องแปรรวม	
			ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที	แรงม้า
03	2'	3.1	9	¼
147	2' 6"	4.9	14	¼
330	3'	7.1	21	½
588	3' 6"	9.6	28	½
918	4'	12.6	37	½
1320	5'	19.6	58	¾
1796	6'	28.3	84	1
2,346	7'	38.5	1,100	1½
2,970	8'	50.3	1,500	2
3,666	9'	63.6	1,900	2½
4,434	10'	78.5	2,300	3
5,274	11'	95.0	2,800	3½
6,180	12'	113.0	3,400	4



รูปที่ 4.9 เครื่องไล่ก๊าซแบบลมดูดเป็นรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.18 ตัว Deaerbonator

3. เครื่องไล่ก๊าซแบบใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแบบที่ [illegible] ปล่อยให้ [illegible] ไหลขึ้นไปข้างบน มีช่องให้น้ำไหลแบบสวนทางกับก๊าซลงมาข้างล่าง [illegible] ทำการพ่นน้ำเข้าไปในถังเพราะมีเครื่องมือให้ไหลช้าลงกว่าแบบแรก แต่เครื่องจะมีความยุ่งยากกว่า ถ้าปริมาณน้ำมากจะใช้เวลานาน แบบนี้นิยมใช้ในการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำจากน้ำที่ผ่านการ Hydrogenation Exchanger ของระบบ Ion Exchange Resin ในการปรับสภาพน้ำ เพราะมีเครื่องมือที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพสูง ข้อดีของเครื่องนี้ [illegible] ขนาดเล็กลงมาก [illegible] ความสูงไม่น้อยกว่า 20 เมตร ขึ้นอยู่กับ [illegible] ของน้ำ [illegible] ของน้ำ [illegible] ต่อนาที

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการทำงานของ Deaerbonator Tank

ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำก่อนเข้าหอ (พีพีเอ็ม)	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ผ่านหอ (พีพีเอ็ม)
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]

บรรณานุกรม

1. AWWA. **Water Quality and Treatment.** New York : McGraw - Hill Book Co., 1971.
2. Betz. **Handbook of Industrial Water Conditioning.** 8th edition. Betz Laboratories, 1967.
3. Betz. **Handbook of Industrial Water Conditioning.** 9th edition. Betz Laboratories, 1980.
4. Body, W.M.T. and S.G. G.S. **Water Treatment Data** London : Hutchinson Co., 1967
5. Japan Water & Wastewater Association. **Water & Wastewater Treatment Handbook.** Tokyo : Maruzen Publishing Co., 1978.
6. Kemmer, F.N. The **NALCO Water Handbook.** New York : McGraw - Hill Book Co., 1979.
7. Ostroff, A.G. **Introduction to Oil Field Water Technology.** New Jersey : Prentice-Hall, 1965.
8. The Permutit Co. **Permutit Technical Bulletin** No. 5612.
9. The Permutit Co. **Permutit Technical Seminar Manual.** 1974

5 การขจัดเหล็กและแมงกานีส

เหล็กส่วนใหญ่ในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน (น้ำบาดาล) จะอยู่ในรูปของเหล็กเฟอรัส (Fe^{++}) หรือเป็นสารอินทรีย์เชิงซ้อน ที่พบในน้ำ เหล็กจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต ที่ pH และน้ำบาดาลต่ำกว่า 8 เหล็กจะอยู่ในสภาพของฟอสเฟอรัส (Fe^{++}) ซัลเฟต เหล็กในน้ำบาดาลจากชั้นหินอัคนี หินทราย (Sandstone) หินดินดาน (Shale) ที่มีการเฟอรัสไบคาร์บอเนตในน้ำบาดาล จะถูกกำจัดด้วยการระบายอากาศ ออกซิไดส์ไบคาร์บอเนต ที่ pH ปกติระหว่าง 6 - 8 และมีไนเตรทผสมอยู่ด้วยจะมีเฟอรัสไบคาร์บอเนต 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือน้อยกว่านี้ เหล็กยังเกิดจากสินแร่เหล็กต่อและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีสนิม และเกิดจากแบคทีเรียพวก Iron Bacteria ชนิด Crenothrix

สำหรับแมงกานีสนั้นในแหล่งน้ำจากธรรมชาติเหมือนเหล็ก ในน้ำบาดาลปกติจะมีอยู่น้อยหรือไม่มีเลย ถ้ามีก็จะอยู่ในรูปของแมงกานีส (Mn^{++}) ที่เป็นเกลือของไอออนหรือเป็นสารเชิงซ้อน ที่จะละลายได้ในน้ำ และที่พบส่วนมากจะอยู่ในรูปของคาร์บอเนต แมงกานีสในน้ำบาดาลส่วนมากจะมาจากชั้นหินปูน หรือหินแกรี่ ซึ่งจะอยู่ในรูปของแมงกานีสออกไซด์และไฮดรอกไซด์ เมื่อสภาพรีดิวซ์มีขึ้น เหล็กและแมงกานีสในรูปไบคาร์บอเนตจะเปลี่ยนจากสภาพที่ไม่ละลายเป็นสภาพที่ละลายได้ เหมือนกับเหล็ก การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ เพราะสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในดินจะสลายตัวจึงต้องการออกซิเจนและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดสภาพรีดิวซ์ เมื่อน้ำซึมผ่านดิน การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำเป็นกรดคาร์บอนิก ทำให้ pH ลดลง ซึ่งจะส่งเสริมสภาพรีดิวซ์ยิ่งขึ้น ถ้าน้ำไม่มีโอกาสสัมผัสกับอากาศ เหล็กและแมงกานีสจะอยู่ในสภาพเป็นสารละลาย เช่น ในน้ำบาดาล เมื่อดูดน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ เหล็กจะอยู่ในสภาพเป็นคอลลอยด์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสารแขวนลอย สารอินทรีย์เชิงซ้อนของเหล็กและแมงกานีสเกิดขึ้นจากการรวมตัวของไอออนเหล็กและแมงกานีสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ โดยที่เหล็กและแมงกานีสจะอยู่ตรงกลาง มีสารอินทรีย์ล้อมรอบอยู่ จึงทำให้ถูกออกซิไดซ์ได้ยากกว่าเนื่องจากมีสารอินทรีย์เป็นเกราะป้องกัน

สรุปแล้ว เหล็กและแมงกานีสพบได้ในรูปต่าง ๆ ดังนี้

1. เหล็กและแมงกานีสที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble Iron and Manganese)
2. เหล็กและแมงกานีสที่เป็นสารละลาย (Soluble Iron and Manganese)
3. สารอินทรีย์เหล็กและแมงกานีส (Organic Iron and Manganese)
4. Combination ทั้งสิ้นทั้ง 3 แบบ ข้างต้นในน้ำใต้ดิน

วิธีกำจัดเหล็กและแมงกานีส แบ่งได้ 3 แบบ คือ

(1) *การตกตะกอนและกรอง (Precipitation and Filtration)*

(ก) เติมอากาศ (Aeration) ซึ่งให้ตะกอนและกรอง

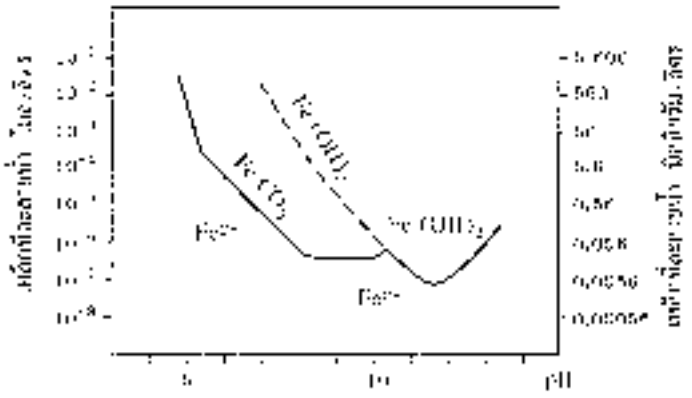
(ข) ออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ ด่างทับทิม ($KMnO_4$) ตะกอนและกรอง

(ค) การจับตัว (Coagulation) ตกตะกอนและกรองด้วยสารส้ม เฟอร์ริกซัลเฟต และด่าง ระบบวาบด้วย ปูน โซดา (Lime Soda Softening)

(2) *การผลัดเปลี่ยนอิออน (Ion Exchange)*

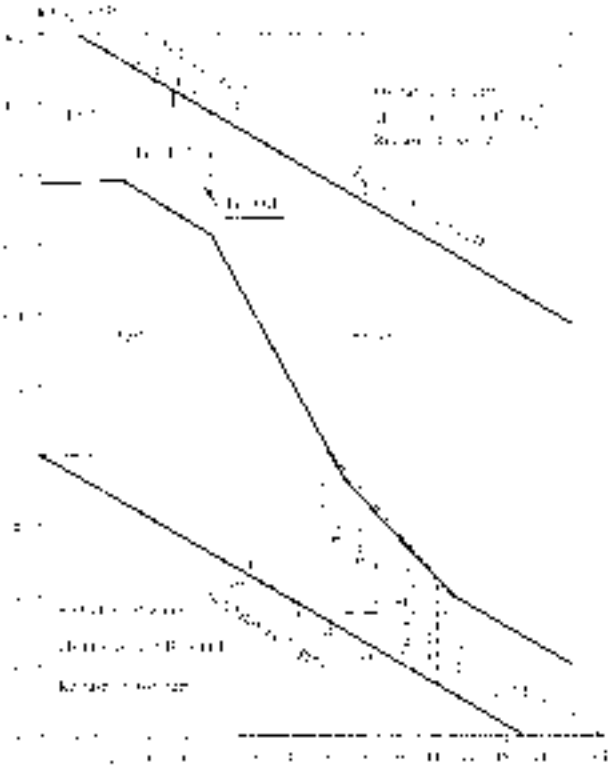
(ก) Ion Exchange Resin

(ข) Manganese Zeolite or Manganese Greensand



รูปที่ 8.1 การละลายของเหล็กที่ขึ้นกับค่า pH ของน้ำที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน

(3) *ใช้สารคีเลท (Chelating Agent) จับเหล็กและแมงกานีสให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อน* เหล็กที่อยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปแบบใดนั้นขึ้นกับค่า pH และ Oxidation-reduction Potential ดังแสดงในรูปที่ 8.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กที่อยู่ในสภาพที่ละลายน้ำ เช่น Fe^{2+} หรือ $FeOH^{+}$ จะเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กที่ตกตะกอนได้ เช่น $FeCO_3$, $Fe(OH)_2$ หรือ $Fe(OH)_3$ โดยการเพิ่มความต่างศักย์ออกซิเดชัน หรือ pH หรือทั้ง สองอย่าง



รูปที่ 5.3 pH potential ไดอะแกรมสำหรับเหล็ก ส่วนบริเวณที่เหล็กจะตกตะกอนได้ (TAC = คือ M-Alkalinity)

5.1 เหล็กและแมงกานีสที่ไม่ละลายน้ำ

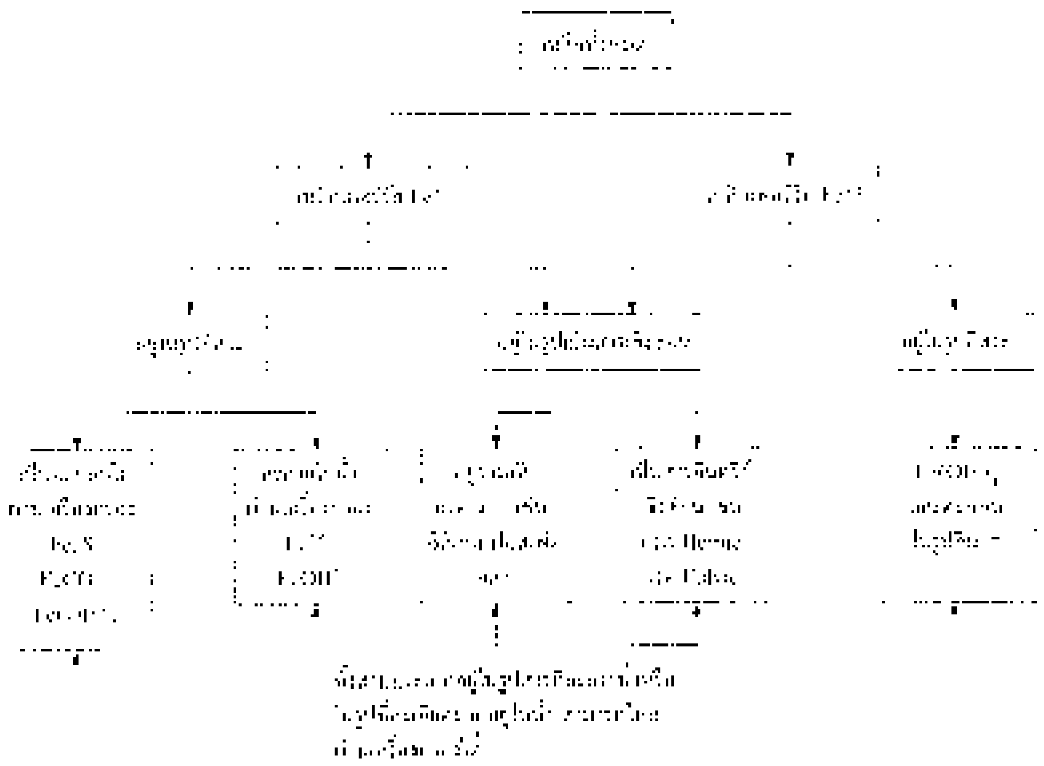
เนื่องจากทั้งเหล็กและแมงกานีสอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องออกซิไดซ์เพื่อกำจัดออกโดยการตกตะกอน และกรอง เนื่องจากการกรองจะสามารถกำจัดได้ ซึ่งเหล็กจะตกตะกอนอยู่ใน Sludge Blanket ด้วยการปรับค่าพีเอชเพียงเล็กน้อยก็สามารถกำจัดได้ดีมากแล้ว

5.2 เหล็กและแมงกานีสที่เป็นสารละลาย

5.2.1 การเติมอากาศ (Aeration or Air Oxidation)

น้ำดิบเมื่อได้รับออกซิเจนในอากาศ เนื่องจากในน้ำมีไบคาร์บอเนตละลายอยู่มาก เหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำจึงมักอยู่ในรูปของเหล็กไบคาร์บอเนต (Ferrous bicarbonate) ซึ่งละลายได้ดีและไม่มีสี เมื่อออกซิเจนในอากาศไปออกซิไดซ์จะเปลี่ยนเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ซึ่งจะตกตะกอนและจะมีสีน้ำตาล (ประมาณ 1 พีพีเอ็ม) การออกซิไดซ์จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อน้ำมีค่าพีเอชสูงกว่า 7.0 หรือมากกว่า ถ้าน้ำมีค่า pH ต่ำกว่านี้ปฏิกิริยาก็จะเกิดช้ามาก

$$4Fe(HCO_3)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8CO_2$$



[illegible]

ในทางทฤษฎี ออกซิเจน 0.14 พีพีเอ็ม จะออกซิไดซ์เฟอร์รัสอิออน 1 พีพีเอ็ม

สำหรับแมงกานีสในคาร์บอเนตซึ่งไม่ค่อยละลายน้ำ [illegible] แต่ pH ควรสูงกว่า 10 [illegible] ให้มีการออกซิไดซ์ที่สมบูรณ์ [illegible] pH ให้มากกว่า 10 ที่ pH ต่ำกว่านี้ [illegible] pH [illegible] pH จะเพิ่มขึ้นทันที

ในทางปฏิบัติ ออกซิเจน 0.25 พีพีเอ็ม จะตกตะกอนเหล็ก 1 พีพีเอ็ม

ออกซิเจน 0.26 พีพีเอ็ม จะตกตะกอนแมงกานีส 1 พีพีเอ็ม

[illegible] Coke Tray Aerator [illegible] (Forced Draft Aerator) [illegible] (Degasifier) [illegible] Coke Tray Aerator [illegible]

[illegible] Degasifier [illegible] Tray [illegible]

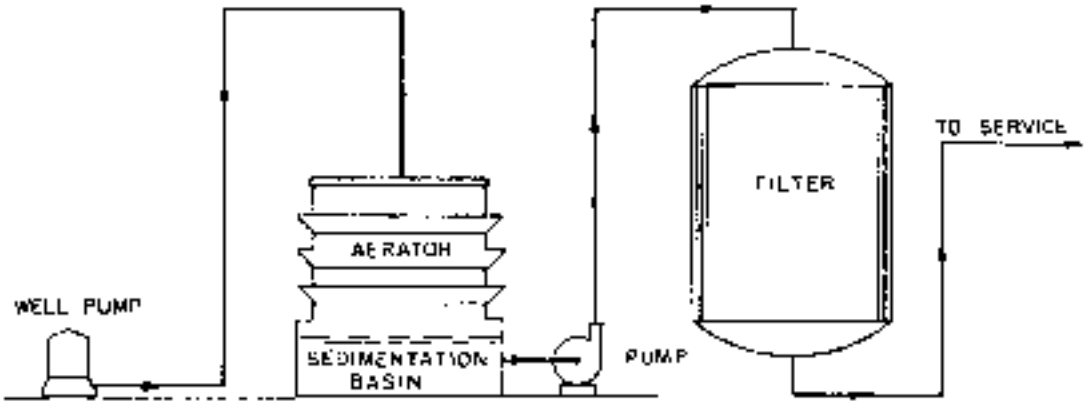
การเติมอากาศให้ผลสองทางคือ

1. ช่วยในการออกซิไดส์สารบางชนิดและแก๊สต่างๆ
2. ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำ ซึ่งจะช่วยเพิ่ม pH

เมื่อน้ำผ่านการเติมอากาศแล้วจะต้องไหลมาพักอยู่ในถังพักเป็นเวลา 15 นาที จนถึง 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตกตะกอนเหล็กและแมงกานีสที่ตกค้างอยู่ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ตะกอนเหล็กและแมงกานีสนี้ไหลออกไปกับน้ำและสะสมอยู่ในหน่วยกรองได้ ถังพักนี้อาจเป็นแบบเรื่องกรอง ใดก็มีอัตราการกรองประมาณ 2-3 แกลลอนต่อตารางฟุต เครื่องกรองจะแตกต่างกันแล้วแต่ความมีสิทธิ์ก่อน (ความต้องการของลูกค้า) ระบบขั้นตอนวิธีการที่ใช้กำจัดเหล็กหรือแมงกานีสในคาร์บอเนตเท่านั้น ไม่สามารถกำจัดเหล็กและแมงกานีสที่มีสารอินทรีย์ห่อหุ้มอยู่ หรือเหล็กและแมงกานีสที่มีสภาพเป็นอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งสามารถผ่านเครื่องกรองได้

ตารางที่ 5.1 ขนาดและลักษณะของ Diagonal-Bed แบบสี่เหลี่ยมมีลมเป่าช่วยเติมอากาศขนาด 4 ฟุต ถึง 6 ฟุต

ขนาดความรุนแรงของฝนตกต่อนาที	ขนาดด้านสี่เหลี่ยม (ฟุต)	พื้นที่หน้าตัดของถัง (ตารางฟุต)	ขนาดของเครื่องเป่าลม (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)	แรงม้าของเครื่องเป่าลม
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
120	2.0	1	120	1.5
240	3	3	240	1.7
360	4	4	360	2.5
540	5	5.5	540	3.5
1,080	7	38	1,080	5.0
1,440	8	64	1,440	7
2,160	10	105	2,160	10 to 12
3,240	12	144	3,240	15
4,320	14	196	4,320	20
5,760	16	256	5,760	25



* *Iron Removal by Aeration, Settling and Filtration*

รูปที่ 5.3 Oxidation, Aeration & Filtration

5.2.2 ออกซิไดซ์ด้วยไฮโปคลอไรต์ คลอรีนหรือคลอรีนไดออกไซด์ และด่าง

ไฮโปคลอไรต์จะให้ในรูปของแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ก๊าซคลอรีน และคลอรีน ไดออกไซด์ สารเหล่านี้ทั้งหมดเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงกว่าออกซิเจนมาก เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาการออกซิไดซ์เหล็กและแมงกานีสจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ แต่ก็ไม่สามารถจะออกซิไดซ์เหล็กและแมงกานีสในรูปสารอินทรีย์ได้ นอกจากนี้ ในการใช้งานจริงถังสัมผัสมักจะมีขนาดไม่ใหญ่ จะมีคลอรีนหลงเหลือไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์บางชนิดในน้ำ ซึ่งทำให้มีกลิ่นและรสชาติที่ดีแปลกปลอม วิธีนี้ใช้กับน้ำที่มีปริมาณเหล็กไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีมังกานีสอยู่ด้วย ๑ เช่น สี ๑ แมงกานีส และสีน้ำเงิน ก็ขจัดได้ในเบื้องต้น ๑ ในทางปฏิบัติจะใช้คลอรีนไม่น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ถ้าใช้ก๊าซออกซิเจนออกซิไดซ์แมงกานีส จะต้องปรับ pH ของน้ำให้เป็นด่างราว pH 9-9.5 ถ้าใช้คลอรีนก็ต้องใช้คลอรีนในปริมาณมากเช่นกัน ซึ่งจะต้องมีการเติมด่างเพื่อรักษาความเป็นกรดด่าง ถ้าใช้คลอรีนไดออกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโอโซน ก็จะออกซิไดซ์ Mn^{+2} เป็น MnO_2 และตกตะกอนในรูปแมงกานีสไดออกไซด์

$$Mn^{+2} + 2ClO_2 + 2H_2O \longrightarrow MnO_2\downarrow + 2O_2 + 2Cl^- + 4H^+$$

$$3Mn^{+2} + 2MnO_4^- + 2H_2O \longrightarrow 5MnO_2\downarrow + 4H^+$$

$$Mn^{+2} + O_3 + H_2O \longrightarrow MnO_2\downarrow + O_2 + 2H^+$$

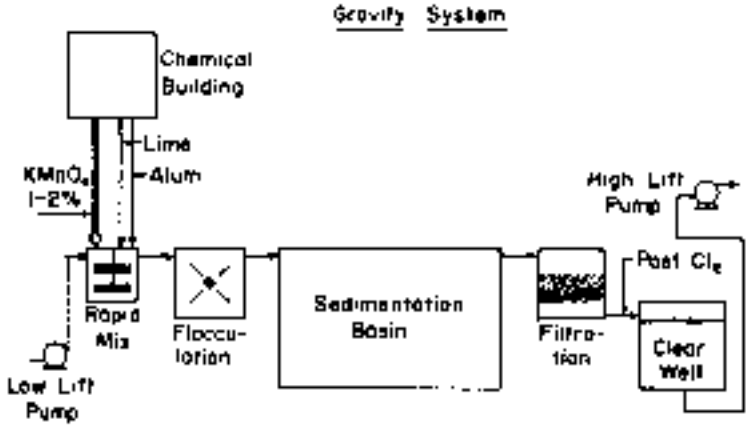
การเติมสารในการออกซิไดซ์ Mn^{+2} 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องการสารเคมีตามปฏิกิริยานี้

ClO_2	2.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
$KMnO_4$	1.9	มิลลิกรัมต่อลิตร
O_3	0.87	มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณที่ใช้จริงในทางปฏิบัติขึ้นกับค่า pH และสภาพทางปฏิกิริยา และการมีสารอินทรีย์ในน้ำ

5.2.3 ตกตะกอนด้วยการสัมผัสกับด่างที่ฟุ้งขึ้น

โดยการเติมด่างที่ฟุ้งขึ้น (โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต) พร้อม ๆ กับสารส้ม หรือสารเคมีที่ช่วยในการรวมตะกอนเข้าด้วยกัน ๆ ลงในหน่วย Flash Mix หรือ Rapid Mix ของระบบกระบวนการประกอบ มีตัวอย่างที่



รูปที่ 5.4 ระบบตกตะกอนในขั้นตอนโดยใช้ด่างฟุ้งขึ้น

Pennsylvania Water Treatment Plant ซึ่งกำจัดแมงกานีสในน้ำดิบที่มีปริมาณแมงกานีส 4 มิลลิกรัมต่อลิตร (พีพีเอ็ม) โดยการเติมด่างทับทิมในอัตราส่วน 1.5 ต่อ 1 ของปริมาณแมงกานีสในน้ำดิบ และระบบสามารถให้ผลการกำจัดได้ตามมาตรฐานน้ำดื่มของประเทศสหรัฐอเมริกา วิธีนี้เรียกว่าจัดทั้งเหล็กและแมงกานีส

5.2.4 ในการผสมการ ปูน-โซดา

โดยการเติมปูนขาวและโซดาแอช ตามแบบในการทำอัดตะกอนการล้าง ซึ่งจะทำปฏิกิริยาใน Sludge Contact Clarifier โดยใช้ค่า pH ให้เป็นไปตามค่าที่ได้กับ Isoelectric Point ที่ pH 9.5 จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$4Fe(HCO_3)_2 + 4Ca(OH)_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 3H_2O + 8CaCO_3 + 6H_2O + O_2$$

$$2Mn(HCO_3)_2 + 2Ca(OH)_2 + 2O_2 \rightarrow 2MnO_2 \cdot H_2O + 2CaCO_3 + 2H_2O$$

ทั้งเหล็กและแมงกานีสจะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์

ในระบบการปูน-โซดาที่เติมปูนขาวเพื่อขจัดความกระด้าง ซึ่งจะทำให้ pH ของน้ำสูงขึ้น ภาวะน้ำมีสภาพเป็นด่างนี้เหมาะสมในการขจัดเหล็กและแมงกานีสที่ pH 9.2 เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนได้ดีกว่าและตกตะกอนได้ดีที่ pH 10.5 เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนรวมตัวกับ O_2 ดังรูปที่ 5.2 น้ำที่มีสภาพ Redox Potential สูง Fe^{+2} ในน้ำจะตกตะกอนในรูปของ $Fe(OH)_3$ ได้

$$Fe^{+2} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^-$$

ในกรณีที่จะขจัดแมงกานีสแมงกานีสจะตกตะกอนอยู่ในรูปของแข็งที่ pH 9.2 และไฮดรอกไซด์ที่ pH 10.5

5.2.5 ใช้ Ion Exchange Resin

ใช้เรซินที่เป็น Na form จับเหล็กและแมงกานีสได้ดังกระบวนการน้ำกระด้าง วิธีการคือเป็นการผ่านน้ำไปยังถังทำน้ำอ่อน (Softener) ซึ่งจะดักทั้งความกระด้าง เหล็ก และแมงกานีสด้วย เมื่อจะใช้งานเรซินเสีย (Fouling) เนื่องจากมีการสะสมอยู่นานให้ล้างย้อนกลับด้วยไฮโดรคลอริกหรือซัลฟิวริก ซึ่งจะไปเคลือบเม็ดเรซินไว้ ทำให้เรซินเสื่อมสภาพได้ ดังนั้นต้องกำจัดเหล็กและแมงกานีสอยู่ในสภาพสารละลายตลอดเวลา และในน้ำจะต้องมีปริมาณอากาศและแมงกานีสในน้ำต่ำ นอกจากนี้เรซินในรูปของไฮโดรเจน (H-form) สามารถจับเหล็กและแมงกานีสกับคาร์บอเนต ทำให้เกิดตะกอนได้

$$2NaR + Fe(HCO_3)_2 \rightarrow FeR_2 + 2NaHCO_3$$

$$2NaR + Mn(HCO_3)_2 \rightarrow MnR_2 + 2NaHCO_3$$

NaR คือ Cation Exchanger - Sodium Form

R คือ Ion Exchange Resin

5.2.6 ออกซิไดซ์ด้วยแมงกานีสไดออกไซด์

แมงกานีสไดออกไซด์ที่ใช้ในการกรองน้ำ เรียกว่า Zeolite หรือ Greensand ซึ่งการกรองน้ำโดยใช้แมงกานีสไดออกไซด์นี้ จะทำให้ไอออนของแมงกานีสที่ละลายน้ำได้ (Soluble) หรือคอลลอยด์ (Colloidal) ที่ทำให้น้ำขุ่น

5.2.7 แมงกานีสซีโอไลต์–ด่างทับทิมและกรอง

ด่างทับทิมจะใช้ในระบบกรองกรดเหล็กและแมงกานีสที่ละลายน้ำได้ และตะกอนคอลลอยด์ของสารทั้งสองนี้

1. **เหล็ก** โดยการทดสอบ ด่างทับทิม ($KMnO_4$) 1 ส่วน จะออกซิไดซ์ 1.05 ส่วน ของเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟตในน้ำ เป็นเฟอร์ริกที่ไม่ละลายน้ำ

$$3Fe^{+2} + MnO_4^- \longrightarrow 3Fe^{+3} + MnO_2 \downarrow \qquad \text{.....(11)}$$

แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่า ปริมาณด่างทับทิมที่ใช้ออกซิไดซ์เหล็กได้จะมากกว่าน้อยกว่าเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำนั้นด้วย ถ้าน้ำมีค่าความเป็นกรดอิสระอยู่ ปริมาณด่างทับทิมที่ต้องการจะมีมากกว่าที่คำนวณได้จากสมการ (11) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไปดังนี้

$$Fe^{+3} + MnO_2 \qquad \rightarrow \quad Fe^{+3}{}_{\downarrow} + Mn_2O_{2\downarrow} \qquad \text{.....(12)}$$

จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาออกซิไดซ์เกิดขึ้นเอง ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นคือ MnO_2 และ Mn_2O_3 ที่ให้ผลเป็น Catalytic Oxidation ซึ่งทำให้ตะกอนที่ละลายน้ำได้ออกมาเป็นตะกอนหมด ปริมาณการใช้งานและความถี่ของการล้างน้ำย้อนกลับขึ้นอยู่กับค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าด่างทับทิม (Permanganate Demand Test) และความต้องการใช้น้ำล้างย้อนกลับ (Backwash Water Requirement) ที่ได้จากการทดสอบ

2. **แมงกานีส** ปฏิกิริยาออกซิไดซ์แมงกานีสก็คล้ายกับเหล็กของเหลว ในการทดสอบ ด่างทับทิม 1 ส่วน จะออกซิไดซ์แมงกานีส 0.64 ส่วน แมงกานีสที่เป็นประจุ +2 จะถูกออกซิไดซ์เป็นประจุ +4

$$3Mn^{+2} + 2MnO_4^- \qquad \rightarrow \quad 5MnO_{2\downarrow} \qquad \text{.....(13)}$$

แต่ในการทำน้ำประปาจริงๆ ปริมาณด่างทับทิมที่ใช้จะไม่เป็นไปตามสมการข้างต้น ในแต่ละปีมีแมงกานีสในรูปไอออนเป็นจำนวนมาก ขณะเดียวกันจะมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการต่อไปนี้ (14)

$$Mn^{+2} + MnO_2 \qquad \rightarrow \quad Mn_2O_{3\downarrow} \qquad \text{.....(14)}$$

$$Mn^{+2} + MnO_2 \qquad \rightarrow \quad Mn_3O_{4\downarrow} \qquad \text{.....(15)}$$

$$Mn^{+2} + MnO_2 \qquad \rightarrow \quad MnO \cdot Mn_2O_{3\downarrow} \qquad \text{.....(16)}$$

ปริมาณที่ใช้ในการกรองเป็นด่างทับทิม 2 ส่วน ต่อแมงกานีส 1 ส่วน ถ้าน้ำมีค่าความเป็นกรดสูงมาก ก็ต้องการด่างทับทิมเพิ่มขึ้น

3. **ระบบกรองแรงดันใช้แรงดัน** ระบบนี้แบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

(1) ***ระบบล้างเป็นครั้ง ๆ*** (*Regenerative Batch*) ระบบนี้ใช้ทรายนิลซึ่งเป็นสารกรองไปแล้ว และทรายนิลที่ใช้ผลิตจาก Glauconite Greensand ในการปฏิบัติงานมีขั้นตอนต่างกันดังนี้

$$Na_2Z + Mn^{++} \rightleftharpoons MnZ + 2Na^{+} \qquad \text{.....(1)}$$

Manganese Zeolite

$$MnZ + KMnO_4 \rightleftharpoons ZMnO_2 + K \qquad \text{.....(2)}$$

Manganese Zeolite

ผลที่ได้ คือ ทรายนิลที่มีชั้นของแมงกานีสไดออกไซด์ปกคลุมอยู่ (Greensand ในระยะนี้จะเรียกว่าทรายนิลล้างแล้ว) ระบบกรองชนิดนี้ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสที่ละลายน้ำ และการกำจัดเหล็กและแมงกานีสที่ตกตะกอนแล้ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกำจัดเหล็กมีดังนี้

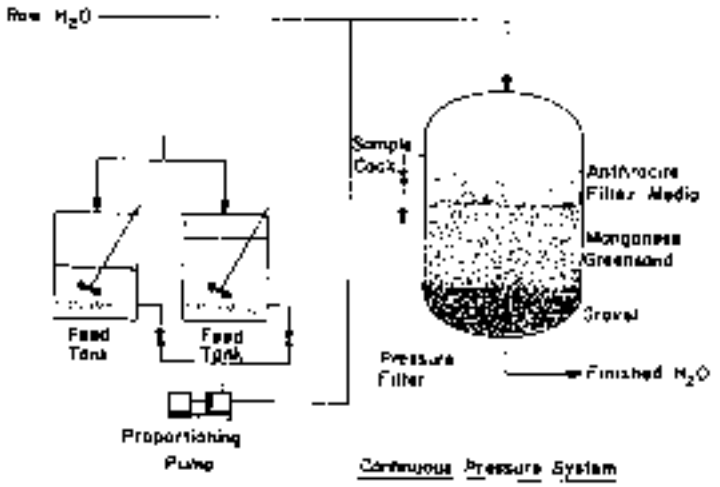
$$Z \cdot MnO_2 + \begin{matrix} Fe^{++} \\ Mn^{++} \end{matrix} \longrightarrow Z \cdot Mn_2O_3 + \begin{matrix} Fe^{+++} \\ Mn^{+4} \end{matrix} \qquad (3)$$

ความสูงของชั้นทรายนิลที่ระดับหลังล้างแล้วประมาณ 30 นิ้ว ปริมาณด่างทับทิมที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณของซิโอไลต์ เมื่อซิโอไลต์ถูกใช้งานไปแล้วระยะหนึ่ง ซิโอไลต์เสื่อมคุณภาพลงไป ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสลดลง จำเป็นต้องทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพของซิโอไลต์โดยการล้างด้วยสารละลายด่างทับทิมเข้มข้น ๆ และเป็นเวลานาน ๆ ทั้งนี้ ปริมาณและความเข้มข้นของด่างทับทิมที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณของซิโอไลต์ ปฏิกิริยาการฟื้นฟูประสิทธิภาพมีดังนี้

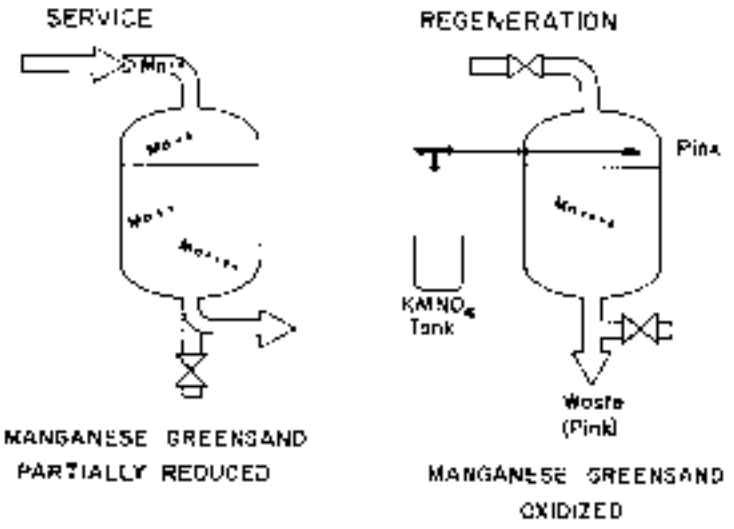
$$Z_2 \cdot Mn_2O_3 + KMnO_4 \rightleftharpoons 2Z \cdot MnO_2 \qquad \text{.....(4)}$$

ระยะเวลาล้างเพื่อฟื้นฟูประสิทธิภาพแล้ว ปริมาณแรงดันน้ำที่ใช้ล้างจะต่ำกว่าที่ใช้ตอนกรองประมาณ 5 psi สำหรับระบบนี้มีข้อจำกัดบางอย่าง คือ ห้ามใช้กับน้ำดิบที่มีเหล็กหรือแมงกานีสมากกว่า 1 พีพีเอ็ม ถ้าหากน้ำมีเหล็กหรือแมงกานีสมากกว่านี้ ต้องลดปริมาณการสูบจ่ายน้ำเข้าเครื่องกรองให้ลดลงที่ยังสามารถใช้กับน้ำที่มีเหล็กหรือแมงกานีสดังกล่าว ๆ ได้ดีอยู่ ปัจจุบัน

(2) ***ล้างทันทีเมื่อมีความจำเป็น*** เครื่องกรองชนิดนี้ไม่ต้องหยุดทำการล้างทันทีที่มีเหล็กหรือแมงกานีสสูงเกินกว่าที่ต้องการ แต่ทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพของซิโอไลต์ที่ระดับเวลาที่กำหนดไว้ ปกติทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ในวันหยุดงาน ซึ่งจะเป็นการสูญเสียน้ำล้างน้อยที่สุด ปริมาณการใช้ด่างทับทิมหรือแมงกานีสมากกว่า 1 พีพีเอ็ม ต้องเติมคลอรีนก่อนเข้าเครื่องกรอง ในปริมาณ 0.5 ppm ขึ้นไป ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสูญเสียซิโอไลต์ ปฏิกิริยาการกำจัดเหล็กและแมงกานีสมีดังนี้

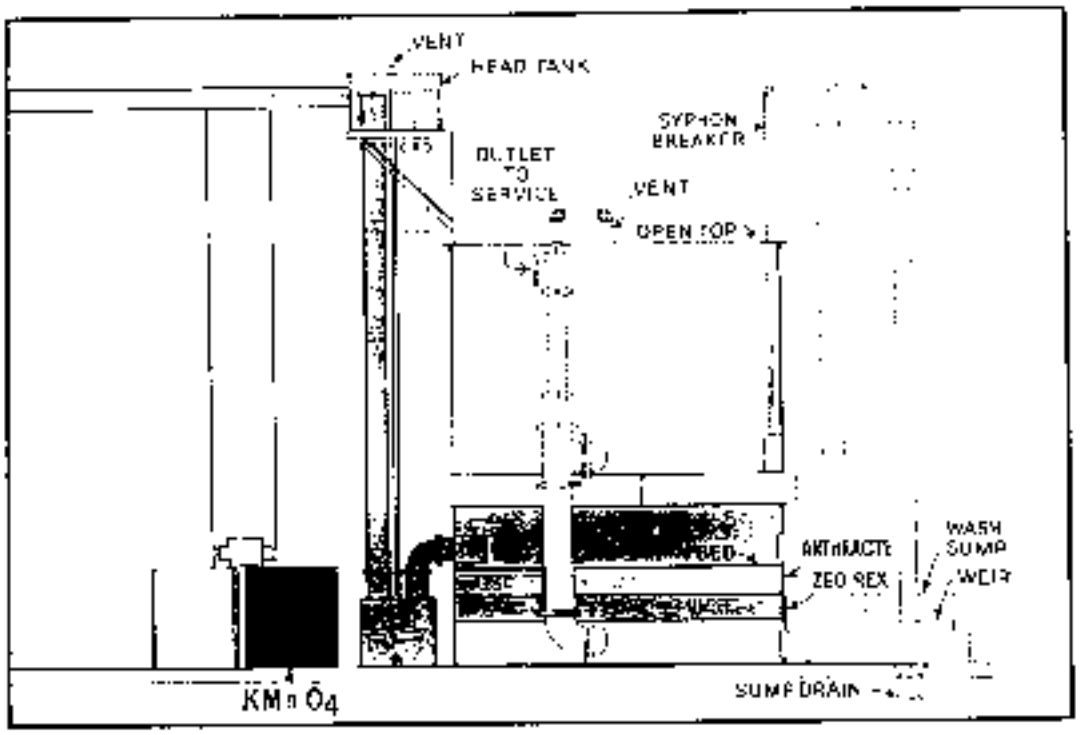


รูปที่ ... ระบบการกรองแบบใช้แรงดัน

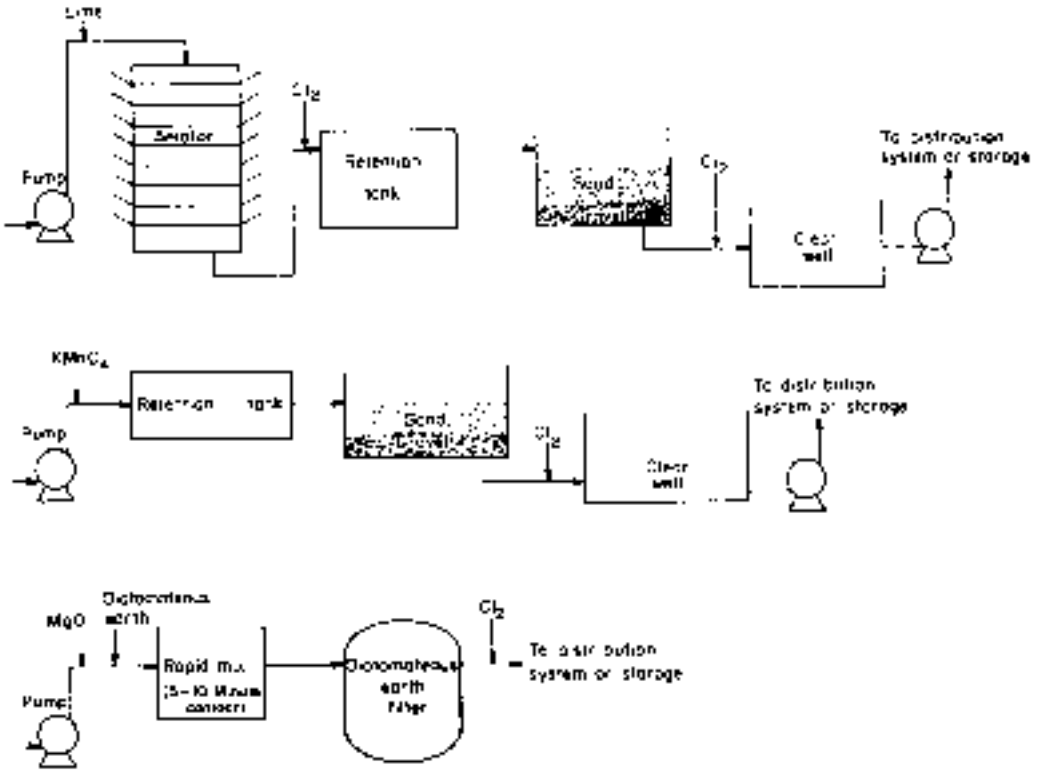


รูปที่ ... การฟื้นฟูประสิทธิภาพของ Manganese Greensand

๒. *ระบบป้อนสารทับทิมต่อเนื่อง (Continuous Permanganate Feed)* ระบบนี้จะมีการ[illegible]



รูปที่ 5.7 ระบบการกรองเหล็กและแมงกานีสโดยใช้สารกรองแมงกานีสเขียว



รูปที่ 5.5 ระบบการจัดและผสมสารเคมีแบบต่าง ๆ

ค. ระบบการกรองแบบอัตราเร็วปานกลาง (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในบทที่ 7)

ทรายกรองที่ใช้ควรใช้ทรายที่มี Effective Size 0.35-0.7 มิลลิเมตร และอัตราการกรอง 5-20 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. or 2-8 gpm/ตร.ฟุต ความลึกของชั้นทรายที่ใช้กรองประมาณ 60-90 ซม. ความลึกของน้ำ 2 ถึง 3 เมตร แต่ถ้าใช้ทรายหยาบ ก็สามารถเพิ่มอัตราการกรองได้ แต่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เช่น ปรับค่าพีเอช ฆ่าเชื้อโรค และเติมสารช่วยตกตะกอน เช่น สารส้ม หรือเฟอริกคลอไรด์ ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนของ $Fe(OH)_3$ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีกว่าตะกอนของ $Al(OH)_3$

ตัวอย่างการเพิ่มสารเคมีและผสมก่อนเข้าสู่ถังตกตะกอน (ดูรายละเอียดในบทที่ 6)

1. เติมสารส้ม
2. เติมปูนขาวให้ได้ค่า pH ประมาณ 7.0 หรือสูงกว่าเล็กน้อย
3. ผสมสารเคมีในถังผสมแบบกวนเร็ว 1-3 นาที
4. กวนด้วยเครื่องกลแบบช้า

ตารางที่ 5.2 ผลการบำบัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำ หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

น้ำบุคคที่	น้ำดิบ				น้ำที่ผ่านกระบวนการแล้ว				
	pH	คาร์บอนไดออกไซด์อิสระ	เหล็ก	แมงกานีส	pH	คาร์บอนไดออกไซด์อิสระ	เหล็ก	แมงกานีส
1	6.2	5	0.3	0.4	7.0	1		
2	6.2	10	0.2	0.3	7.1			
3	6.5	6	0.2	0.2	7.2	0		
4	6.3	8	0.5	0.3	7.0	1		
5	6.4	9	0.3	0.2	7.1	2		
6	6.5	8	0.4	0.4	7.2	1		
7	6.1	10	0.5	0.3	7.0	3		
8	6.3	12	0.4	0.3	7.1	1		
9	6.2	8	0.3	0.2	7.2	2		
10	6.1	9	0.4	0.3	7.0	2		
11	6.4	7	0.2	0.2	7.1			
12	6.2	6	0.3	0.2	7.0			
13	6.1	8	0.5	0.3	7.1			
14	6.3	5	0.2	0.2	7.0			
15	6.2	7	0.4	0.3	7.1	1		
16	6.1	8	0.3	0.2	7.0			

5.3 สารสังเคราะห์เหล็กและแมงกานีส มีวิธีการดังนี้

1. **ตกตะกอนด้วยสารส้มและกรอง** (Coagulation and Filtration) วิธีนี้ใช้สารส้มเป็นสารตกตะกอน ซึ่งสารส้มที่ใช้กันทั่วไปคือ อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) สารส้มจะละลายน้ำได้ดีในช่วง pH 6.5–7.5 ส่วนเหล็กจะตกตะกอนได้ดีที่ช่วง pH 8–10

2. **แมงกานีสซีโอไลต์-ล้างทับทิมและกรอง** วิธีการนี้ใช้แมงกานีสซีโอไลต์ (Manganese Zeolite) ซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของแมงกานีสที่เป็นประจุและแมงกานีสที่ละลายน้ำ

ถ้าหากพบเหล็กและแมงกานีสที่ไม่ละลายน้ำ ที่ละลายน้ำ และที่เป็นสารอินทรีย์อยู่ด้วยกัน ให้ใช้กระบวนการแมงกานีสซีโอไลต์-ล้างทับทิมและกรอง

5.4 การใช้สารเคมีบำบัดเหล็กและแมงกานีส

ใช้สารที่สามารถจับกับเหล็กเป็นสารเชิงซ้อน (Complex Formation)

ตัวอย่างสารเคมีที่จะใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในการผลิตน้ำประปา มีดังต่อไปนี้ ในแต่ละชนิดของสารเคมี ที่ใช้แล้วให้ผลดีในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส สามารถใช้ได้ดังนี้

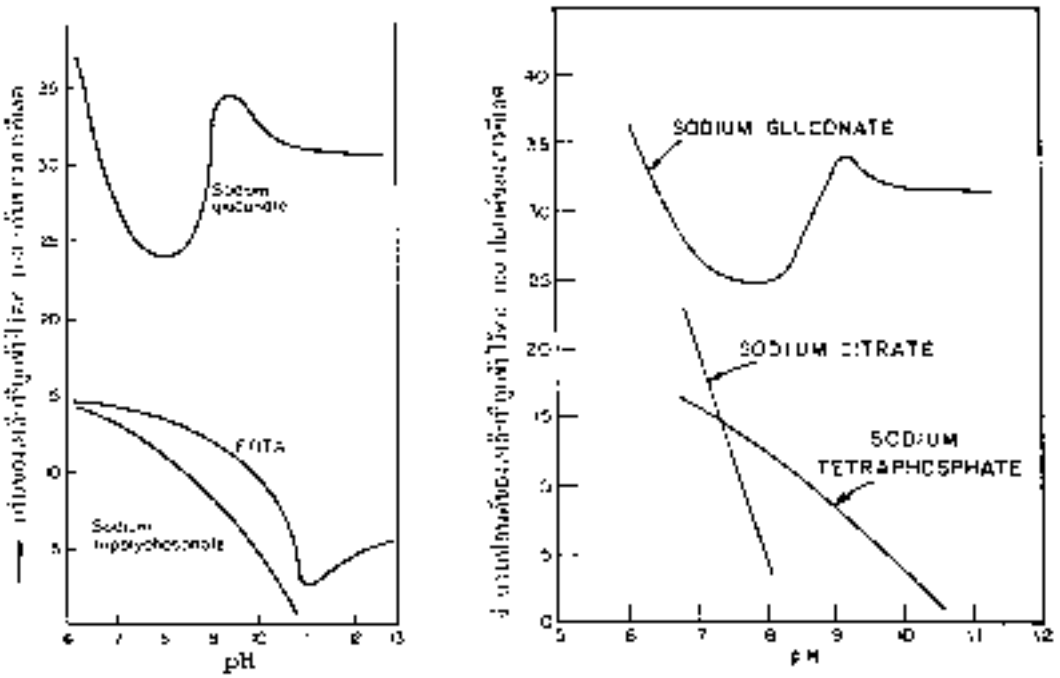
1. กรดไดเอทิลีนไตรอะมีนเพนตะอะซิติก DTPA (Diethylenediamine penta acetic acid)

2. กรดไนไตรโลอะซิติก NTA (Nitrilotriacetic acid)

3. HEDTA หรือ EDTA OH (N hydroxyethyl ethylenediamine triacetic acid) และกรดที่มีโมเลกุลซับซ้อนดังต่อไปนี้

4. กลุ่ม Hydroxycarboxylic เช่น กรด Gluconic, Tartaric และกรดซิตริก (Citric Acid)

5. กลุ่มฟอสเฟตต่างๆ เช่น Tetrasodium pyrophosphate, Sodium tripolyphosphate (STP) และ Polyphosphate ชนิดอื่นๆ



รูปที่ 5.5 ประสิทธิภาพการจับแคลเซียมของสารเคมีชนิดต่าง ๆ ที่ค่า pH ต่าง ๆ

บรรณานุกรม

1. [illegible], "[illegible]," [illegible] 29 ([illegible] 2520).
2. Adams, J. "Iron and Manganese Removal." **Water & Sewage Works** (July 1970).
3. Al Layla, M.A., Ahmad, S. and Middlebrooks, M.J. **Water Supply Engineering Design.** Michigan : Ann Arbor Science Publishers, 1978.
4. AWWA. **Water Quality and Treatment.** New York : Mc Graw - Hill Book Co. 1971
5. AWWA. **Water Treatment Plant Design.** New York : American Water Works Association, 1969.
6. Betz. **Hand book of Industrial Water Conditioning** Pennsylvania : Betz Laboratories, 1967.
7. Bulletin 5440 B. **Permutit Zeo-Rex Iron Removal Manganese Zeolite with Permanganate Feed.** U.S.A : The Permutit Co., Sybron Corporation.
8. **Chemical Technology An Encyclopedia Treatment.** Vol. 1. New York : Barnes & Noble, 1965.
9. **Degremont Water Treatment Handbook.** 4th ed. New York : Halstad Press Book, John Wiley & Sons, 1979.
10. Ramos, N.R., Tharh, N.C. and Lohani, B.N. "Iron and Manganese Removal by Horizontal Prefiltration." Thesis No. EN-79-12, AIT, 1979.
11. Fair, G.M., Geyer, J.C. and Okun, D.A. **Water and Waste Water Engineering. Vol. 2- Water Purification and Waste Water Treatment and Disposal.** New York John Wiley & Sons, 1968.
12. Hammer, M.J. **Water and Waste-Water Technology.** New York : John Wiley & Sons, 1975.
13. Hopkins, E.S. and Bean, E.L. **Water Purification Control.** Baltimore : The Williams & Wilkins Co. 1980.
14. Hull, A. "Filtration of Water with a High Iron Content." **Effluent and Water Treatment Journal** (May 1974)
15. Hull, A. "Removal of Iron and Manganese from a Soft Groundwater." **Effluent and Water Treatment Journal** (May 1975).
16. Hunt, K.N. "Removal of Iron from Groundwater." Thesis No. 456, Asian Institute of Technology, 1978.

17. Humphrey, S.R. and El-Kaherawe, M.A. "Iron and Manganese Removal Using $KMnO_4$." **Water & Sewage Work.** Reference Number 1962.

18. **Kurita's De Iron Equipments.** Kurita Industries Co.

19. Parlante, R. "Water in Industry." in **Hand book of Water Resources and Pollution Control.** ed. by H.W. Gehm and J.I. Bregman. New York : Van Nostrand Reinhold Co., 1976.

20. **Removal of Iron & Manganese from Raw Water Supply.** U.S.A. : Betz Laboratories.

21. **Technical Information on Manganese Greensand.** Wisconsin : Clark Corporation.

6 การกำจัดความกระด้าง

ความกระด้างที่มีอยู่ในแหล่งน้ำต่าง ๆ จะอยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียม ที่ละลายน้ำ ซึ่งอยู่ในประจุของไอออนบวกแคลเซียมและแมกนีเซียมนั่นเอง โดยการแลกเปลี่ยนไอออน วิธีการกำจัดความกระด้างต่าง ๆ มีอยู่ 2 วิธีคือ

1. ใช้กระบวนการปฏิกิริยาเคมีจากการตกตะกอนเป็นของแข็ง (Precipitate) วิธีนี้สามารถลดความกระด้าง ความขุ่นน้ำ TDS และซิลิกา

2. ใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนโดยเรซิน (Ion Exchange Resin)

สำหรับวิธีการที่ 2 นั้น จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ส่วนวิธีแรกนั้นอาศัยหลักการเปลี่ยนสภาพความสามารถในการละลายน้ำได้ของสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำ

วิธีการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาที่ตกตะกอนมี 2 แบบ คือ

1. Cold Lime - Soda Process

2. Hot Lime Process or Hot Process Softening

6.1 กระบวนการปูน-โซดาเย็น (Cold Lime - Soda Process)

ใช้สารเคมีคือ ปูนขาว ($Ca(OH)_2$), โซดาแอช (Na_2CO_3) และโซดาไฟ ($NaOH$) ในการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแมกนีเซียมเพื่อตกตะกอน นอกจากนี้ยังต้องใส่สารช่วยตกตะกอน (Coagulants) เพื่อจับตะกอนที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาให้จับตัวเร็วขึ้น กระบวนการนี้ใช้ลดซิลิกาได้ด้วย แต่มีประสิทธิภาพต่ำ โดยใช้สารประกอบของแมกนีเซียมในการทำปฏิกิริยากับซิลิกา

สารเคมีที่ใช้มีดังนี้

1. **สารช่วยตกตะกอน** ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ สารส้ม เฟอร์ริคซัลเฟต และเฟอร์ริคคลอไรด์

2. **ปูนขาว** ปูนขาวที่ใช้ปูนขาวที่มีเนื้อปูนขั้นเดือยละ 85 ขึ้นไป แต่ในกรณีที่ใช้ปูนขาวที่มีเนื้อปูนขั้นเดือยละ 85 ขึ้นไป ถ้าหากมีการใช้งานในปริมาณมากก็ใช้ปูนดิบ (CaO) จะประหยัดกว่าปูนขาวให้

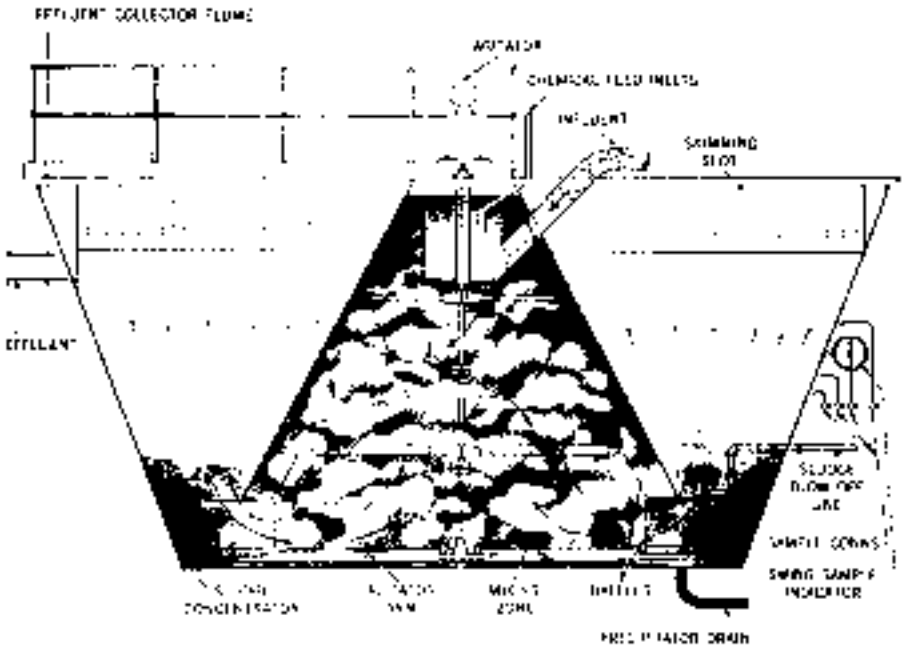
$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

3. โซดาแอช ใช้ตะกอนที่มี Na_2O อยู่ในตะกอน ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นโซดาแอช

4. แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ใช้ในกรณีที่น้ำมีความกระด้างถาวร

6.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการปูน-โซดาย่อ

บ่อแยกตะกอนแบบ Sludge Contact Clarifier หรือ Sludge Blanket Clarifier เป็นบ่อแยกตะกอนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ในการใช้งานจริงจะมีการเติมสารเคมีลงในน้ำดิบก่อนเข้าบ่อแยกตะกอน เพื่อให้ตะกอนตกลงมาได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ซึ่งตะกอนที่ตกลงมาจะถูกดันขึ้นด้านบนโดยน้ำดิบที่ไหลเข้าบ่อ ทำให้ตะกอนเข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ ตามความสูงของบ่อ ทำให้ได้น้ำใสที่ด้านบนของบ่อ

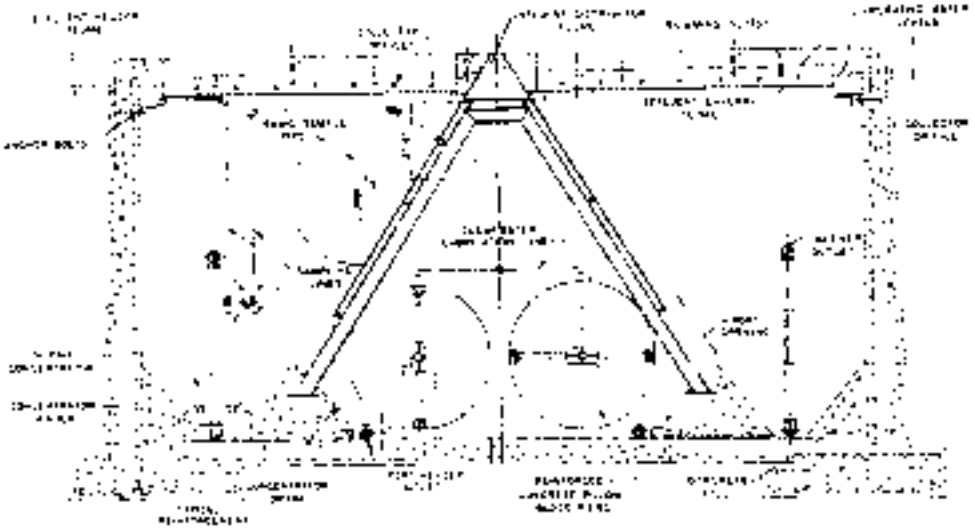


รูปที่ 6.1 Sludge Contact Clarifier และ Precipitator

รูปแสดงลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการปูน-โซดา แต่ในปัจจุบันมีการนำเข้าใช้ในรูปของถังกรองน้ำใส

6.1.2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิด

สารเคมีที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนนั้นจะมีปฏิกิริยาเคมีที่ให้ปฏิกิริยากับไอออนต่างๆ ในน้ำ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณของสารเคมี ความเข้มข้นของสารเคมี ความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ อัตราการผสม ความเร็วในการกวน ฯลฯ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะต้องมีการควบคุมให้เหมาะสม



รูปที่ 6.2 Horizontal Precipitator แบบหนึ่ง

รูปที่ 6.3 Sludge Contact Clarifier แบบหนึ่ง

(ดูรูปที่ 6.15 ในบทที่ 6) การผลิตน้ำประปาจากน้ำผิวดิน โดยทั่วไปมักมีขั้นตอนการเติมสารส้ม (Alum, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) อยู่ร่วมกับขั้นตอนการเติมด่าง ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเติมด่างนั้น ถ้าเติมปูนขาว ($Ca(OH)_2$) ไปก็จะมีการเกิดปฏิกิริยากับสารส้มดังนี้

$$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3CaSO_4 + 14H_2O$$

และถ้าเติมด่างเป็นโซดาไฟ (NaOH) ก็จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 6NaOH \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3Na_2SO_4 + 14H_2O$$

ด่างที่เติมลงไปนี้จะมีส่วนช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนของสารส้ม ดังนั้นจึงเรียกด่างกลุ่มนี้ว่า ด่างที่ใช้ในการตกตะกอน (Coagulant Alkalinity) และน้ำมีความกระด้างเหลือกลุ่มที่ทำให้เกิดความกระด้างแบบถาวร (Magnesium Alkalinity) ส่วนน้ำที่มีความกระด้างเหลือกลุ่มที่ทำให้เกิดความกระด้างแบบถาวร (Sodium Alkalinity)

6.1.3 ปูนขาว

ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไบคาร์บอเนต ($Ca(HCO_3)_2$) และแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($Mg(HCO_3)_2$) ที่มีอยู่ในน้ำดิบ ทำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ที่มีลักษณะเป็นปุยขาวที่ตกตะกอนได้ง่าย ทำให้น้ำใสขึ้น ปฏิกิริยาการเติมปูนขาวเพื่อกำจัดความกระด้างของน้ำมีดังนี้

ปฏิกิริยาลดความกระด้างแคลเซียม เป็นดังนี้

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2\,CaCO_3 + 2\,H_2O$$

$$Mg(HCO_3)_2 + 2\,Ca(OH)_2 \longrightarrow 2\,CaCO_3 + Mg(OH)_2 + H_2O$$

$$2\,NaHCO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Na_2CO_3 + CaCO_3 + 2\,H_2O$$

จะเห็นได้ว่า การขจัดความกระด้างส่วนรูปแมกนีเซียในการต้มนั้นจะต้องใช้ปูนขาวมากเป็นสองเท่าของการขจัดความกระด้างแคลเซียมในการต้มแต่ ปูนขาวที่เติมนี้นอกจากเพื่อเพิ่มความเป็นด่างไฮดรอกไซด์ (Free Causticity) ในรูปของ OH^- อีกแล้วน้ำ และปฏิกิริยาดังกล่าวยังช่วยลดปริมาณของ (Solids) ที่มีอยู่ในน้ำด้วย

ปฏิกิริยาขจัดความกระด้างถาวรนี้เขียนตัวอย่างได้ดังนี้

$$MgCO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3 + Mg(OH)_2$$

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2 + CaSO_4$$

$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2 + CaCl_2$$

6.1.4 โซดาแอช

โซดาแอชจะทำปฏิกิริยากับความกระด้างถาวรได้ ความกระด้างที่ไม่ละลายน้ำ จะต้องใช้โซดาแอช 1 สมมูลเพื่อทำปฏิกิริยากับความกระด้างแคลเซียมที่ไม่ใช่คาร์บอเนต 1 สมมูล เช่นกัน

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3 + Na_2SO_4$$

$$CaCl_2 + Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3 + 2\,NaCl$$

$$Ca(NO_3)_2 + Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3 + 2\,NaNO_3$$

ถ้าเป็นความกระด้างถาวรแมกนีเซียม จะต้องใช้โซดาแอช 1 สมมูลกับปูนขาว 1 สมมูล เพื่อทำปฏิกิริยากับความกระด้างถาวรแมกนีเซียม 1 สมมูล

$$MgSO_4 + Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2 + CaCO_3 + Na_2SO_4$$

$$MgCl_2 + Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2 + CaCO_3 + 2\,NaCl$$

$$Mg(NO_3)_2 + Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2 + CaCO_3 + 2\,NaNO_3$$

ในการใช้โซดาแอชจะลดความกระด้างลงได้ แต่ยังสามารถลดของแข็ง (Solids) ที่อยู่ในน้ำได้เพราะผลของปฏิกิริยาจะเกิดตะกอนแคลเซียมที่ละลายน้ำ

6.1.5 แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ปกติแล้วจะใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับการลดความเป็นด่างไปได้ต่ำที่ต้องการ จะใช้ที่ต่อเนื่อง

1. Magnesium Alkalinity มากกว่า 15 พีพีเอ็ม as Magnesium Hardness - Magnesium Alkalinity น้อยกว่า 40 พีพีเอ็ม

2. มี Sodium Alkalinity ปรากฏอยู่ ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการลดความกระด้างถาวรแมกนีเซียมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าโซดาแอช

เมื่อจากนั้น $MgCO_3$ และ Na_2CO_3 ต่างก็เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี และจะไม่ทำปฏิกิริยาและตกตะกอนกับปูนขาว จึงต้องใช้แคลเซียมคลอไรด์

$$MgCO_3 + CaCl_2 \longrightarrow MgCl_2 + CaCO_3$$

$$Na_2CO_3 + CaCl_2 \longrightarrow 2\,NaCl + CaCO_3$$

จะเห็นได้ว่าในปฏิกิริยาจะมีความเป็นด่าง เกิดขึ้นลดลงไปด้วย ความกระด้างถาวรจึงยังคงมีอยู่ในรูปแคลเซียมคลอไรด์ซึ่งต้องกำจัดโดยใช้โซดาแอชและปูนขาวอีกครั้งหนึ่งในตอนท้าย

ในกรณีที่ใช้โซดาไฟแทนปูนขาวและโซดาแอช จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$CO_2 + 2\,NaOH \longrightarrow Na_2CO_3 + H_2O$$

$$Ca(HCO_3)_2 + 2\,NaOH \longrightarrow CaCO_3 + Na_2CO_3 + 2\,H_2O$$

$$Mg(HCO_3)_2 + 4\,NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2 + 2\,Na_2CO_3 + 2\,H_2O$$

$$MgSO_4 + 2\,NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2 + Na_2SO_4$$

6.1.6 สารช่วยตกตะกอน (Coagulant)

มีอนุภาคกระด้างทำปฏิกิริยากันสารเคมีตามสมการต่างๆ ข้างต้นจะตกตะกอนเป็นตะกอนเนื้อละเอียดเรียกว่าฟุ้งกระจายได้ง่าย การใส่สารช่วยตกตะกอนจะช่วยให้ตะกอนนี้ดูดเข้าด้วยกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้เร็วขึ้น

ปริมาณสารเคมีช่วยตกตะกอนที่นิยมใช้มีดังนี้

1. สารส้ม 20 พีพีเอ็ม
2. เฟอร์ริกซัลเฟต 20 พีพีเอ็ม
3. เฟอร์ริกซัลเฟต 10 พีพีเอ็ม

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

$$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 3\,Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2\,Al(OH)_3 + 3\,CaSO_4 + 18\,H_2O + 6\,CO_2$$

$$2\,FeSO_4 \cdot 7\,H_2O + 2\,Ca(HCO_3)_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow 2\,Fe(OH)_3 + 2\,CaSO_4 + 6\,CO_2 + 6\,H_2O$$

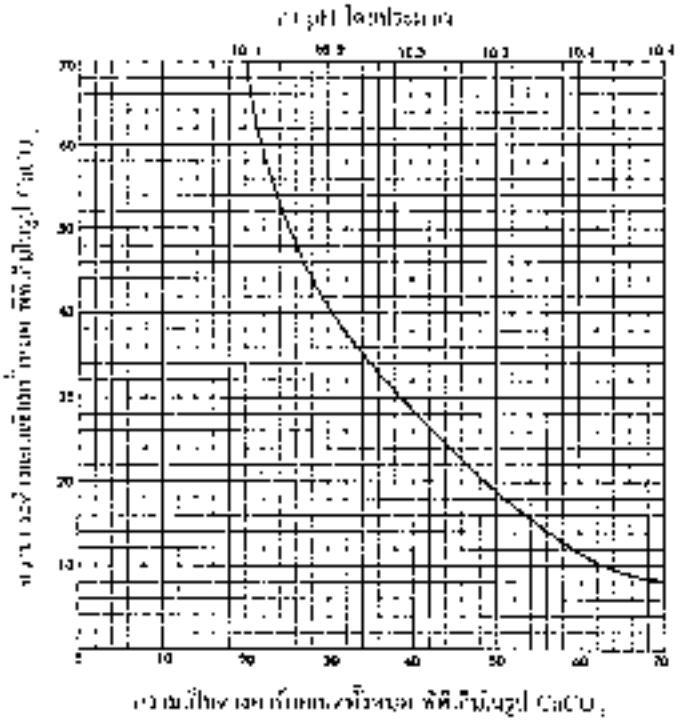
$$2\,FeSO_4 \cdot 7H_2O + 3\,Ca(HCO_3)_2 + Cl_2 \longrightarrow 2\,Fe(OH)_3 + 2\,CaSO_4 + CaCl_2 + 8\,CO_2 + 7\,H_2O$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3\,Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2\,Fe(OH)_3 + 3\,CaSO_4 + 6\,CO_2$$

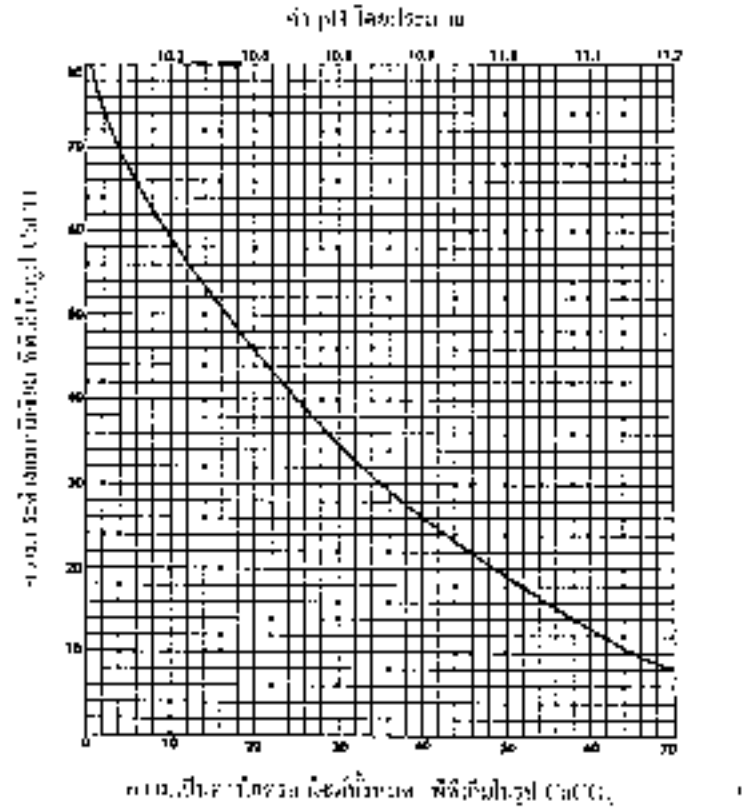
6.1.7 การคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้

ก่อนที่จะเริ่มการคำนวณต้องเข้าใจก่อนว่าสารละลายของ $Ca(OH)_2$ และ $Mg(OH)_2$ เกิดจากอะไร

เมื่อปูนขาวทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างแคลเซียม จะเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต โซดาแอชจะทำปฏิกิริยากับความกระด้างถาวรแคลเซียม และเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต การละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจะขึ้นกับปริมาณของแคลเซียมอิออน (Ca^{+2}) และคาร์บอเนตอิออน (CO_3^{-2}) ดังรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าจะลดความกระด้างแคลเซียมได้อย่างมากที่สุดให้เหลือ 35 พีพีเอ็ม เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคาร์บอเนตปนอยู่



รูปที่ 6.4 การละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อการขจัดความกระด้างแคลเซียม



รูปที่ 6.5 การละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการขจัดความกระด้างแมกนีเซียม

ความกระด้างแคลเซียมที่จะมีปฏิกิริยากับสบู่ และตกตะกอนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมคิดจาก Mg^{++} และไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) จากรูปที่ 6.3 จะพบว่าที่ค่าพีเอชของน้ำตั้งแต่ 10.5 ขึ้นไป ความกระด้างแคลเซียมจะต่ำกว่า 30 พีพีเอ็มได้ โดยไม่มีความจำเป็นต้องใช้โซดาไฟ (Caustic) หรือ OH^- มาช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ ถ้าจะลดความกระด้างแมกนีเซียมให้ต่ำกว่านี้ จะต้องใส่ความเป็นด่างไฮดรอกไซด์จากโซดาไฟหรือปูนขาวเพิ่มขึ้นอีก

ในการคำนวณต่อๆ ไปจะต้องนำผลการวิเคราะห์น้ำดิบและน้ำที่ผ่านการปรับคุณภาพโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วจำนวนหนึ่งมาคิดคำนวณหาค่าต่างๆ ที่ต้องมีการคำนวณผสมน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการปรับคุณภาพแล้วเสียก่อน ดังตัวอย่างข้อต่อไปนี้ ซึ่งมีผลวิเคราะห์น้ำดิบและน้ำที่ผ่านการปรับคุณภาพแล้วเป็นด่างและคาร์บอนไดออกไซด์อิสระเปลี่ยนไป

	โซเดียมซิลิกาซัลเฟต 20 พีพีเอ็ม	โซเดียมซิลิกาซัลเฟต 40 พีพีเอ็ม	ไฮเดรซีน 20 พีพีเอ็ม
ความเป็นด่างทั้งหมด ($CaCO_3$)	0.0 พีพีเอ็ม	0.0 พีพีเอ็ม	0.0 พีพีเอ็ม
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	0.0 พีพีเอ็ม	0.0 พีพีเอ็ม	0.0 พีพีเอ็ม
ซิลิกา (SiO_2)	0.0 พีพีเอ็ม	0.0 พีพีเอ็ม	0.0 พีพีเอ็ม

ตัวอย่างที่ 6.1 การคำนวณหาปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่ใช้ (ต่อตัน) 20 พีพีเอ็ม

ผลการวิเคราะห์น้ำต่อไปนี้

	น้ำดิบ	ตัดแปลง
ความเป็นด่างทั้งหมด	200	200-0 = 200
ความกระด้างแคลเซียม	150	- 100
ความเป็นด่างแคลเซียม	150	- 100
ความกระด้างแมกนีเซียม	100	- 100
ความเป็นด่างแมกนีเซียม	200-150 = 50	200-150 = 50
ความกระด้างแคลเซียมถาวร	0	- 0
ความกระด้างแมกนีเซียมถาวร	100-50 = 50	100-50 = 50
ความกระด้างถาวรทั้งหมด	250-200 = 50	250-200 = 50
คาร์บอนไดออกไซด์อิสระ	15	15-0 = 15

จากการคำนวณโดยใช้ผลการวิเคราะห์น้ำที่ดัดแปลงตามตัวอย่างข้างบนนี้ น้ำที่ได้จะมีคุณภาพดังนี้

1. คาร์บอนไดออกไซด์อิสระ ไม่มี
2. ความเป็นด่างแคลเซียม = (ความกระด้างแคลเซียมเดิม (150) พีพีเอ็ม) - (ความเป็นด่างแคลเซียมเดิม)
3. ความกระด้างแมกนีเซียม = เหมือนกับความกระด้างแมกนีเซียมเดิม
4. ความกระด้างทั้งหมด = ข้อ 2 + ข้อ 3

ก. ความกระด้างถาวร = ความกระด้างทั้งหมด − ความกระด้างชั่วคราว
เช่น ความกระด้างทั้งหมด 15 พีพีเอ็ม ความกระด้างชั่วคราว 10 พีพีเอ็ม
ความกระด้างถาวร = 15 − 10 = 5 พีพีเอ็ม

ข. ความเป็นด่างทั้งหมด = 35 พีพีเอ็ม น้ำมีความเป็นด่างเกิดจากไบคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์

ค. pH ของน้ำจะอยู่ในช่วง 8.0 – 12

ค่า pH ที่แท้จริงหาได้จากรูปที่ 3.8 ในบทที่ 3

ง. ปริมาณสารเคมีที่ใช้

จะต้องใส่ปูนขาวเพื่อการทำปฏิกิริยาดังนี้

1. ทำปฏิกิริยากับ CO_2 1 พีพีเอ็ม ในรูป CO_2 หรือ CO_2 1 พีพีเอ็มในรูป $CaCO_3$
2. ทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างแคลเซียม 120 พีพีเอ็ม
3. ทำปฏิกิริยากับร้อยละ 10 ของความกระด้างแมกนีเซียม หรือ 10 พีพีเอ็มของความเป็นแมกนีเซียม (ต้องใช้ปูนขาวเป็น 2 เท่าของความเป็นด่างแมกนีเซียม)

ดังนั้น จึงต้องใช้ปูนขาว = 11 + 150 + (2 × 10) = 211 พีพีเอ็ม ปูนขาวในรูป $Ca(OH)_2$

ทำ 120 พีพีเอ็ม = 1 ปอนด์ต่อ 1,000 แกลลอน

ปูนขาวที่ใช้ = $\frac{211}{120}$ = 1.76 ปอนด์ ปูนขาวในรูป $Ca(OH)_2$ ต่อน้ำ 1,000 แกลลอน แต่ต้องคำนึงถึงความบริสุทธิ์ของปูนขาว

ใช้ปูนขาว = 1.76 × 0.74 = 1.3 ปอนด์ ปูนขาวต่อน้ำ 1,000 แกลลอน

ถ้าปูนขาวมีเนื้อปูนเพียงร้อยละ 93

ดังนั้น ต้องใช้ปูนขาว = $\frac{1.3}{0.93}$ = 1.404 ปอนด์ปูนขาว ต่อน้ำ 1,000 แกลลอน

ตารางที่ 6.1 ตารางตัวเลขรูปในการคำนวณหาปริมาณปูนขาวที่ใช้

	ปูนขาวบริสุทธิ์ ร้อย ที่ใช้	ปูนขาวไม่บริสุทธิ์ ร้อย ที่ใช้
	ปอนด์ ต่อน้ำ 1,000 แกลลอน	
ความกระด้างถาวรในรูป $CaCO_3$ พีพีเอ็ม	0.00136	0.00151
ความเป็นด่างแมกนีเซียม ในรูป $CaCO_3$ พีพีเอ็ม	0.00120	0.00129
ปริมาณแมกนีเซียม ในรูป $CaCO_3$ พีพีเอ็ม	0.00161	0.00174
ปริมาณแมกนีเซียม ในรูป $CaCO_3$ พีพีเอ็ม	0.00120	0.00128

ดังนั้น ปริมาณปูนขาวที่ต้องการคำนวณได้ดังนี้

ปอนด์ปูนขาวต่อน้ำ 1,000 แกลลอน

ความกระด้างถาวร	= 18 × 0.151	= 0.271
ความเป็นด่างแมกนีเซียม	= 150 × 0.00645	= 1.003
ความเป็นด่างแมกนีเซียม	= 10 × 0.01128	0.130
		1.404

2. คุณภาพน้ำที่ปรับสภาพแล้ว ก) จากตาราง ที่ 1 ถึง 5 ข้างต้น จะได้ผลดังนี้

1 เดิมมีความเป็นด่างแคลเซียม 150 พีพีเอ็ม จะลดลง 115 พีพีเอ็ม. คงเหลือ 35 พีพีเอ็ม. (150 - 35 = 115)

2. ในการขจัดความเป็นด่างแมกนีเซียม 10 พีพีเอ็ม จะทำให้ความเป็นด่างทั้งหมดลดลง 125 พีพีเอ็ม. (100 + 25 = 150 - 50 = 75) นั่นคือ เดิมมีความเป็นด่างทั้งหมด 200 พีพีเอ็ม ลดลง 125 พีพีเอ็ม เหลือ 75 พีพีเอ็ม ซึ่งเป็น CO_3^{--} 50 พีพีเอ็ม และ HCO_3^- 25 พีพีเอ็ม

ตารางที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านกระบวนการปูนโซดาเย็น

หมายเหตุ: การขจัดความเป็นด่างแคลเซียม ตามตัวอย่างที่ 1
1. น้ำดิบ 2. คุณภาพน้ำที่ผ่านโปรแกรม 3. ความต้องการในการขจัดแคลเซียม

	ชนิด	สัญลักษณ์	Parts Per Million (ppm) as $CaCO_3$		
			1	2	3
CATIONS	Calcium	Ca^{++}	150	125	35
	Magnesium	Mg^{++}	100	100	90
	Sodium	Na^{+}	50	50	50
	Hydrogen Acidity	H^{+}	0	0	0
	Total Cations		300	275	175
ANIONS	Bicarbonate (Alkalinity)	HCO_3^{-}	200	150	50
	Carbonate (Alkalinity)	CO_3^{--}	0	0	50
	Hydroxide (Alkalinity)	OH^{-}	0	0	0
	Phosphate (Alkalinity)	PO_4^{---}	0	0	0
	Chloride	Cl^{-}	50	50	50
	Sulfate	SO_4^{--}	50	50	50
	Nitrate	NO_3^{-}	0	0	0
	Total Anions		300	250	175
	Total Hardness		250	225	125
	Methyl Orange Alkalinity		200	150	75
	Phenolphthalein Alkalinity		0	0	25
	Non-carbonate Hardness		50	75	50
	Sodium Alkalinity		0	0	0
			ppm	ppm	ppm
	Carbon dioxide	CO_2	20	14	0
	Silica	SiO_2			
	Iron	Fe			
	Turbidity				
	Color				
	Total Solids (Cations + SiO_2)				
	pH				10.0

ตัวอย่างที่ 6.2 การวิเคราะห์ความเป็นด่างของน้ำ และการคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดความกระด้างของน้ำดิบ

		ตัวอย่างน้ำ
Calcium Hardness = 150		150
Calcium Alkalinity = 150		150
Magnesium Hardness = 200		200
Magnesium Alkalinity = 100		100
Magnesium Non Carbonate = 200-100 = 100	200-100 =	100
Total Non-Carbonate Hardness = 350-200 = 150	350-200 =	150

Free CO_2 = 5

Calcium Hardness = 35

Magnesium Hardness = Non-Carbonate Hardness = 100

Total Hardness = 135

Alkalinity = 200 + 35 + 265 - (150 + 100) = 35

ปริมาณสารเคมีที่ใช้	ปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำ 1,000 ลบ.ม.
Free CO_2 = 18 × 0.0151	= 0.271
Total Alkalinity = 350 × 0.00553	= 1.940
Magnesium Alkalinity = 100 × 0.00569	= 0.569
Causticity = 0 × 0.00553	= 0
	2.510

ตารางที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านระบบการปนะโซดาอัน

ที่มา : [illegible]

1. น้ำดิบ
2. หลังการกรอง
3. หลังการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระบบโซดาไฟ

	ชนิด	สัญลักษณ์	Parts Per Million (ppm) as $CaCO_3$		
			1	2	3
CATIONS	Calcium	Ca^{++}	250	120	85
	Magnesium	Mg^{++}	230	90	120
	Sodium	Na^{+}	80	70	80
	Hydrogen Acidity	H^{+}	0	0	0
	Total Cations		560	280	285
ANIONS	Bicarbonate } Alkalinity	HCO_3^{-}	250	250	0
	Carbonate } Alkalinity	CO_3^{--}	0	0	25
	Hydroxide } Alkalinity	OH^{-}	0	0	0
	Phosphate } Alkalinity	PO_4^{---}	0		
	Chloride	Cl^{-}	100	10.0	100
	Sulfate	SO_4^{--}	80	80	80
	Nitrate	NO_3^{-}	0	0	0
	Total Anions		430	340	205
	Total Hardness		350	210	205
	Methyl Orange Alkalinity		250	250	0
	Phenolphthalein Alkalinity		0	0	0
	Non-Carbonate Hardness		80	100	100
	Sodium Alkalinity		0	0	0
			ppm	ppm	ppm
	Carbondioxide	CO_2	10	15	0
	Silica	SiO_2			
	Iron	Fe			
	Turbidity				
	Color				
	Total Solids (Cations + SiO_2)				
	pH				

6.2 กระบวนการปูน-โซดาร้อน (Hot Lime Process)

นิยมใช้กับระบบปรับสภาพน้ำในการผลิตกำลังสูงและความดันไอน้ำสูงกว่าประมาณ 600-1,200 Psi เรียกว่า Hot Process Softener หรือ HPS ที่ สามารถปรับสภาพน้ำดิบให้มีคุณภาพดังนี้

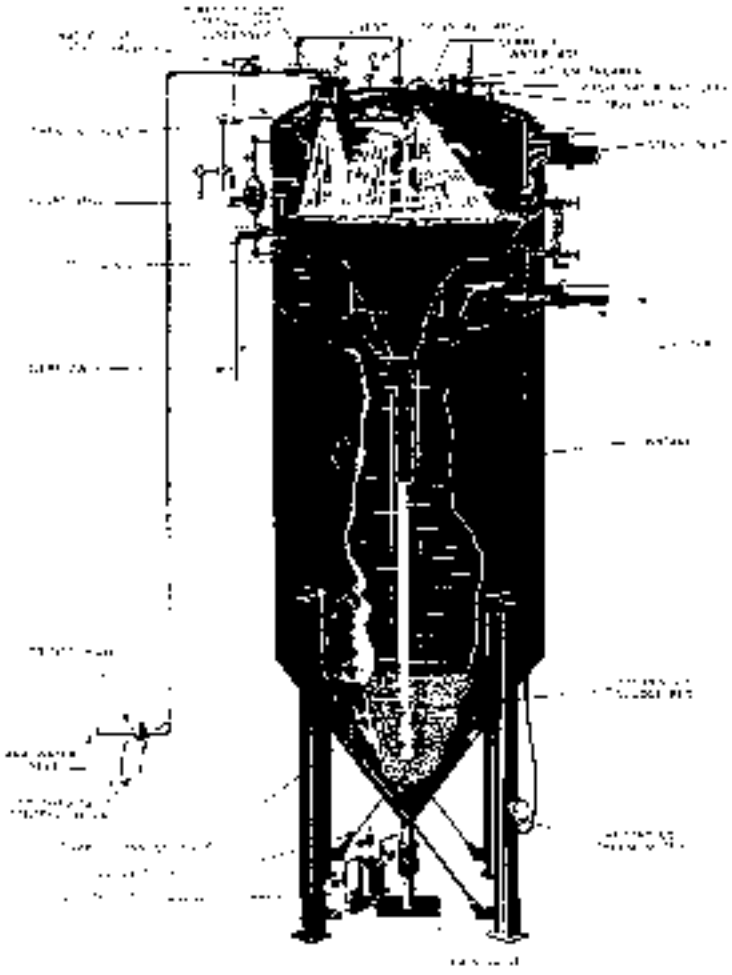
1. แต่ปริมาณซิลิกาที่มีอยู่ในน้ำเติมให้หมดจนเหลือไม่เกิน 1 พีพีเอ็ม

2. ลด P และ M-Alkalinity ในน้ำดิบให้ต่ำลงตามต้องการ ทำให้ไม่มีแมกนีเซียมอยู่ในระบบน้ำของหม้อไอน้ำได้มากขึ้น

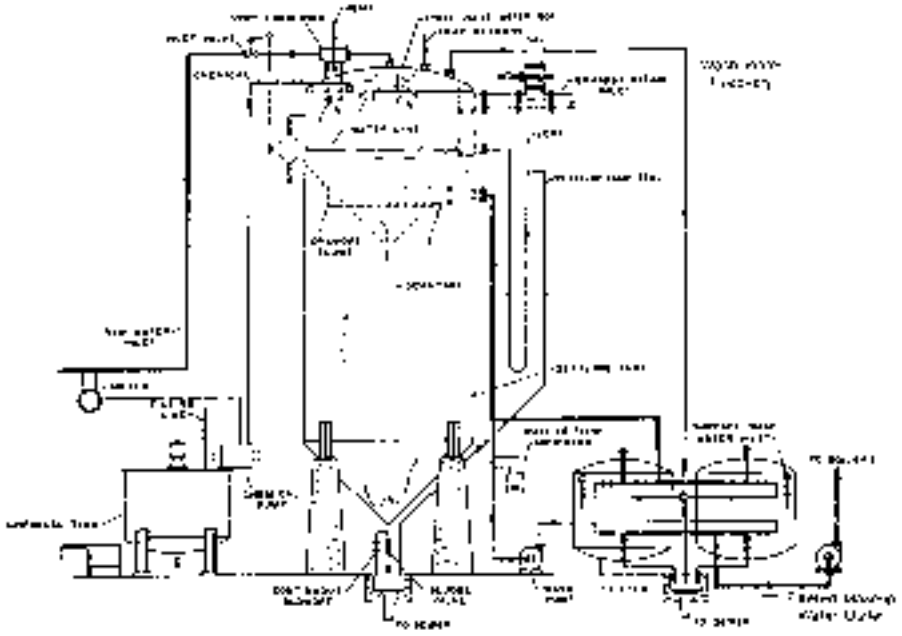
3. สามารถลดความกระด้างของน้ำดิบลงได้มากและเกือบเป็นศูนย์ ในทางทฤษฎี และถ้าผสมน้ำนี้ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Softener) แล้ว จะได้น้ำที่มีความกระด้างไม่เกิน 1 พีพีเอ็ม.

4. ลดปริมาณสารละลายน้ำ (TDS) และสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำให้ลดลงได้มาก ซึ่งจะช่วยลดความถี่ของการเป่าน้ำทิ้ง ทำให้ใช้น้ำหมุนเวียนในระบบน้ำของหม้อไอน้ำได้มากขึ้น

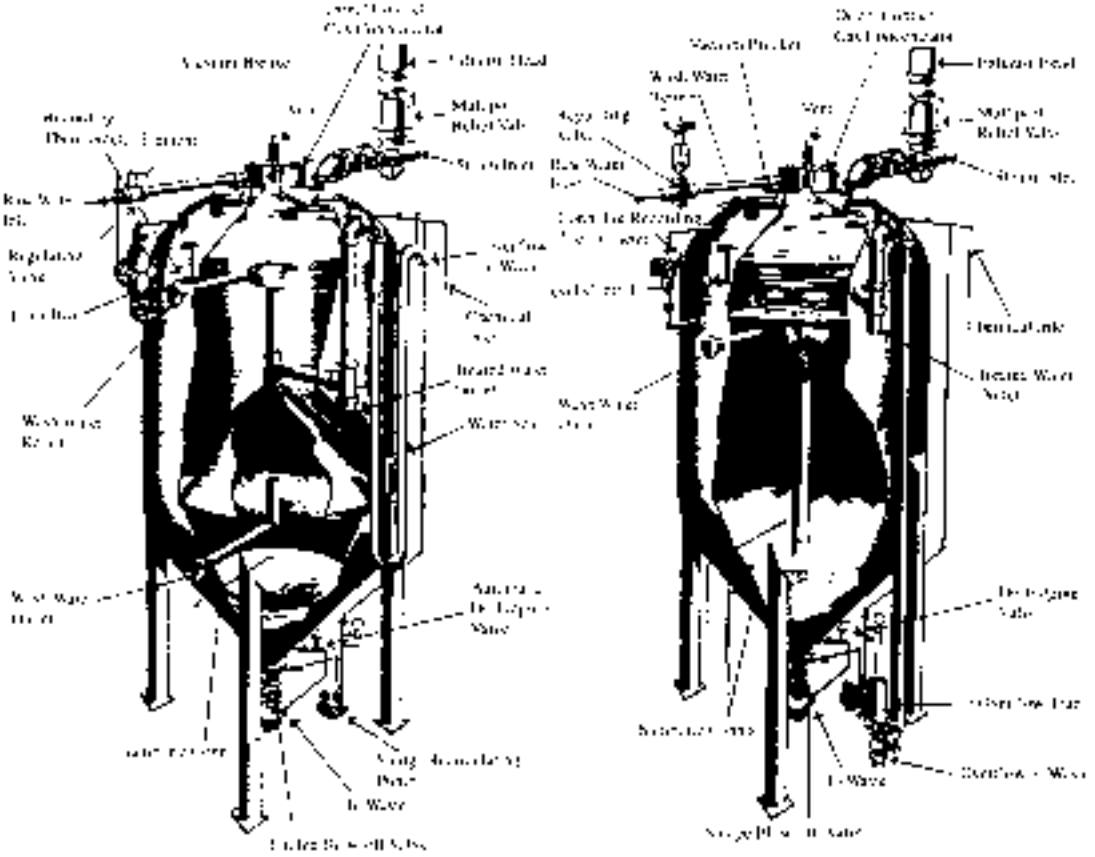
5. ไล่ก๊าซที่ละลายในน้ำออกได้



รูปที่ 6.6 Sludge Blanket Hot Process Softener แบบหนึ่ง



รูปที่ 6.7 ตามตะหรือเหมือน Hot Process Softener แบบเครื่องกรอง



รูปที่ 6.8 Hot Process Softener (ต่อ) แบบไหลลง (ซ้าย) แบบไหลขึ้น

ตารางที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านเครื่อง Hot Process Softener

1. น้ำดิบ
2. น้ำที่ผ่านเครื่องกรองน้ำ Hot Process Softener
3. น้ำที่ผ่านการกรองด้วย DPS ผ่านเครื่องกรองน้ำแล้ว

ชนิด		สัญลักษณ์	Parts Per Million (ppm) as $CaCO_3$		
			1	2	3
CATIONS	Calcium	Ca^{+2}	130	30	0.1
	Magnesium	Mg^{+2}	52	1	0.1
	Sodium	Na^{+}	12	12	14
	Hydrogen Acidity	H^{+}			
Total Cations			194	50	50
ANIONS	Bicarbonate (Alkalinity)	HCO_3	142	0	0
	Carbonate (Alkalinity)	CO_3^{-2}	0	50	21
	Hydroxide (Alkalinity)	OH	0	0	1
	Phosphate (Alkalinity)	PO_4^{-3}			
	Chloride	Cl	1	1	1
	Sulfate	SO_4^{-2}	14	14	14
	Nitrate	NO_3			
Total Anions			157	50	50
Total Hardness					
Methyl Orange Alkalinity					
Phenolphthalein Alkalinity					
Non-carbonate Hardness					
Sodium Alkalinity					
			ppm	ppm	ppm
Carbondioxide		CO_2	4	0	0
Silica		SiO_2	28	2	1
Iron		Fe			
Turbidity			27	0.10	0.5
Color			1		
Total Solids (Cations + SiO_2)					
pH			7.6	9.0	9.0

6.2.1 หลักการทำงานของระบบ HPS

อุปกรณ์นี้จะผลิตแก๊สให้ทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส น้ำเข้าจะถูกทำงานด้วยแรงดันสูงประมาณ 1 บาร์ เมื่อน้ำไหลเข้าไป น้ำจะร้อนขึ้นทำให้ก๊าซต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำแยกตัวออกจากน้ำประหลุดขึ้นบนอากาศ ซึ่งมีเครื่องป้องกันไม่ให้ละอองน้ำหยดออกสู่บรรยากาศได้ ส่วนที่มีไฮโดรเจน ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ และอากาศ ๆ จะถูกดันเข้าหน่วยปฏิกิริยาการดูดซึม ปริมาณและชนิดของสารเคมีที่ใส่เข้าไปนี้ขึ้นกับคุณภาพและปริมาณน้ำดิบ ปูนขาวที่เติมลงไปในหน่วยปฏิกิริยาทำหน้าที่ลดความกระด้างในน้ำ และจับโลหะหนักจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ เช่น นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งโลหะเหล่านี้จะตกตะกอนและรวมกับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ น้ำ และตะกอนต่าง ๆ จะไหลลงในบริเวณด้านล่างของถัง ตะกอนนี้จะไปสะสมอยู่ส่วนล่างสุด ส่วนน้ำจะไหลขึ้นบริเวณด้านบนที่ตกตะกอนก่อนที่จะผ่านไปยังด้านบน น้ำที่ไหลออกจาก HPS จะมีตะกอนปลิวออกมาบ้าง ทำให้น้ำมีความขุ่น จึงต้องกรองน้ำเพื่อแยกจาก HPS ด้วยเครื่องกรองน้ำแบบทรายหรือกรวดหินที่มีขนาดต่าง ๆ กระบวนนี้จะเปลี่ยนไอออนของโลหะให้เป็นสารกรอง เพราะน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว เนื่องจากน้ำที่ผ่านการกรองเป็นน้ำที่ค่อนข้างเป็นกลาง ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายซิลิกาจากเม็ดกรวดทรายได้ดี จึงทำให้ลดปริมาณของซิลิกาได้

ในการดำเนินเครื่องกรองจะใช้น้ำจาก HPS ล้างตะกอนที่ติดอยู่ในหน่วยปฏิกิริยาออกไปด้วย ซึ่งมีตะกอนอยู่ประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงเป็นการประหยัดพลังงานและน้ำ

การดำเนินงานของถังปฏิกิริยาที่ตะกอนมีประสิทธิภาพสูงนี้ มีชื่อเรียกว่า Sludge Blanket ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Sludge Contact ถังแบบ Sludge Blanket นี้ มีประโยชน์ในการที่ตะกอนสามารถสัมผัสกับน้ำดิบได้ดีขึ้น ทำให้ตะกอนเมื่อสะสมกันมากเข้าก็จะระบายทิ้งได้ง่ายขึ้น และการดำเนินการ นอกจากนี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดความขุ่นและซิลิกาในน้ำได้ดีและตะกอนส่วนที่ระบายนี้ถูกนำเข้าถังปฏิกิริยาผสมกับน้ำดิบ เพื่อเร่งอัตราการตกตะกอนและการดูดซับซิลิกา ถังนี้ยังมีข้อดีและข้อเสียในการขจัดความกระด้างดังนี้

ข้อดีของปูนขาว และโซดาแอช จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$2\,HCO_3^- + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3 + CO_3^{2-} + H_2O$$

$$Mg^{2+} + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2 + Ca^{2+}$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longrightarrow CaCO_3$$

ระบบ HPS นี้ นอกจากจะขจัดความกระด้างแล้วยังใช้ขจัดสารแขวนลอยในน้ำได้อีกด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่น้ำดิบมีความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนตสูง ซึ่งน้ำบาดาลบางแห่งจะมีสภาพเช่นนี้ การที่น้ำมีไบคาร์บอเนตสูงและนำใช้เป็นน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ จะทำให้น้ำในหม้อไอน้ำมีสภาพเป็นด่างสูง ทั้งนี้เพราะไบคาร์บอเนตเมื่อถูกความร้อนจากไอน้ำจะให้ด่างออกมา

$$2\,NaHCO_3 + \text{ความร้อน} \longrightarrow Na_2CO_3 + H_2O + CO_2$$

$$Na_2CO_3 + H_2O + \text{ความร้อน} \longrightarrow 2\,NaOH + CO_2$$

ในการลดความเป็นด่างในไบคาร์บอเนตนี้ HPS จะมีการขจัดด่างโดยการเปลี่ยนรูปไบคาร์บอเนตเป็นคาร์บอเนต และซัลเฟต (แคลเซียมซัลเฟต) ตามปฏิกิริยาเคมีดังนี้

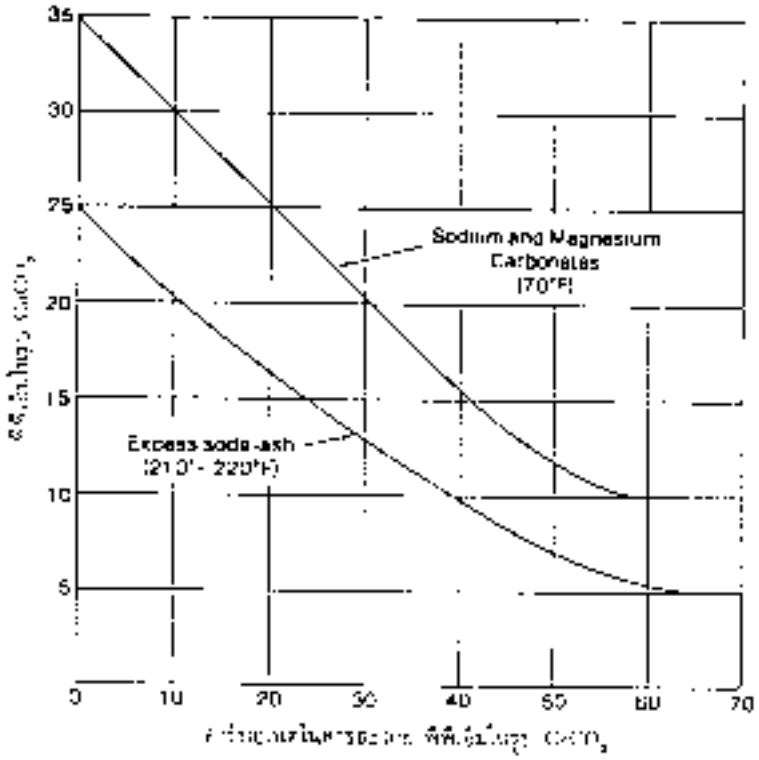
$$Na_2CO_3 + CaSO_4 \longrightarrow Na_2SO_4 + CaCO_3$$

และถ้าในน้ำมีปูนขาวมากเกินพอ ก็จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

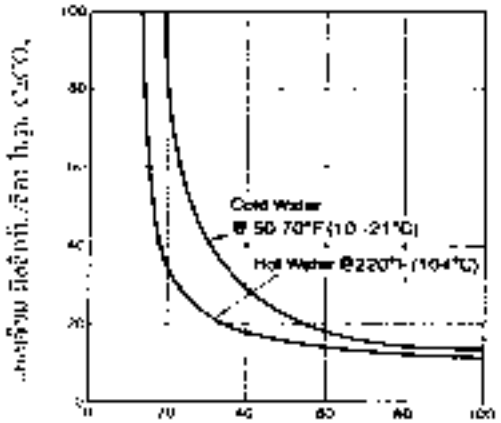
$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2NaOH + CaCO_3$$

$$2NaOH + MgSO_4 \longrightarrow Mg(OH)_2 + Na_2SO_4$$

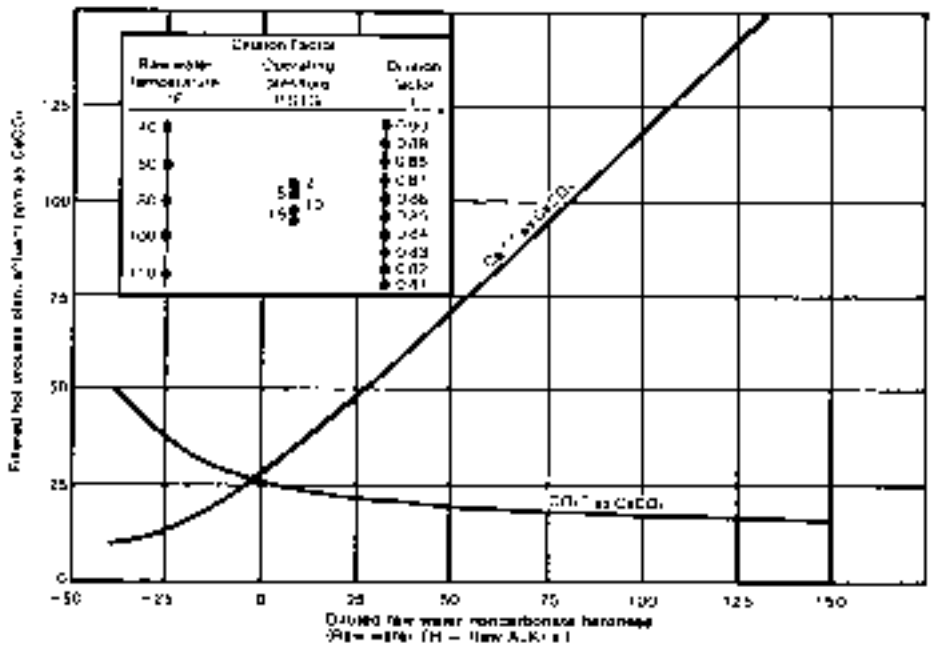
ซึ่งจะเห็นได้ว่าแคลเซียมไอออนที่เกิดขึ้นจะตกตะกอนอยู่ในน้ำอีกด้วย



รูปที่ 4.9 แสดงการละลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในน้ำที่มีฤทธิ์ด่างต่างๆ กัน แคลเซียมคาร์บอเนตในระบบปูน-โซดาเย็นและปูน-โซดาร้อน



รูปที่ 4.10 แสดงการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตในรางน้ำร้อนและน้ำแผ่นในถังปฏิกิริยาที่มีเวลาเก็บกักน้ำ 60-90 นาที



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงผลการคำนวณความกระด้างแคลเซียมและความเป็นด่างคาร์บอเนต

1. การคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการขจัดความกระด้าง สารเคมีที่ใช้ลดความกระด้างในน้ำ ได้แก่ ปูนขาว และโซดาแอช ในกรณีปฏิกิริยาแคลเซียมกระด้างและสารเคมีแล้ว ถ้าหากในน้ำดิบมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเพื่อเร่งอัตราการทำปฏิกิริยาเร็วขึ้นจะทำให้พีเอชสูงขึ้นและเกินไปด้วย ซึ่งมีผลให้ต้องเพิ่มปริมาณสารเคมีสำหรับการขึ้นทำการเผื่อต่าง ๆ ดังนี้

(1) ปริมาณปูนขาวที่ต้องใช้ที่ต้องการเปลี่ยนในรูปแคลเซียมไบคาร์บอเนต ผสมการข้างต้น

epm HCO_3 ในน้ำดิบ − epm HCO_3 ในน้ำที่ปรับสภาพแล้ว

(2) ปริมาณปูนขาวที่ต้องใช้เพื่อตกตะกอนแมกนีเซียมเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ตามสมการ

epm Mg ในน้ำดิบ − epm Mg ในน้ำที่ปรับสภาพแล้ว

(3) ปริมาณปูนขาวที่ต้องการเพื่อให้มีปริมาณ OH คงเหลือเพียงพอในน้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว

epm OH ในน้ำที่ปรับสภาพแล้ว − epm OH ในน้ำดิบ

ดังนั้น ปูนขาวที่สังเคราะห์ทั้งหมดจะเป็นผลรวมของปูนขาวที่ต้องการทั้งสามข้อ

epm ปูนขาวที่ใช้ = (epm HCO_3 + epm Mg − epm OH) Raw Water

(epm HCO_3 + epm Mg − epm OH) Treated Water

ปริมาณโซดาแอชที่ต้องการใช้ขึ้นกับกรณีต่าง ๆ ดังนี้

(1) ปริมาณโซดาแอชที่ต้องการในการขจัดแคลเซียมจากปูนขาวให้ตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต

epm Ca ในน้ำดิบ − epm Ca ในน้ำที่ปรับสภาพแล้ว

(2) ปริมาณไฮดรอกซิลที่ต้องการในการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมเป็นสองเท่าของปริมาณแมกนีเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำดิบ เพราะแมกนีเซียมในน้ำดิบจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลและแคลเซียมที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาอยู่

epm Mg ในน้ำดิบ = epm Mg ในน้ำที่ปรับสภาพแล้ว

(3) ไบคาร์บอเนตในน้ำดิบจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอเนต

epm HCO_3 ในน้ำปรับสภาพแล้ว = epm HCO_3 ในน้ำดิบ

(4) ปริมาณไฮดรอกซิลที่ใช้เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ปรับสภาพแล้วในปริมาณที่เหมาะสม

epm CO_2 ในน้ำปรับสภาพแล้ว = epm CO_2 ในน้ำดิบ

(5) ปริมาณไฮดรอกซิลที่ต้องการในการทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมจากปูนขาวที่เหลืออยู่เมื่อจากการให้ปูนขาวเพื่อให้น้ำมีปริมาณ OH ตามที่ต้องการ

epm OH ในน้ำที่ปรับสภาพแล้ว = epm OH ในน้ำดิบ

ปริมาณไฮดรอกซิลที่ใช้จะเป็นผลรวมของปริมาณไฮดรอกซิลที่ต้องการทั้ง 5 ชนิด

epm ไฮดรอกซิลที่ใช้ = (epm Ca + epm Mg − epm HCO_3 − epm CO_2 − epm OH) Raw Water − (epm Ca + epm Mg − epm HCO_3 − epm CO_2 − epm OH) Treated Water

หรือคิดจากสมการ

epm ไฮดรอกซิลที่ใช้ = (epm Hardness − epm Total Alkalinity) Raw Water − (epm Hardness − epm Total Alkalinity) Treated Water

ถ้าคิดจากการทำปฏิกิริยาแล้ว epm ไฮดรอกซิลที่ใช้จะเท่ากับ epm ของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่จะทำให้เกิดตะกอนที่ระดับ pH ที่ต้องการ ดังนั้น จึงต้องเติมแคลเซียมที่ไม่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไปด้วย ในกรณีที่ต้องการให้ตะกอนมีความเข้มข้นของแคลเซียมต่ำ ปริมาณไฮดรอกซิลที่ใช้จะน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการข้างบน เช่น ในการกำจัดแมกนีเซียม 10 epm ถ้าต้องการให้ตะกอนมีความเข้มข้นของแคลเซียม 2.0 epm แล้วนั้น

เนื่องจากในกระบวนการ HPS ที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาในถังปฏิกิริยาตลอดเวลา ไอน้ำที่ผสมไปนี้ต้องคำนึงถึงด้วยเป็นน้ำที่จะต้องเพิ่มเข้าไปในถังปฏิกิริยา ทำให้น้ำในถังปฏิกิริยาเจือจางได้ ปริมาณการเจือจางนี้ก็จะต้องนำมาคำนวณไปเมื่อจากปริมาณน้ำในถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จึงต้องมีการคำนวณหาค่าของการเจือจาง (Dilution Correction Factor เขียนย่อว่า DCF)

$$DCF = \frac{1}{1 + \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำดิบ}}}$$

$$\frac{\text{ปริมาณน้ำที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำดิบ}} = \frac{\text{ความเข้มข้นของน้ำที่ปรับสภาพแล้ว} - \text{ความเข้มข้นของน้ำดิบ}}{\text{ความเข้มข้นของน้ำที่ใช้} - \text{ความเข้มข้นของน้ำที่ปรับสภาพแล้ว}}$$

ค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ของไอน้ำที่ใช้จากหม้อไอน้ำที่ใช้น้ำ

ในการคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ที่แท้จริง เมื่อได้มีการคายน้ำออกจากหม้อไอน้ำ ต้องคำนึงถึง CCF (Coal Corrective Factor) ซึ่งได้จาก DCF

$$CCF = \frac{1}{DCF}$$

ปริมาณสารที่ใช้จริง = (epm HCO_3 + epm Mg - epm OH) Raw Water × CCF

(epm HCO_3 - epm Mg + epm OH) Treated Water

ปริมาณโซดาแอชที่ใช้จริง = (epm Hardness - epm Total Alkalinity) Raw Water × CCF

(epm Hardness - epm Total Alkalinity) Treated Water

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำ HPS มีอุณหภูมิ 15.6° C หรือ 60° F มีคุณภาพดังนี้

ชื่อสาร	พีพีเอ็ม	epm
แคลเซียม (Ca^{++})	32	1.60
แมกนีเซียม (Mg^{++})	5	0.41
โซเดียม (Na^{+})	13	0.57
ไบคาร์บอเนต (HCO_3^{-})	90	1.48
ซัลเฟต (SO_4^{--})	30	0.63
คลอไรด์ (Cl^{-})	15	0.42
ไนเตรต (NO_3^{-})	5	0.08
ซิลิกา (SiO_2)	9	-
ตะกอนแขวนลอย	0	
pH = 7.4		

เมื่อจากข้อมูลการคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ จึงต้องคายน้ำ แต่คุณภาพน้ำที่ได้จากการคายน้ำ จะต้องไม่ต่ำกว่าน้ำ HPS เพื่อให้เป็นมาตรฐานในการคำนวณ โดยน้ำที่ได้จาก HPS จะมี pH = 10 อุณหภูมิ 100° C หรือ 212° F ซึ่งจะมีคุณภาพดังนี้

อิออน	พีพีเอ็ม	epm
แคลเซียม (Ca^{++})	6.0	0.30
แมกนีเซียม (Mg^{++})	0.5	0.04
ไบคาร์บอเนต (HCO_3^{-})	24.4	0.04
คาร์บอเนต (CO_3^{--})	12.0	0.04
ไฮดรอกไซด์ (OH^{-})	1.7	0.10

ที่ใช้ไอน้ำที่มีแรงดัน 30 psia อุณหภูมิ 275°F จากการคำนวณน้ำจะถูกต้มจนแห้งได้ในหม้อต้มที่มีดูดกลับ

$$\frac{\text{ปอนด์ไอน้ำที่ใช้}}{\text{ปอนด์น้ำดิบ}} = \frac{289 - 126}{1,174 - 198} = 0.16$$

$$\text{DCF} = \frac{1}{1 + 0.16} = \frac{1}{1.16}$$

ดังนั้น DCF = 1.16

ยูทิลิตี้ปูนขาวที่ใช้ = (0.48 − 0.41) + 1.16(0.1 − 0.04 − 0.1)

= 1.50

ยูทิลิตี้โซดาแอชที่ใช้ = (0.01 − 1.48) + 1.16 (0.25 − 0.0)

= 1.24

2. การขจัดซิลิกา กระบวนการ Hot Process Softening เป็นกระบวนการที่มีคุณสมบัติในการกำจัดซิลิกาได้ดีกว่าพวก โซเดียมไฮโดรเจนซิลิเกต สารประกอบแมกนีเซียมสามารถแยกซิลิกาได้ดีกว่าสารประกอบแคลเซียม ที่ใช้มีดังนี้คือ แมกนีเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮโดรไซด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต ที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

Magnesium Oxide (MgO)

ชื่อทางการค้า	Calcined Magnesite
คุณภาพ	มี MgO อย่างน้อยร้อยละ 87
	มี SiO_2 ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.5
ความละเอียด	มีร้อยละ 85 ผ่านตะแกรง 200 mesh (แบบสั่นมือ)

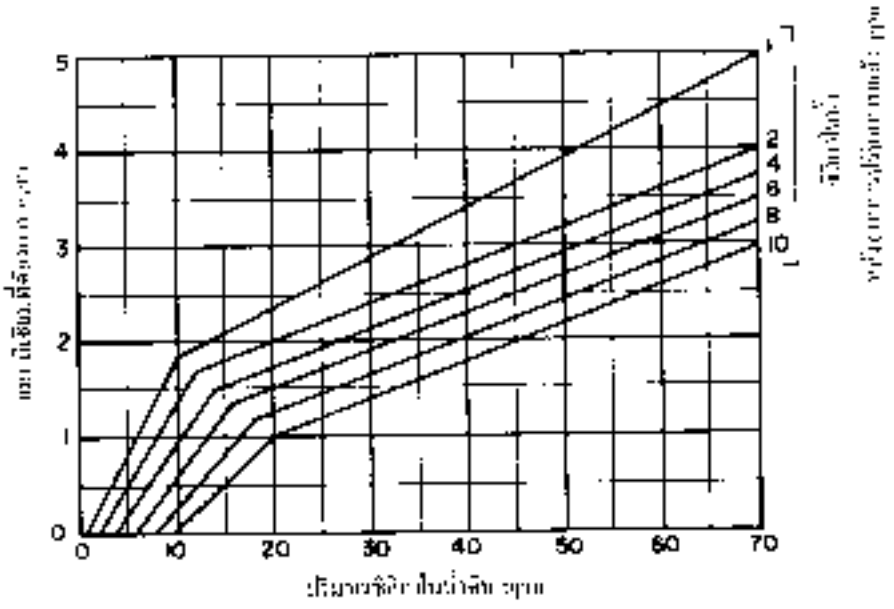
การที่เลือกใช้แมกนีเซียมออกไซด์ก็เพราะว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาได้สูงถึงร้อยละ 90 ซึ่งมากกว่าแมกนีเซียมในรูปอื่น ๆ และไม่ไปเพิ่มปริมาณสารที่ละลายในน้ำ การที่มีซิลิกาอยู่ในน้ำเสียจะก่อปัญหาหนักในน้ำ จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องตะกรันซิลิกาเกาะยึดในหม้อไอน้ำ และตะกรันซิลิกาในหม้อน้ำในกังหันที่ใบพัดเครื่องกังหันไอน้ำ กลไกที่แมกนีเซียมจะขจัดซิลิกาออกนั้นเกิดขึ้นโดยการดูดซับ (Absorption) ซิลิกาเข้ากับตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดในขั้นปฏิกิริยา

ประสิทธิภาพของการขจัดซิลิกาด้วยแมกนีเซียมนั้น สามารถประเมินได้จากตารางที่ 6.5 หรือจากรูปที่ 6.12 ซึ่งได้รวบรวมมาจากข้อมูลที่ใช้งานจริงของ Hot Process Softener ซึ่งการอุ่นเวียนตะกอนกลับมาใช้งาน

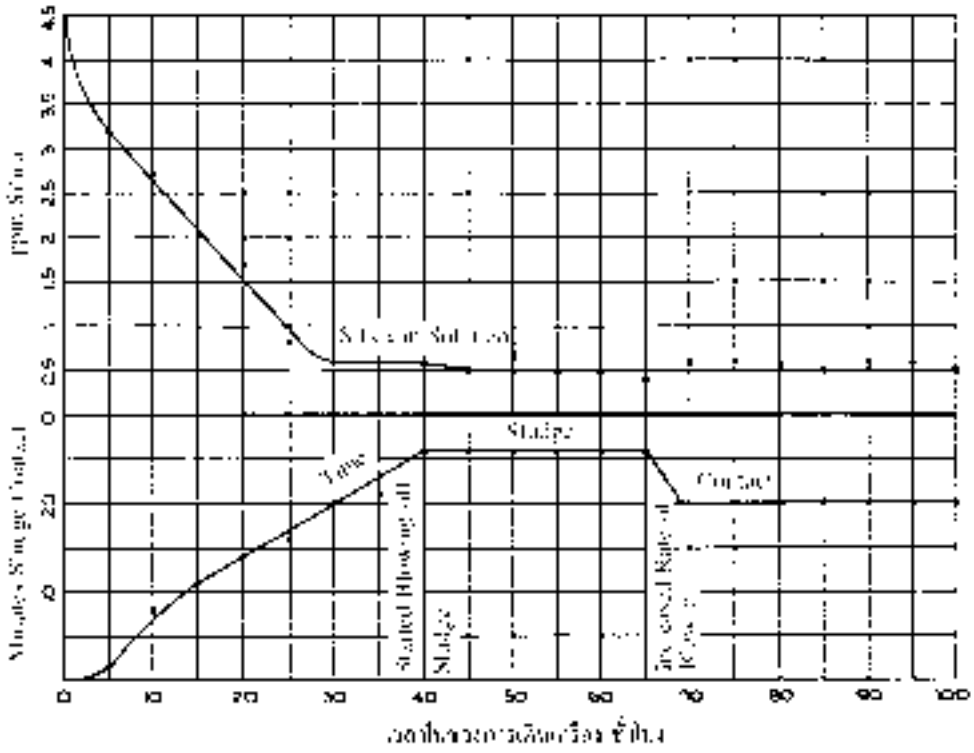
ตารางที่ 5.5 ความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมที่ตกค้างในการอัดปริมาณโดย Hot Process Softener Unit Solids Content

SiO_2 ในน้ำดิบ	4	5	6	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	50	60	70
SiO_2 ในน้ำที่ต้องการ																
10				-	11	20	28	36	44	61	80	99	118	156	194	232
8			-	12	24	37	45	52	61	77	96	90	96	121	146	168
6			14	28	39	50	62	67	75	93	85	102	121	156	189	178
5		8	22	37	49	56	70	77	92	97	94	108	127	110	194	167
4		16	30	42	54	61	80	92	97	95	109	117	125	161	196	197
3	10	23	40	52	65	77	90	95	100	105	111	125	130	166	174	211
2	20	35	55	64	74	90	100	106	112	117	120	130	112	171	200	240
1	40	50	70	78	88	102	120	124	134	135	140	150	160	190	215	270

หมายเหตุ $Mg(OH)_2$ และ MgO ในรูป $CaCO_3$ ที่ตัวกลางในถังแลกเปลี่ยนซีโอไลท์



รูปที่ 5.3 แสดงปริมาณแมกนีเซียมที่ต้องใช้ในการลดซิลิกาในน้ำดิบให้ลดลงเหลือปริมาณที่ต้องการ



รูปที่ 6.13 การลดปริมาณซิลิกาด้วยแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์
ใน Hot Process Sludge Blanket Softener ตามรูปกรณีในรูปที่ 6.1

จากรูปที่ 6.13 ถ้าเติมสารเคมีประเภทแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ลงไปในน้ำดิบ ปริมาณแมกนีเซียมและซิลิกาในน้ำดิบจะ ... ซึ่งสามารถประมาณได้ว่า น้ำที่ปรับสภาพด้วยแมกนีเซียมอยู่เท่าไร่ เช่น ถ้าในน้ำดิบมีแมกนีเซียม 0.03 epm และมี SiO_2 6 ppm ดังนั้น น้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะมีปริมาณซิลิกาเหลืออยู่ 2.5 ppm

จะเห็นได้ว่า ถ้าหากปริมาณแมกนีเซียมที่มีอยู่ในน้ำดิบไม่สามารถลดซิลิกาในน้ำลงได้ตามต้องการ ก็สามารถลดซิลิกาลงได้ตามต้องการในน้ำนี้ได้ด้วยการเติมสารประกอบแมกนีเซียมเพิ่มเข้าไปอีก ซึ่งจะสามารถลดซิลิกาในน้ำดิบให้มีเหลือเพียง 1 พีพีเอ็มได้ ถ้าต้องการให้น้ำมีปริมาณซิลิกา ... พีพีเอ็ม ... การพิจารณาว่าจะเติมแมกนีเซียม 0.8 epm ในน้ำดิบนั้นมีมากเกินไปหรือไม่ ถ้าน้ำดิบมีแมกนีเซียมอยู่แล้ว 0.41 epm จึงต้องเติมแมกนีเซียมเพิ่มเข้าไป 0.80-0.41 = 0.39 epm ในขั้นตอนการกำจัดซิลิกา นี้ด้วย

(1) pH ต้องควบคุม pH ในถังปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วง 10.5 ถึง 10.6 เท่านั้น ในน้ำที่มีไฮโดรเจนมีสัดส่วนของความกระด้างแมกนีเซียมต่อซิลิกาน้อยกว่า 0.1 เสมอ ดังนั้นถึงแม้จะเติมแมกนีเซียมลงไปเพื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมในน้ำ ปฏิกิริยาของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีความสำคัญมาก เพราะถ้าควบคุมให้ปฏิกิริยาดูดซับซิลิกาได้ดีแล้ว ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะต้องมีขนาดเล็กและมีแรงดึงดูดระหว่างแมกนีเซียมกับซิลิกาสูงพอที่จะดึงซิลิกาให้ตกตะกอนได้ ปฏิกิริยาการดูดซับจะเกิดได้ดีที่สุดที่ช่วง pH 10.3 ถึง 10.6 ซึ่งสามารถลดซิลิกาในน้ำดิบลงจนเหลือไม่เกิน 1 พีพีเอ็มได้

(2) *การควบคุมตะกอน* การควบคุมสภาพการตกตะกอนและคุณภาพของตะกอนมีความสำคัญมาก เพราะน้ำและอากาศที่ถูกกักอยู่ในตะกอนจะทำให้ตะกอนลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ ทำให้น้ำที่ออกจากถังปฏิกิริยามีความขุ่นเพิ่มขึ้น ตะกอนจุลินทรีย์ที่ลอยขึ้นมาบนผิวน้ำนี้ จะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันที่หัวจ่ายน้ำได้ง่าย ตะกอนที่อยู่ก้นถังส่วนหนึ่งต้องสูบกลับ ถ้าสูบกลับมากเกินไปจะทำให้ตะกอนมีความเข้มข้นสูงเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำลดลง เพราะในตะกอนจะมีแบคทีเรียบางส่วนที่ไม่ได้รับอาหารเหลืออยู่ในสภาวะที่ขาดแคลนอาหาร ซึ่งจะมีโอกาสจับชีวิตกันเองเป็นการเพิ่มค่าบีโอดีในการจับสิ่งเหลือได้เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพลดลง และมีกลิ่นเหม็นเกิดขึ้น นอกจากนี้ การสูบกลับตะกอนมากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาตะกอนไม่ตกตะกอนที่ก้นถังอีกด้วย

ตารางที่ 6.6 ข้อแตกต่างการปรับสภาพน้ำในกระบวนการ Hot Process Softener และหน่วยในประเทศไทย

คุณภาพ	น้ำดิบ	น้ำที่ผ่าน Hot Process Softener	น้ำที่ผ่านเครื่องกรองทรายแรงดันไซส์และเครื่องทำน้ำอ่อน
pH	7.5	10.5	9
ความกระด้าง ทั้งหมด	300	20	0
ความกระด้าง P-ฟีนัลฟ	0	21	0
M-ฟีนัลฟ	150	12	0
ซิลิกา ทั้งหมด	15	8.5	0.5
ความเป็นด่าง ทั้งหมด	95.5	45	0.5

(3) *เวลาเก็บกักน้ำในถังทำปฏิกิริยา* ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในเวลาประมาณ 15 นาที ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการขจัดซิลิกาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะจากผลการทดลองปฏิกิริยาของ HPS ได้ผลภายใน 5 นาทีแรก ซึ่งเพียงพอต่อการขจัดซิลิกาที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำลง ก็จะต้องเพิ่มเวลาเก็บกักน้ำให้นานขึ้นเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ และประสิทธิภาพในการขจัดซิลิกาจะลดลงอย่างมากด้วย

(4) *อุณหภูมิ* ถ้าปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 85 องศาเซลเซียสแล้ว ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของ HPS เพิ่มขึ้น

จุดประสงค์ในการใช้ Hot Process Softener นี้ก็เพื่อต้องการผลน้ำที่ออกมาดังนี้ คือ

1. เพื่อลดความกระด้างให้ได้มากที่สุด
2. ต้องการ HPS ให้น้อยที่สุด
3. ให้มีการขจัดซิลิกาได้มากที่สุด

การตรวจสอบคุณภาพน้ำหรือดูว่าใส่ปูนขาวมากหรือน้อยแค่ไหนนั้นดูได้จาก P-Alkalinity และ M Alkalinity ถ้าค่า 2P-M มีค่าเป็นลบแสดงว่าใส่ปูนขาวมากเกินไปเล็กน้อย จึงมีไบคาร์บอเนตที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่

กรณี 1 เพื่อลดความกระด้างให้ได้มากที่สุด ต้องควบคุมน้ำให้มีคุณภาพดังนี้

2P-M = 10 - 20 พีพีเอ็ม

ถ้าค่านี้มากกว่า 20 ก็ควรลดปริมาณปูนขาวลง และ M-Alkalinity = 50 - 60 พีพีเอ็ม

ความกระด้าง = 12 - 20 พีพีเอ็ม

กรณี 2 ต้องการ EDS ให้มากที่สุด

2P-M = 0 (ลดปูนขาวถ้าต่ำกว่านี้)

M-Alkalinity = 40 - 50 พีพีเอ็ม

ความกระด้าง = 15 - 25 พีพีเอ็ม

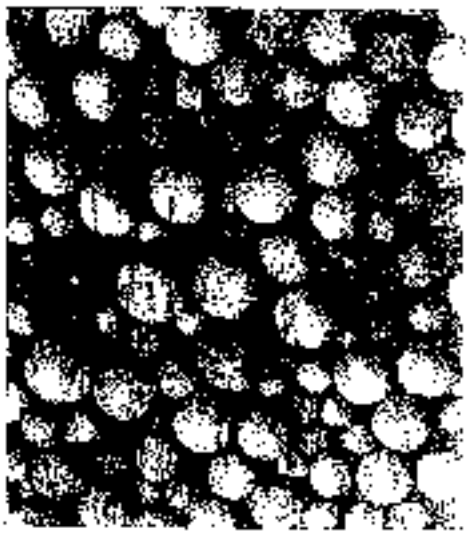
กรณี 3 ดูดซับซิลิกาให้มากที่สุด

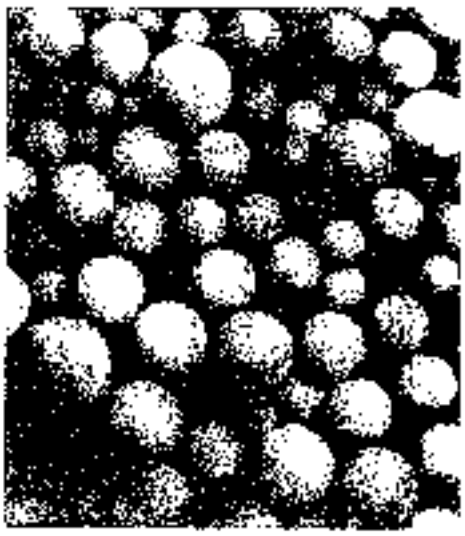
2P-M = 0 - 10 พีพีเอ็ม

บรรณานุกรม

1. **Betz Handbook of Industrial Water Conditioning** 6th ed. Betz Laboratories, 1962.
2. Brandvold, D.C. **Water Treatment – Industrial and Municipal.** New York : Vantage Press, 1975.
3. **Degremont Water Treatment Handbook.** 4th ed. Degremont S.A. France, 1973.
4. Lemen, R.M. "Removing Alkalinity from Plant Water Systems – principle and processes." **Plant Engineering** (June 13, 1974).
5. The Permutit Co. **Permutit** Technical Bulletin C 9541 **Hot Process Water Softeners.**
6. The Permutit Co. **Permutit Technical Training Seminar Manual.**
7. Powell, S.T. **Water Conditioning for Industry.** New York : McGraw-Hill Book Co., 1954.
8. The Permutit Co. **Water and Waste Treatment Data Book.** Sybron Corporation, 1961.

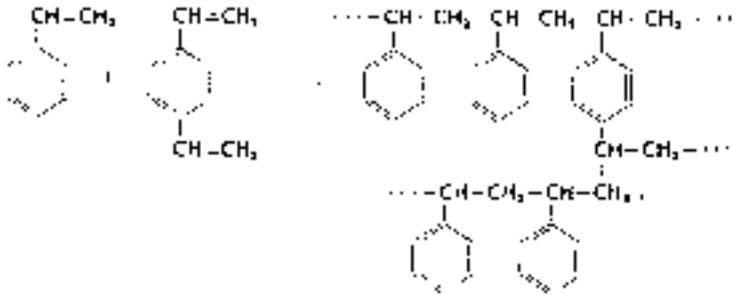
7 การกำจัดอิออน



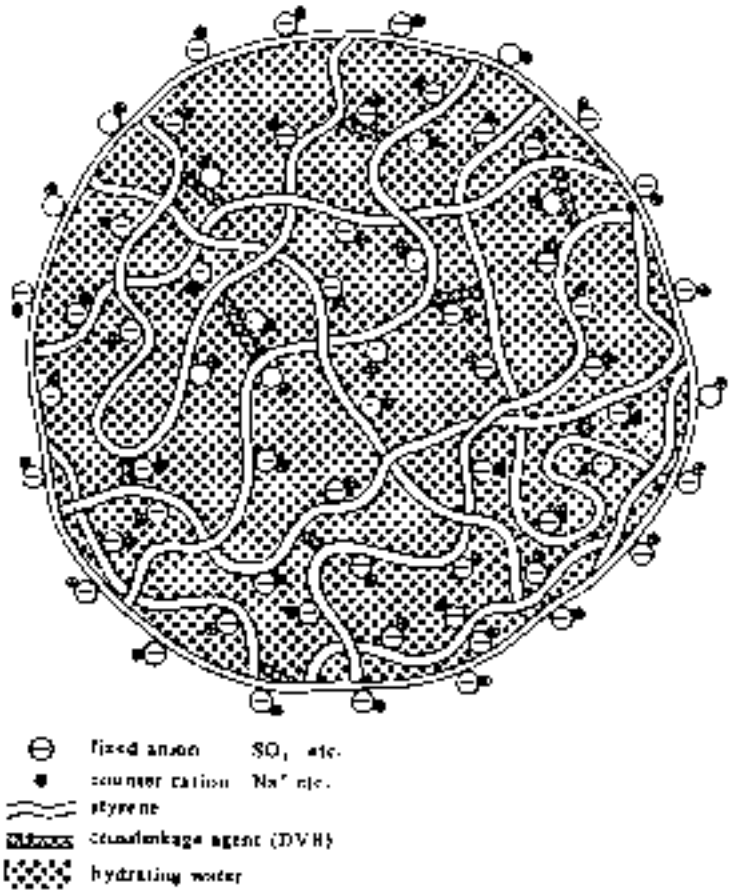


ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีน (Styrene) และ Divinylbenzene (DVB) เป็นตัวอย่างของปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแบบ Crosslinkage เกิดเป็นเรซิน (Resin) ซึ่งมีโครงสร้างแข็งแรง, เรซินที่จะมีประสิทธิภาพและความจุ (Capacity) หรือความสามารถในการจับไอออนต่าง ๆ สูง ควรมีปริมาณเรซินที่เชื่อมขวางกันมากพอสมควร แต่ไม่สามารถจับไอออนประจุเดียวกันได้ทุกชนิด แม้แต่ที่เป็นกรดอ่อน เช่น กรดซิลิซิก กรดคาร์บอนิก

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน DVB ที่มีหมู่ในเรซิน เรียกว่า Crosslinkage เรซินเม็ดแต่ละหมู่ในน้ำจะมีรูเล็ก ๆ เป็นโครงสร้างภายในมากมาย ไอออนจะแพร่เข้าไปสู่ภายในเรซินตามรูเล็ก ๆ เหล่านี้ ถ้ามีค่าการเชื่อม DVB สูงก็จะมีขนาดของรูเล็ก



รูปที่ 7.2 การสลายของพอลิเมอร์ Styrene และ DVB



รูปที่ 7.3 โครงสร้างของเม็ดเรซิน

7.1 การจำแนกประเภทของเรซิน

ในปัจจุบันมีการจำแนกเรซินออกเป็น 4 ประเภทหลัก

1. ชนิดประจุบวก กรดแก่ ตัวย่อ SC (Strong Acid Cation)
2. ชนิดประจุบวก กรดอ่อน ตัวย่อ WC (Weak Acid Cation)
3. ชนิดประจุลบ ด่างแก่ ตัวย่อ SB (Strong Base Anion)
4. ชนิดประจุลบ-ด่างอ่อน ตัวย่อ WB (Weak Base Anion)

เรซินทั้งสี่ชนิดนี้จะมีไอออนประจำตัวดังนี้

SC	$-SO_3^-$
WC	$-COO^-$
SB	$-NR_3^+$
WB	$-NH_2$, $-NHR$, $-NR_2$

โครงสร้างหลักของเรซินทุกประเภทจะเหมือนกัน และด่างกัดกร่อนที่ชนิดของไอออนกลุ่มที่ติดอยู่กับเรซินเท่านั้น

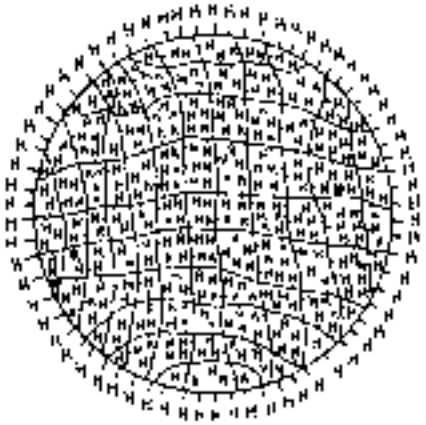
7.1.1 เรซินประจุบวก

ทำได้โดยให้มีกลุ่มไอออน SO_3H และ $COOH$ ติดอยู่กับส่วนที่เป็นโพลิเมอร์ของเรซิน (R = เรซิน) ดังนั้น จะเขียนสูตรได้ในรูป $R-SO_3H$ หรือ $R-COOH$ ได้ เมื่อเรซินอยู่ในน้ำจะแตกตัวได้ดังนี้

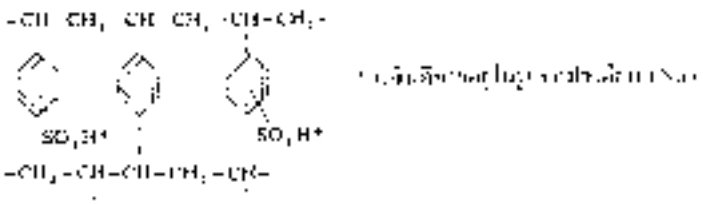
$$R-SO_3H \longrightarrow R-SO_3^- + H^+$$

$$R-COOH \rightleftharpoons R-COO^- + H^+$$

เรซินแบบ $R-SO_3H$ จะแตกตัวได้ง่าย และเมื่อแตกตัวจะให้ความเป็นกรดแก่ในลักษณะเดียวกับ HCl และ H_2SO_4 จึงเป็นกรดแก่ ดังนั้นจึงมีสมบัติเช่นเดียวกับ SC แต่ถ้าเป็นเรซินแบบ $R-COOH$ จะแตกตัวได้ยากกว่ามาก จึงเป็นกรดอ่อน ส่วนใหญ่ผู้ผลิตเพื่อการค้าจะทำเป็น WC หรือ SC สามารถแตกตัวได้ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดต่างกัน แต่ WC จะแตกตัวได้ในสารละลายที่เป็นด่างหรือเป็นกลางเท่านั้น



รูปที่ 7.1 โครงสร้างของเรซิน SC มีหมู่ในสภาพที่แลกเปลี่ยน



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของเรซิน SC แบบหนึ่ง

ที่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในรูป R-SO$_3$Na ได้จากปฏิกิริยาของกรดแก่กับเกลือโซเดียมของกรดแก่ เช่น ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$R-SO_3Na + HCl \rightleftharpoons R-SO_3H + NaCl$$

$$2R-SO_3Na + H_2SO_4 \rightleftharpoons 2R-SO_3H + Na_2SO_4$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้น เมื่อต้องการล้างเรซินที่ใช้งานแล้วให้กลับมาใช้งานได้ใหม่ ก็ทำได้โดยการนำเรซินที่ใช้งานแล้วมาล้างด้วยกรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟิวริก ซึ่งจะทำให้หมู่ฟังก์ชันอยู่ในรูปของกรดแก่ เช่น R-SO$_3$H ดังสมการข้างต้น ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า การสร้างสภาพเรซินขึ้นใหม่ (Regeneration) ดังสมการ

$$R-SO_3H + NaCl \rightleftharpoons R-SO_3Na + HCl$$

$$2R-SO_3H + CaCl_2 \rightleftharpoons (R-SO_3)_2Ca + 2HCl$$

$$R-SO_3H + NaOH \rightleftharpoons R-SO_3Na + H_2O$$

ถ้าใช้งานน้ำผ่านเรซิน SC แล้วเรซินนี้จะดักจับไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมไว้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Ca^{2+} \\ Mg^{2+} \\ 2Na^{+} \end{bmatrix} \begin{matrix} 2HCO_3^- \\ SO_4^{2-} \\ 2Cl^- \end{matrix} + 2RSO_3H \rightleftharpoons 2RSO_3 \begin{matrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{matrix} + \begin{matrix} 2H_2CO_3 \\ H_2SO_4 \\ 2HCl \end{matrix}$$

เรซิน SC ถ้าใช้งานจนกระทั่งประจุแลกเปลี่ยนได้ในโมเลกุลเรซินหมดไป (Exhaust Cycle) ก็จำเป็นต้องทำการล้างเรซินเพื่อกำจัดน้ำเสีย (Sulfonate) ออกไปก่อนเรซินจะกลับมาใช้งานได้ใหม่ (Service Cycle)

การดักจับไอออนของประจุบวกของเรซิน WC ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็น -COOH นั้นจะต่างกับเรซิน SC ตรงที่ไม่สามารถดักจับไอออนของประจุบวกได้ทุกชนิด แต่จะดักจับได้เฉพาะไอออนของประจุบวกที่มีค่าด่างสมมูลเท่ากับค่าความกระด้างชั่วคราว เช่น $Ca(HCO_3)_2$ และ $Mg(HCO_3)_2$ เท่านั้น ดังสมการ

$$R-COOH + NaOH \rightleftharpoons RCOONa + H_2O$$

$$R-COOH + NaHCO_3 \rightleftharpoons RCOONa + H_2O + CO_2$$

ดังนั้นจึงสามารถใช้เรซิน WC ในการกำจัดความกระด้างชั่วคราวได้ โดยไม่ต้องมีการปรับสภาพเรซินก่อนการใช้งานเหมือนกับเรซิน SC ซึ่งมีข้อดีกว่าเรซินชนิดนี้ แต่ก็มีข้อเสียที่ว่าเรซินชนิดนี้ไม่สามารถใช้งานกับการกำจัดน้ำกระด้างถาวรได้

$$R\text{-}COONa + H_2O \longrightarrow R\text{-}COOH + NaOH$$

ถ้าหากน้ำประกอบด้วย WC ในรูปไอออนของ Ca^{2+}, Mg^{2+} และ $2Na^{+}$ จะเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดอ่อน ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Ca^{2+} \\ Mg^{2+} \\ 2Na^{+} \end{bmatrix} (HCO_3^-)_2 + 2\,RCOOH \longrightarrow 2\,RCOO\begin{bmatrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{bmatrix} + 2\,H_2CO_3$$

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด WC จะใช้งานได้ที่ pH สูงกว่า 5 ขึ้นไป และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีที่สุดในช่วง pH 6-14 เรซิน WC ที่ใช้ดักจับไอออนบวกแล้วจะต้องฟื้นสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟิวริก (Decationization)

7.1.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดเบส

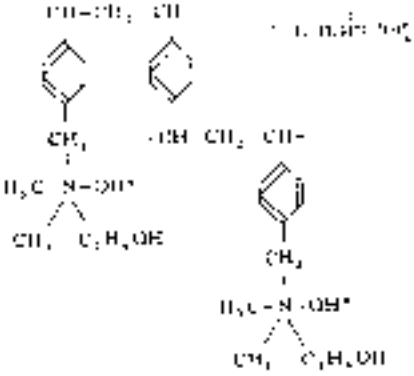
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดเบสมีหมู่ที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนที่สำคัญ ได้แก่ Quaternary Ammonium, $-NH_2$, NHR และ NR_2 ซึ่งหมู่ที่ทำงานได้ดีที่สุดคือหมู่ Quaternary Ammonium ซึ่งมีปฏิกิริยาดังนี้

$$R\text{-}NOH \rightleftharpoons R\text{-}N^{+} + OH^{-}$$

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด SB จะมีหมู่ที่ทำงานคือ Quaternary Ammonium ซึ่งจะมีปฏิกิริยาได้ดีที่ pH สูงกว่า 7 ขึ้นไป ส่วนเรซิน WB จะมีหมู่ที่ทำงานคือ Primary Amine ไปจนถึง Tertiary Amine เช่น $R\text{-}NH_2$ ซึ่งจะแลกเปลี่ยนได้ดีที่

$$R\text{-}NH_2 + H_2O \rightleftharpoons R\text{-}NH_3^{+} + OH^{-}$$

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดเบสที่มีหมู่ที่ทำงานเป็นหมู่ Quaternary Ammonium จะมีโครงสร้างทางเคมีดังนี้



รูปที่ 7.2 โครงสร้างของเรซิน SB แบบหนึ่ง

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด SB ที่ใช้งานอยู่ในรูปของคลอไรด์ (R-NCl) นั้นเมื่อเกิดการอิ่มตัวของหมู่แลกเปลี่ยนไอออนแล้ว จะต้องนำมาฟื้นสภาพให้อยู่ในรูป R-NOH ก่อนด้วยการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ

$$R\text{-}NCl + NaOH \longrightarrow R\text{-}NOH + NaCl$$

ถ้าเรซินชนิด SB ใส่ลงในสารละลายของเกลือแกงและกรดเกลือจะเกิดขบวนการดังนี้

$$R\text{-}NOH + NaCl \longrightarrow R\text{-}NCl + NaOH$$

$$R\text{-}NOH + HCl \longrightarrow R\text{-}NCl + H_2O$$

เรซินชนิด SB ที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์จะจับอิออนประจุลบซึ่งเป็นกรดออนินทรีย์ได้ดี

$$\begin{bmatrix} H_2SO_4 \\ 2\,HCl \\ 2\,H_2SiO_3 \\ 2\,H_2CO_3 \end{bmatrix}^{-} + 2\,R\text{-}NOH \longrightarrow 2\,R\text{-}N \begin{bmatrix} SO_4 \\ Cl \\ 2\,HSiO_3 \\ 2\,HCO_3 \end{bmatrix} + 2\,H_2O$$

เรซินชนิด SB เมื่อใช้แล้วต้องใช้สารโซดาไฟล้างจึงจะกลับคืนสู่สภาพเดิม

เรซินชนิด WB จะแลกตัวประจุอิออนได้ในสารละลายที่มีกรดแก่ปนอยู่ด้วย สามารถแลกเปลี่ยนกับเกลือแกงได้ และทำงานกลับกัน และเกลือของกรดอ่อน เช่น NH_4Cl แต่ไม่สามารถจับกรดไฮโดรคลอริก NaCl ได้

$$R\text{-}NH_2 + H_2O \longrightarrow RNH_3OH$$

$$R\text{-}NH_3OH + HCl \longrightarrow RNH_3Cl + H_2O$$

$$R\text{-}NH_3OH + NH_4Cl \longrightarrow RNH_3Cl + NH_4OH$$

การล้างเรซินชนิดนี้ทำได้ง่าย ถ้าไม่ใช้สารโซดาไฟจะใช้โซดาแอชและน้ำแอมโมเนีย (NH_4OH) ล้างได้ แม้ว่าจะล้างได้ง่ายแต่ก็ควรปฏิบัติเช่นเดียวกับน้ำปล่อยอิออนที่จับไว้ได้ง่ายเช่นกัน

$$RNH_3Cl + H_2O \longrightarrow RNH_3OH + HCl$$

เรซินชนิด WB ใช้จับอิออนประจุลบของกรดแก่หรือ FMA (Free Mineral Acid) ได้

$$\begin{bmatrix} H_2SO_4 \\ 2HCl \\ 2HNO_3 \end{bmatrix} + 2\,R\text{-}NOH \longrightarrow 2\,R\text{-}N \begin{bmatrix} SO_4 \\ 2Cl \\ NO_3 \end{bmatrix} + 2H_2O$$

เรซินชนิดนี้จะไม่จับอิออนของกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดซิลิสิก ในการใช้งานจะใช้คู่กับ SB เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการล้างฟื้นฟูประสิทธิภาพของเรซินและลักษณะเรซินเหมือนกันทั้งหมดยกเว้นความจุ SB และใช้ในงานที่จำเป็นต้องการปอนไดออกไซด์และซิลิกาในน้ำผลิตสำคัญมากเป็น

7.2 ลำดับความยากง่ายในการถูกจับของอิออน (Ion Selectivity)

สำหรับอิออนประจุบวก

$Ba^{2+} > Pb^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+} > Ni^{2+} > Cd^{2+} > Co^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} >$

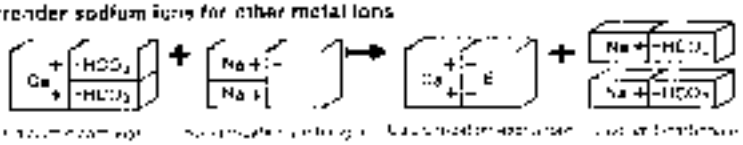
$Ti^{+} > Ag^{+} > Cs^{+} > Rb^{+} > K^{+} > NH_4^{+} > Na^{+} > Li^{+}$

ลำดับอิออนที่มีมากจะถูกจับก่อนเมื่อปริมาณเท่ากันกับอิออนที่มีน้อยกว่าอยู่ทางซ้าย

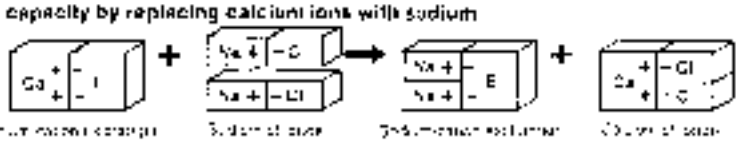
สำหรับอิออนประจุลบ

Citrate > SO_4^{2-} > Oxalate > I^- > NO_3^- > CrO_4^{2-} > Br^- > SCN^- > Cl^- > Formate > Acetate > F^-

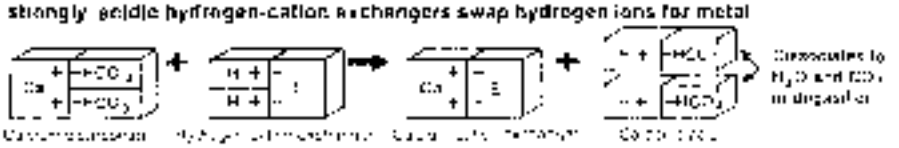
Sodium-cation exchangers surrender sodium ions for other metal ions



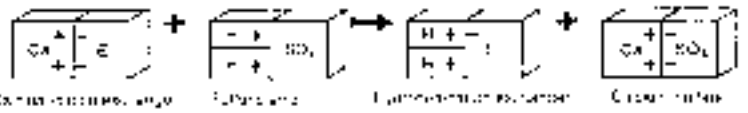
. . . and regeneration restores capacity by replacing calcium ions with sodium



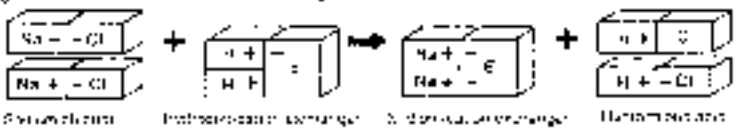
Weakly or strongly acidic hydrogen-cation exchangers swap hydrogen ions for metal



. . . and regeneration with acid restores hydrogen exchange capacity

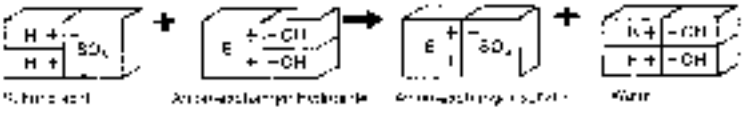


Strongly acidic cation exchanger turns sodium chloride into hydrochloric acid

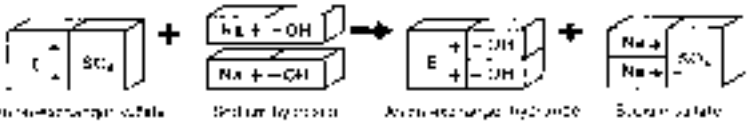


รูปที่ 7.7 ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกและการล้างเรซิน

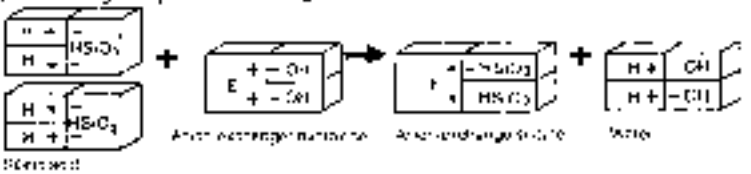
Weakly basic anion exchanger takes on sulfate ion, gives up hydroxide to form water



. . . and regeneration with caustic restores capacity for hydroxide exchange



Strongly basic anion exchanger does good job of removing silica

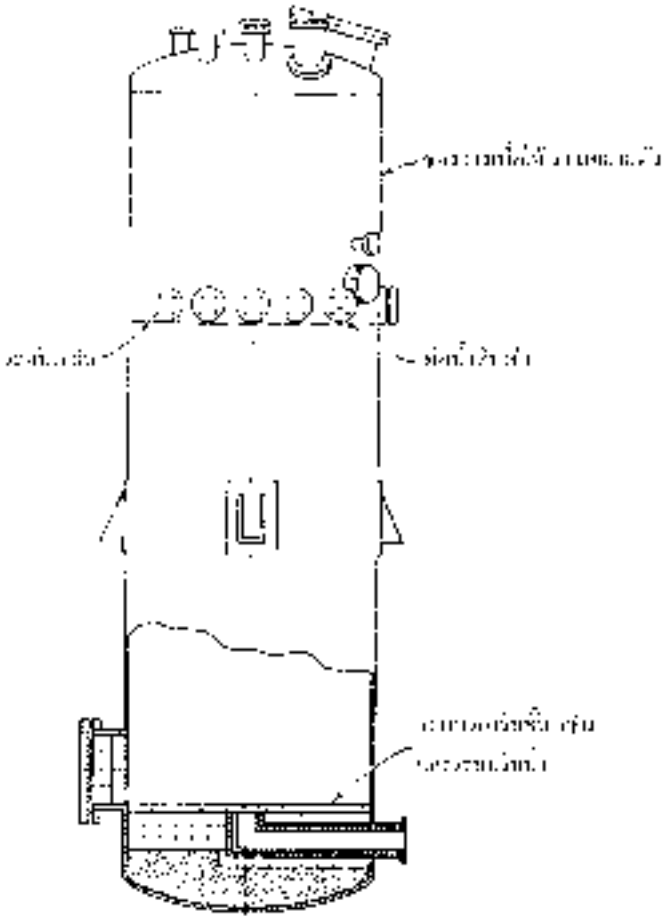


. . . with caustic regeneration restoring exchange capacity

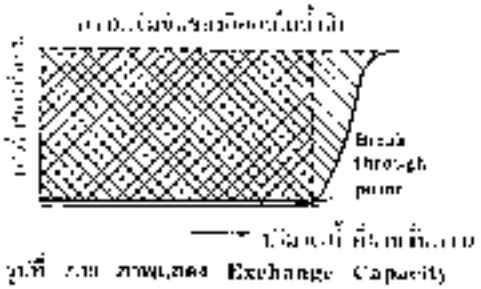
รูปที่ 7.8 ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุลบและการล้างเรซิน

7.3 ปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเรซิน

ปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินนี้เรียกว่า Exchange Capacity ซึ่งหมายถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินแต่ละชนิดได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งเรซินแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินและชนิดของประจุที่ต้องการแลกเปลี่ยน เช่น เรซินชนิดหนึ่งอาจมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของโซเดียมได้ดีกว่าประจุบวกของแคลเซียม ในขณะที่เรซินอีกชนิดหนึ่งอาจมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแคลเซียมได้ดีกว่าประจุบวกของโซเดียม ดังนั้นในการเลือกใช้เรซินชนิดใดชนิดหนึ่งในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของโซเดียมหรือแคลเซียม จึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินชนิดนั้นๆ ด้วย ในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของโซเดียมออกจากน้ำนั้น เรซินจะถูกทำให้อยู่ในรูปของเกลือโซเดียม เช่น NaCl ซึ่งเมื่อน้ำผ่านเข้าไปในถังแลกเปลี่ยนประจุ ประจุบวกของแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำจะถูกแลกเปลี่ยนกับประจุบวกของโซเดียมที่อยู่บนเรซิน ดังสมการ



รูปที่ 7.9 รูปตัดของหน่วยแลกเปลี่ยนประจุเรซิน



รูปที่ 7.10 ภาพแสดง Exchange Capacity

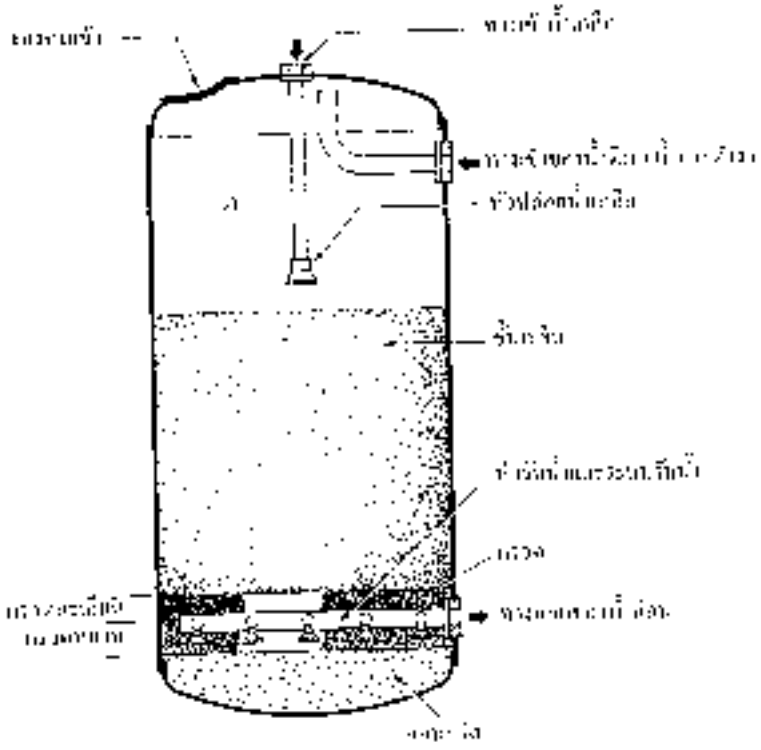
ในรูปที่ 7.10 เป็นการแสดงตัวอย่างของการกำจัดไอออนของแข็งโดยเรซิน ซึ่งในที่นี้คือการกำจัดโซเดียมไอออน (Na^+) ออกจากน้ำ ซึ่งน้ำที่ผ่านเรซินจะมีโซเดียมไอออนลดลงมาก แต่หลังจากใช้น้ำเกลือล้างเรซินแล้ว จะพบว่าน้ำที่ออกมาจะมีโซเดียมไอออนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดนี้เรียกว่า Break Through Point (B.T.P.) ดังนั้นจุดนี้จะเป็นจุดที่ต้องหยุดใช้งานเรซิน แล้วทำการล้างใหม่ เพื่อที่จุดนี้จะมีโซเดียมไอออนน้อยลง ซึ่งน้ำที่ออกมาจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำที่ไหลเข้าในที่สุด

หน่วยของ Exchange Capacity มีดังนี้

meq/ml R (R = เรซิน, meq = milli-equivalent)

g - $CaCO_3$/l R

Kilograin - $CaCO_3$/ft^3 R



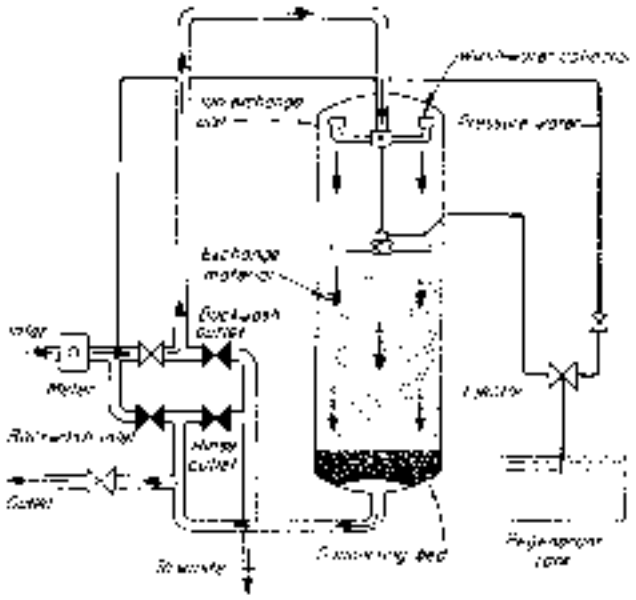
รูปที่ 7.10 แสดงรายละเอียดภายในของอุปกรณ์ที่บรรจุเรซิน

7.4 อุปกรณ์และการใช้งานเรซิน

เมื่อนำเรซินไปใช้งานในที่ต่างๆ ในระบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ และอุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.11 และ 7.12 ขั้นตอนการใช้งานเรซินจากโปรแกรมน้ำผ่านขั้นตอนดังนี้คือ

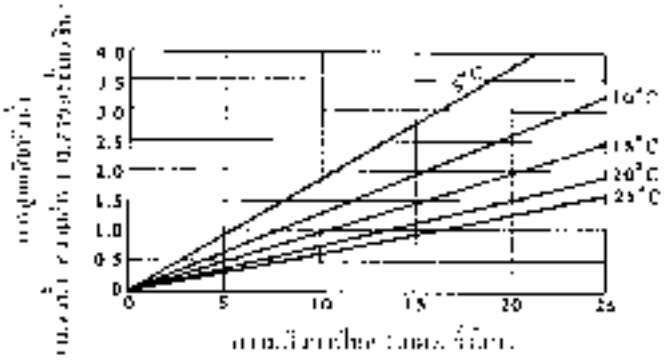
ล้างย้อนกลับ → ดูดน้ำเข้า → ดันเข้า → ล้างทิ้ง

Backwash Regeneration Push out Rinse

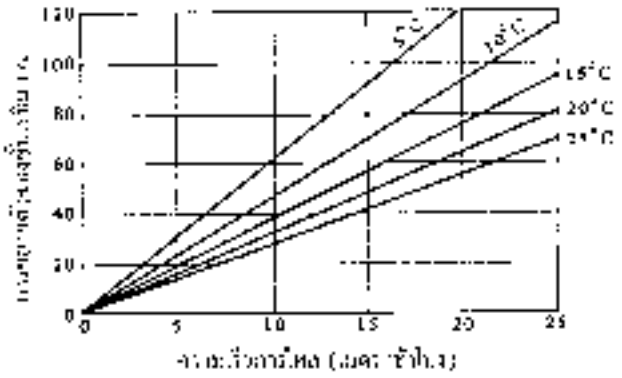


รูปที่ 7.12 การต่อของเครื่องกรองแบบไหลขึ้น

1. ล้างกลับ เมื่อกรองไปนาน ๆ ตะกอนที่ถูกกรองไว้จะอุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมากขึ้น ทำให้ความดันที่ใช้ในการกรองสูงขึ้น ปริมาณน้ำที่กรองได้ลดลง จึงต้องล้างทรายเพื่อกำจัดตะกอนที่อุดตันออกไป โดยการสูบน้ำสะอาดจากถังเก็บน้ำกรองให้ไหลย้อนขึ้นไปในชั้นทราย ทำให้ทรายฟูขึ้นและตะกอนที่อุดตันหลุดออกไปกับน้ำล้าง ในการล้างกรองนี้ต้องใช้อัตราการไหลที่เหมาะสม โดยให้ชั้นทรายขยายตัวประมาณ 30-40 % ถ้าน้ำไหลมากเกินไปทรายจะหลุดออกไปกับน้ำล้างด้วย แต่ถ้าน้อยเกินไปก็ล้างไม่สะอาด เมื่อล้างกรองจนสิ้นสุดการขยายตัวของทรายแล้ว ต้องปล่อยน้ำล้างทิ้งไปสักระยะหนึ่งก่อนที่จะเริ่มการกรองใหม่ เพื่อไล่ฟองอากาศและตะกอนที่ลอยอยู่ออกไปให้หมด

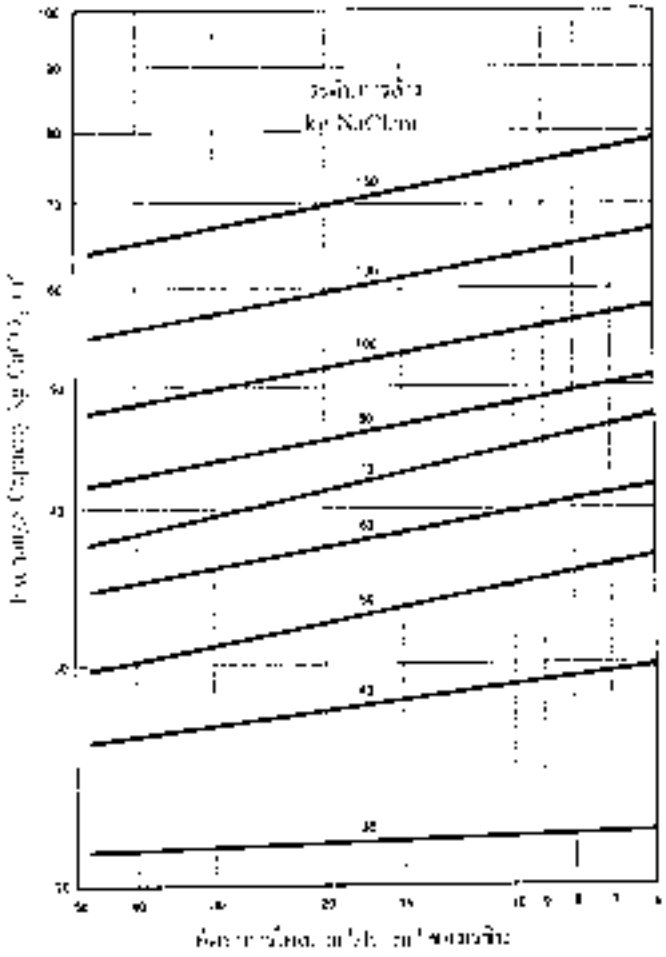


รูปที่ 7.13 การสูญเสียความดันในการไหลผ่านชั้นทรายชนิดหนึ่งที่อุณหภูมิและอัตราไหลต่าง ๆ



รูปที่ 7.14 การแสดงตัวของรั้นเรซินที่อุณหภูมิและอัตราไหลต่าง ๆ ของเรซินชนิดหนึ่ง

2. ล้างน้ำยา ใช้เมื่อการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ต้องการ น้ำยาเบื้องต้นที่ใช้ล้างคือ น้ำเกลือ หรือกรด ขึ้นกับชนิดของเรซินและการใช้งาน ในการใช้งานทั่วไปจะใช้น้ำเกลือ ปริมาณและความเข้มข้นของน้ำยาล้างที่ใช้ขึ้นกับชนิดของเรซินและจุดประสงค์ในการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วการใช้เรซินชนิดอ่อนจะใช้น้ำยาล้างน้อยที่สุด เพื่อให้น้ำยาสามารถกระจายไปสู่เม็ดเรซินต่างกันได้

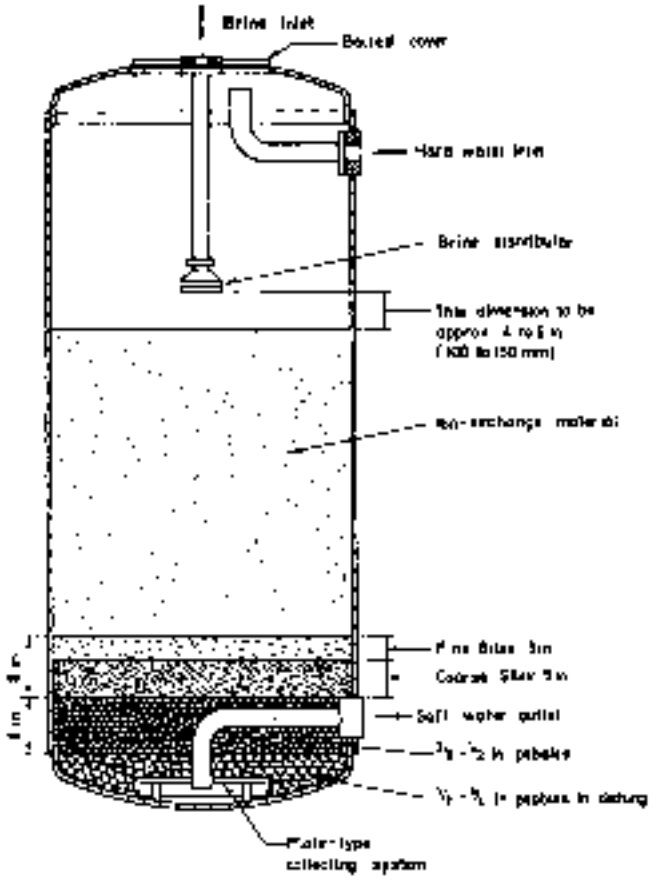


รูปที่ 7.15 ประสิทธิภาพในการล้างเรซินขึ้นกับปริมาณน้ำยาที่ใช้ล้าง (โจทย์นี้ใช้น้ำเกลือ)

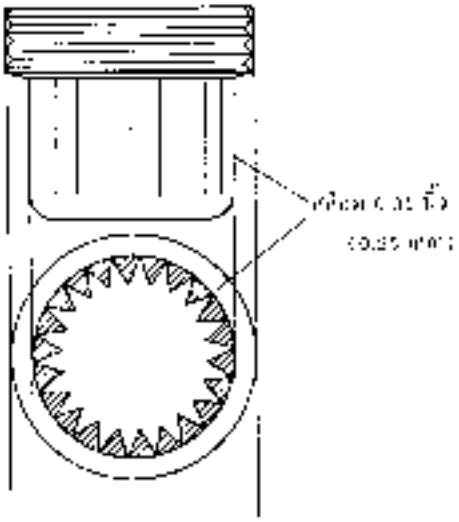
3. ล้างซ้ำ หลังจากล้างน้ำเค็มแล้วยังมีน้ำเกลือเหลืออยู่ในชั้นเรซิน ดังนั้น ต้องทำการล้างซ้ำด้วยน้ำที่สะอาด ประมาณ 2 เท่าของปริมาตรเรซิน ปล่อยน้ำไหลผ่านชั้นเรซินลงสู่ด้านล่างของถังกรองและดักรวบรวมไว้ผสมกับการล้างน้ำแรก ปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างซ้ำนี้จะรวมกับปริมาตรของน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างน้ำแรกเป็นส่วนต่อเนื่องของการล้างน้ำแรก เพราะในขณะที่ใส่น้ำยาล้างในขั้นแรกนั้น ที่ก้นถังไม่มีเรซินที่ดูดซับน้ำเค็มอยู่เลย ดังนั้นจึงมีโอกาสดูดซับได้มากขึ้น

4. ล้างเร็ว หลังจากล้างซ้ำแล้วก็อาจจะมีน้ำเค็มล้างเรซินตกค้างอยู่อีก จึงต้องใช้น้ำสะอาดเช่นเดียวกับการล้างซ้ำล้างด้วยอัตราไหลที่สูงขึ้น ปกติจะใช้ความเร็วเท่ากับเมื่อตอนใช้งาน ล้างจนกว่าเรซินจะฟื้นคืนสภาพเดิมและพร้อมที่จะใช้งานได้ ค่าที่วัดเครื่องวัดน้ำอ่อน (Softening) ที่ล้างจนกว่าน้ำที่ไหลผ่านเรซินจะมีความกระด้างต่ำสุด และค่าในเครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ (Demineralization) ที่ล้างจนมีค่าความนำไฟฟ้าต่ำสุด

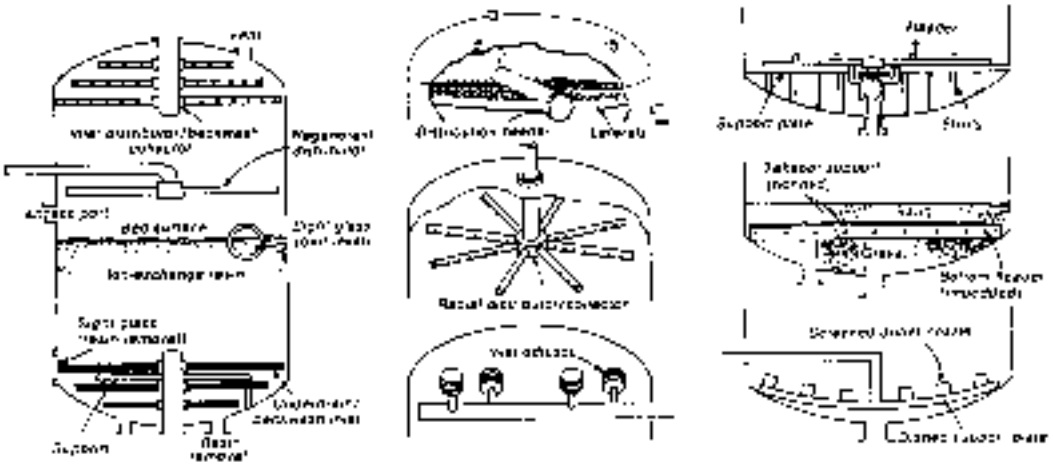
5. ใช้งาน หลังจากการล้างได้สิ้นสุดแล้วโดยที่น้ำผ่านชั้นเรซินมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่ตั้งไว้ก็ปล่อยให้น้ำดิบไหลผ่านเพื่อขับสิ่งสกปรกในน้ำใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 รายละเอียดภายในของเครื่องทำน้ำอ่อนแบบเรซิน



รูปที่ 7.17 รายละเอียดของหัวรับน้ำ (Strainer) ชนิดหนึ่งที่ใช้กับเรซิน

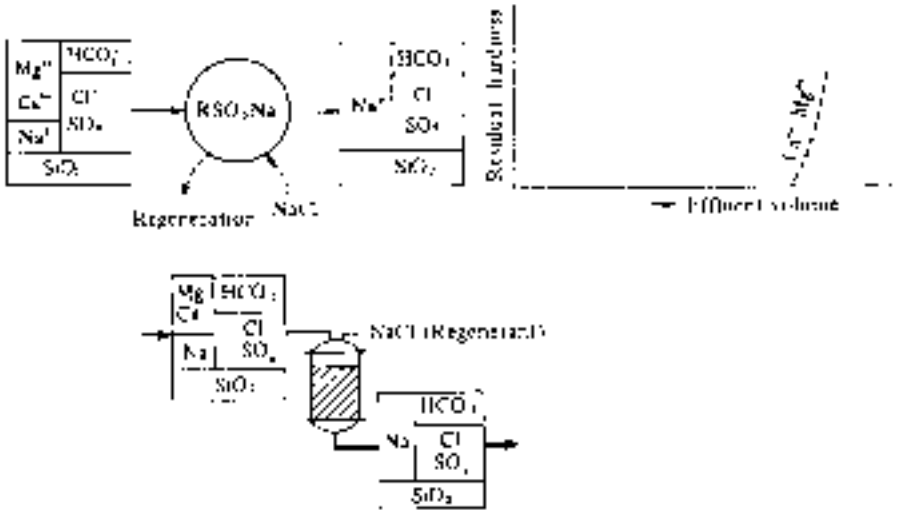


รูปที่ 7.18 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ภายในชนิดต่าง ๆ

7.5 การทำน้ำอ่อน (Softening)

ระบบขจัดไอออนประจุบวกบางชนิดออกนั้นที่ใช้งานกันมาก คือการขจัดความกระด้างเพื่อผลิตน้ำอ่อน หรือน้ำที่ไม่กระด้าง วิธีการทำน้ำอ่อนนี้ จะใช้วัสดุจำพวก SC และล้างฟื้นฟูประสิทธิภาพด้วยน้ำเกลือ เรซินที่ใช้ในการขจัดความกระด้างนี้ แม้จะมีชนิดประจุบวกเหมือนกัน แต่มีชื่อที่นิยมเรียกกันว่า ซีโอไลต์ (Zeolite) หรือโซเดียมซีโอไลต์ (Sodium zeolite) ซึ่งในอดีตครั้งที่ยังไม่มีการทำน้ำอ่อนด้วย ที่เรียกเช่นนี้เนื่องจากในสมัยแรกนั้นเขาจัดความกระด้างใช้ทรายเขียว (Green Sand) ซึ่งมีส่วนประกอบของ Alumino Silicate และมีเกลือ ซีโอไลต์ในการขจัดสิ่งสกปรกบางอย่างออกจากน้ำ ดังนั้น แม้ในสมัยนี้จะมีการ

พัฒนาการขึ้นครั้งแรกขึ้นมาแล้วก็ยังมีปัญหาเรื่องการล้างเม็ดเรซินที่ใช้แล้วด้วยน้ำเกลือ (NaCl) และการอัดแน่น (Porous) ทั้งสองการเกิดขึ้นพร้อมกันในเครื่องเดียว



รูปที่ 7.19 การจับเฉพาะคัดกรองและความกระด้างของเครื่องทำน้ำอ่อน

ในรูปที่ 7.19 แสดงให้เห็นว่าน้ำที่มีความกระด้างสูงจะถูกเรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดแก่ ซึ่งจำเพาะกับแคลเซียมและแมกนีเซียมเท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะเรซินนี้มีกรดเป็นหมู่ SO_3^- และคู่ไปกับไฮโดรเจน (Na^+ ions) ไม่ใช่ไฮโดรเจน (H^+ ions) ดังนั้นเมื่อน้ำกระด้างไหลผ่านเรซินแล้ว แคลเซียมและแมกนีเซียมจะถูกจับด้วยเรซินได้ดีกว่า

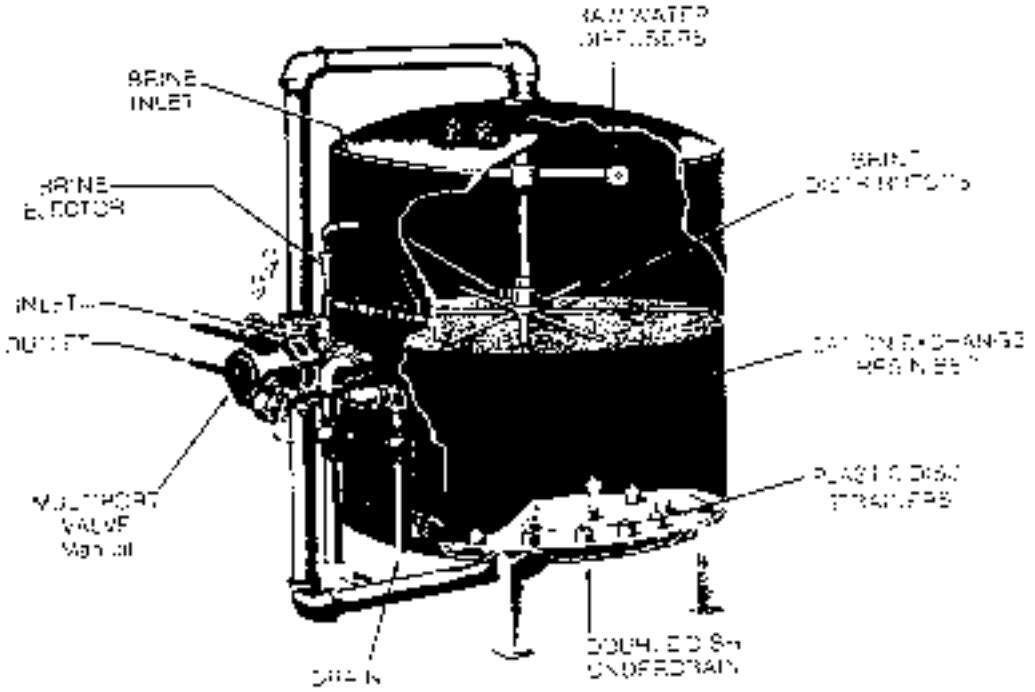
$$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$$

ดังนั้น เรซินที่อยู่ในรูปของโซเดียมจึงสามารถจับไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมออกจากน้ำได้ง่ายกว่า ให้ Z = เรซิน

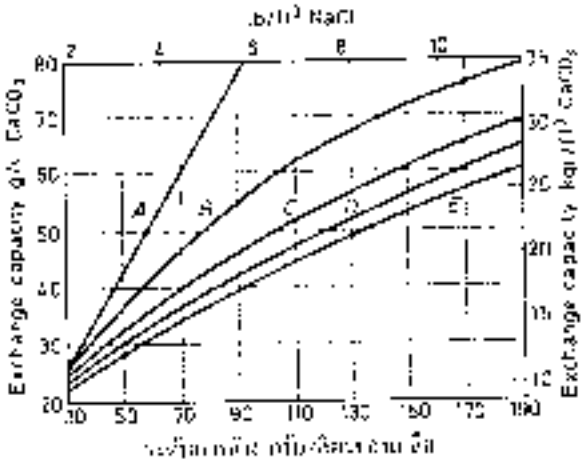
$$\begin{bmatrix} Ca \\ Mg \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SO_4 \\ 2Cl \\ 2HCO_3 \end{bmatrix} + Na_2Z \rightarrow Z \begin{bmatrix} Ca \\ Mg \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2NaHCO_3 \\ Na_2SO_4 \\ 2NaCl \end{bmatrix}$$

เครื่องทำน้ำอ่อนที่มีความจุมากสุดจะมีเรซินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดประมาณ 0.4–0.6 มม. และมีเรซินขนาดใหญ่ 1–5 มม. ปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ความสูงของชั้นเรซินประมาณ 0.25–1.0 ฟุต ศักย์ของการอัดแน่นของเรซินประมาณ 5–22 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ความดันเหล่านี้ ชั้นเรซินสูง 2 ฟุต จะมีน้ำไหลได้ 0.125 ถึง 8V ต่อนาที (BV = Bed Volume ปริมาตรเรซิน) ขึ้นกับความกระด้างของน้ำ

เครื่องทำน้ำอ่อนที่มีความจุมากสุดจะ แต่ในทางการค้าจะผลิตสำหรับที่ใช้งานเฉพาะที่ เท่านั้น ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นเกรนต่อชั่วโมง ซึ่งมีหน่วยเป็นเกรนต่อชั่วโมง ประหยัดพลังงานไฟฟ้า ในการใช้งานนั้นจะมีน้ำไหลผ่านชั้นเรซินที่มีความเร็วเชิงเส้นตรงตามที่ กำหนด นั่นคือจะมีน้ำไหลผ่านชั้นเรซินในอัตราที่กำหนดไว้



รูปที่ 7.20 เครื่องทำน้ำอ่อน (Softener) แบบหนึ่ง

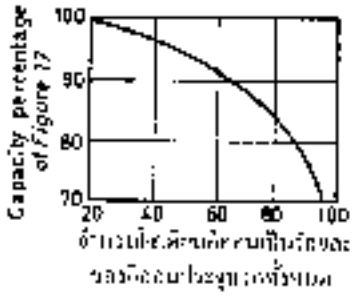


รูปที่ 7.21 ความสามารถในการขจัดกลิ่นของกระดูก สำหรับน้ำที่มีความกระด้าง 250 พีพีเอ็ม

A ...
B ...
C ...
D ...
E ...

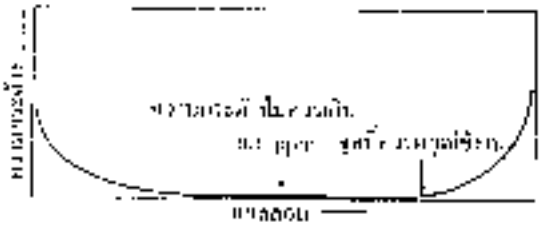
จากรูปที่ 7.23 จะเห็นได้ว่า ถ้าใช้งานที่อัตราไหลสูงกว่า 6 : 1 BV/นาทีแล้ว ประสิทธิภาพของเรซินจะลดลง การควบคุมอัตราไหลต่อหน่วยเวลาที่ดีที่สุด และเหมาะที่จะใช้ BV/นาทีแล้ว มักใช้ค่า SV (Space Velocity) เป็นดัชนีชี้วัดได้ ค่า SV ทั่วไปจะหมายถึงจำนวนครั้งที่น้ำไหลผ่านเรซินในเวลาหนึ่งชั่วโมง เช่น ถ้าเรซินมีปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตร และให้น้ำไหลผ่านด้วยอัตราไหล 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่า SV = 2/5

ถ้าน้ำดิบเป็นน้ำที่มีปริมาณไอออนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณไอออนประจุเดียว (ในกรณีการทำน้ำอ่อน ไอออนประจุเดียวจะมี Ca^{+2}, Mg^{+2} และ Na^{+} เท่านั้น) ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดักไอออนของเรซินลดลง ในการใช้งานที่ต้องการค่าประสิทธิภาพของเรซินสูงๆ ก็ทำได้

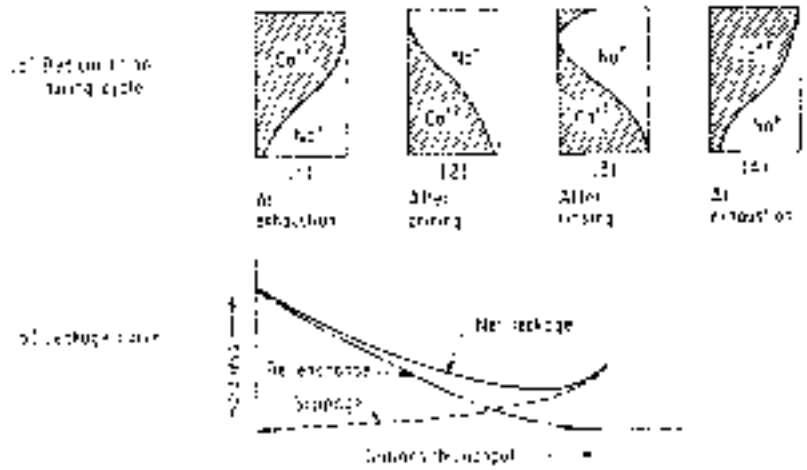


รูปที่ 7.23 กราฟแสดงประสิทธิภาพของเรซินลดลงเมื่อปริมาณโซเดียมไอออนในน้ำดิบเพิ่มขึ้น (จากตัวอย่างความสัมพันธ์ของเรซินของรูปที่ 7.21)

หลังจากที่เรซินใช้งานไปนานๆ จะพบว่าน้ำที่ออกมาเริ่มมีความกระด้างเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แม้ว่าจะเคยได้จากระดับจุดที่น้ำไม่ใช่ไม่ได้ก็ตาม จนต้องหยุดการใช้งานเพื่อทำการสร้างและฟื้นคืนประสิทธิภาพให้กลับมาดังเดิม ดังรูปที่ 7.25 จะเห็นได้ว่าในขณะที่ใช้งานคู่นั้นความกระด้างในน้ำจะไม่ลดลงเป็นศูนย์เด็ดขาด และมีความกระด้างส่วนหนึ่งปริมาณเล็กน้อยรั่วไหลออกมาได้ การที่มีความกระด้างรั่ว (Leakage) เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากในการล้างเรซินด้วยน้ำเกลือ (NaCl) โซเดียมไอออนจะไปแทนที่ไอออนของความกระด้างที่เป็นของเรซินจับอยู่ แต่เนื่องจากการปล่อยน้ำเกลือไหลผ่านชั้นเรซินนั้น เป็นการไหลจากด้านบนสู่ด้านล่าง ซึ่งเป็นการไหลในทิศทางเดียวกันกับน้ำที่ออกใช้งาน (Co-Current Flow) ดังนั้น เรซินที่อยู่ส่วนล่างสุดจะมีโอกาสที่โซเดียมจะเข้าแทนที่ไม่หมด เรซินส่วนนี้ก็ยังจับอยู่ซึ่งไอออนของความกระด้างไว้ เมื่อมีการใช้งานเรซินต่อมาเรื่อยๆ ในรูปของโซเดียมก็จะจับไอออนของความกระด้างไปแลกเปลี่ยนเรื่อยๆ ซึ่งเมื่อผ่านสู่ด้านล่างก็ไปสัมผัสกับเม็ดเรซินที่จับแคลเซียมอิออนไว้ก็จะจับเอาโซเดียมไอออนไปแลกน้ำอ่อนที่จะนำไปใช้งาน จึงทำให้ในน้ำอ่อนมีความกระด้างหลงเหลืออยู่เสมอ



รูปที่ 7.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความกระด้างของน้ำที่ผ่านเครื่องทำน้ำอ่อนใน 1 วัฏจักร

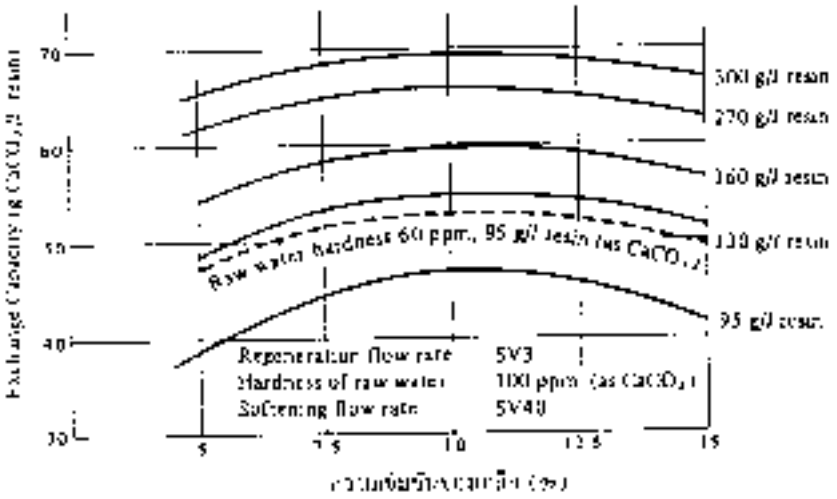


รูปที่ 7.24 ลักษณะของชั้นเรซินเมื่อมีการใช้งานจนการแพร่ถึงชั้นฟูประสิทธิภาพเริ่มเกิด (กรณีจับความกระด้าง)

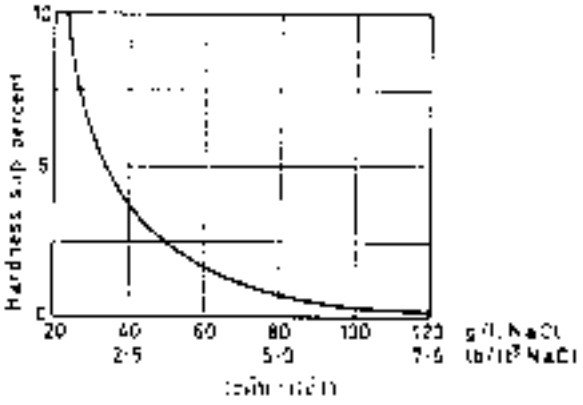
การล้างเรซินด้วยน้ำเกลือจะทำให้เรซินกลับสู่สภาพเดิมตามสมการ

$$Z\begin{bmatrix} Ca^{++} \\ Mg^{++} \end{bmatrix} + 2NaCl\ (\text{เข้มข้น}) \longrightarrow ZNa_2 + \begin{bmatrix} Ca^{++} \\ Mg^{++} \end{bmatrix} Cl_2$$

โดยปกติแล้วเรซินจะถูกล้างเพื่อขับแคลเซียมและแมกนีเซียมออกไปได้ 70 - 80% ดังนั้น ในการล้างชั้นฟูประสิทธิภาพซึ่งเป็นการฟื้นฟูปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ใช้น้ำเกลือที่มีความเข้มข้นและมีเกลือในปริมาณมากเกินกว่าจะทำให้ความเข้มข้นของไอเสียออกมามากกว่าร้อยละของความกระด้างที่ดูดจับไว้ ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนกลับกันได้ ความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ใช้ล้างเรซินที่ดีที่สุดคือ เข้มข้น 10% แต่ประสิทธิภาพในการล้างจะล้างให้เรซินมีกำลังความจุ (Exchange Capacity) มากน้อยแค่ไหนนั้น ขึ้นกับปริมาณเกลือที่ใช้ล้างเรซิน 1 ลิตร (หน่วยเป็นกรัมต่อลิตร) ของน้ำเกลือที่ใช้ ไม่ว่าจะใช้น้ำเกลือในปริมาณเกลือต่อลิตรของเรซินในการล้างเท่าใดก็ตาม ดังแสดงในรูปน้ำเกลือให้เข้มข้น 10% คือที่สุด



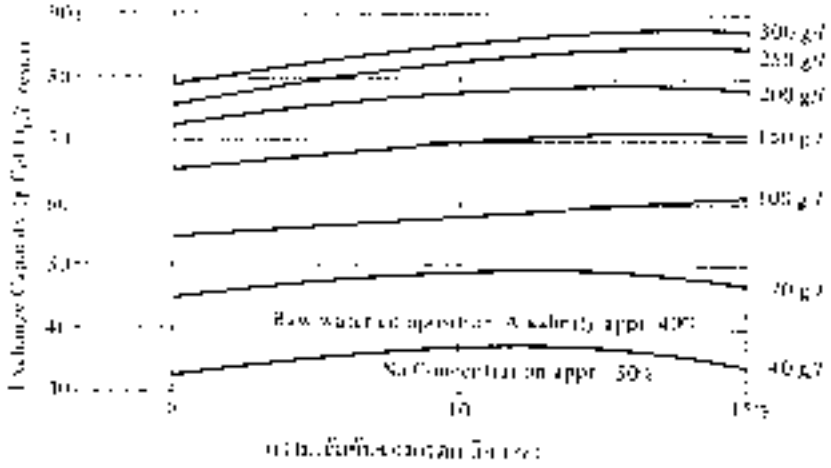
รูปที่ 7.25 ความเข้มข้นของน้ำเกลือและปริมาณเกลือที่ใช้มีผลต่อประสิทธิภาพในการล้างเรซิน



รูปที่ 7.26 ลักษณะการรั่วของความกระด้างผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ในรูปที่ 7.26 จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มต้นการใช้งานของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนใหม่ ๆ ที่ยังไม่เคยผ่านการใช้งานมาก่อน ความกระด้างที่ออกมาจากเครื่องจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น ในการใช้งานจริงเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจึงต้องมีการเผื่อปริมาณเรซินไว้ส่วนหนึ่ง ประสิทธิภาพที่ดีของการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ

ในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม ได้มีการนำเอาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้ในการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized Water) ซึ่งนิยมใช้ควบคู่กับเครื่องกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Degasser) เพื่อการผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุที่มีคุณภาพสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่า Cold Lime Soda หรือ Hot Lime Soda Process



รูปที่ 7.27 ประสิทธิภาพในการล้างเรซินด้วยสารผสมที่มีความเข้มข้นและปริมาณต่าง ๆ

เครื่องกำจัดน้ำอ่อนที่ใช้เรซินมีข้อดีดังนี้คือ

1. สามารถผลิตน้ำที่มีความกระด้างต่ำกว่า 1 ppm ได้ (ในรูป $CaCO_3$)
2. การใช้งานมีความยืดหยุ่นสูง สามารถผลิตน้ำอ่อนได้ตามต้องการ
3. การล้างเรซินทำได้ง่ายและสะดวก ไม่ต้องใช้เครื่องมือและแรงงานมาก
4. ไม่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของท่อน้ำ

5. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของตัวกรองน้ำในช่วงแรกจะมีการกระแทกกระเทือนต่อคุณภาพน้ำที่ได้มากกว่าปกติ

6. ไม่ว่าจะเป็นเครื่องทำน้ำอ่อนที่มีขนาดเล็กหรือใหญ่เพียงใด สามารถใช้งานได้ประสิทธิภาพสูงได้ จึงทำให้สะดวกในการใช้งานในครัวเรือนทุกขนาด

ข้อจำกัดของเครื่องทำน้ำอ่อนมีดังนี้

1. เครื่องทำน้ำอ่อนจะขจัดไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมเท่านั้น ถ้าต้องการใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวนี้ในการดื่มกิน ต้องปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ได้จากเครื่องทำน้ำอ่อนนี้ด้วย ก่อนใช้ดื่มกิน เพราะน้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วจะมีความเป็นกรดสูง ทำให้เกิดการกัดกร่อนท่อน้ำและสารละลายน้ำทั้งหมดสูง

2. น้ำดิบที่จะเข้าเครื่องทำน้ำอ่อนต้องมีความขุ่นต่ำกว่า 1 เอ็นทียู มิฉะนั้นจะทำให้เครื่องทำน้ำอ่อนกลายเป็นเครื่องกรองน้ำได้ เนื่องจากน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดินประเภทแม่น้ำและคลองต่างๆ นั้น ค่าความขุ่นสูงกว่า 1 เอ็นทียู ใช้เป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองน้ำไว้ข้างหน้าด้วย

3. ปริมาณเหล็กในน้ำดิบไม่ควรมีมากกว่า 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร เพราะจะทำให้เรซินดูดซับเหล็กเข้าไปอยู่ในเนื้อกรองเมื่อผ่านเรซิน ถ้าพบว่ามีเหล็กเกินกว่านี้ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วยกำจัดออกก่อนจะเข้าเครื่องทำน้ำอ่อน

4. น้ำดิบที่จะนำมาผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนต้องมีสารแขวนลอยต่ำ เพราะจะทำให้เรซินเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เพราะจะทำให้ท่อลำเลียงเรซินอุดตัน ถ้ามีการใช้สารส้มช่วยตกตะกอนน้ำก่อนจะต้องมีการควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมด้วย เพื่อให้เครื่องทำน้ำอ่อนมีประสิทธิภาพการใช้งานสูง

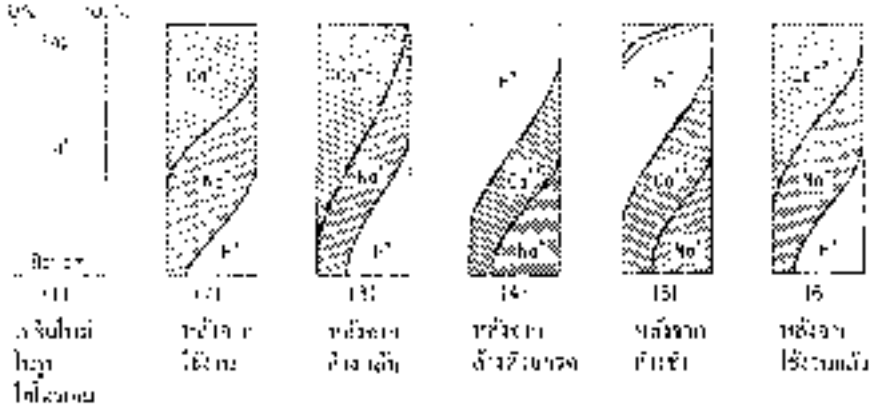
5. ถ้าในน้ำมีสารพิษหนักเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง เช่น คลอรีน ซึ่งจะไปทำลายเรซินได้ ถ้าหากในน้ำมีคลอรีนอยู่ ต้องใช้สารที่มีคุณสมบัติในการรีดิวส์ เช่น โซเดียมซัลไฟต์เพื่อไปทำลายคลอรีน

7.6 การขจัดซิลิกอนประจุบวกและความเป็นด่าง

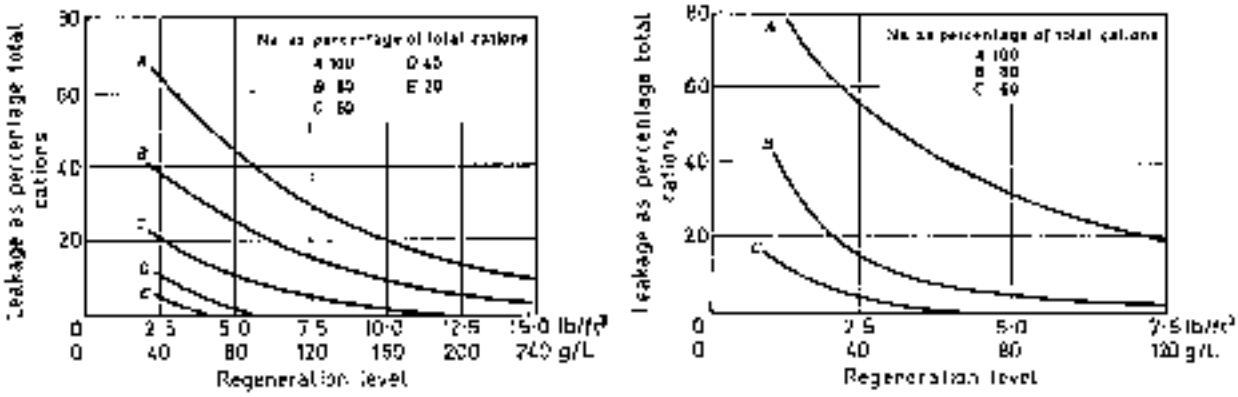
น้ำใช้ธรรมชาติ SC ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และ Na$^+$ ก็ต่อเมื่อเรซินแลกเปลี่ยนไอออนตัวนี้ จะเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งสามารถขจัดออกได้ โดยการเป่าลมผ่านน้ำ ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่าน้ำดิบ ในการนี้ก็เช่นเดียวกัน จะมีไฮโดรเจนไอออนตัวนี้ออกมาได้ น้ำที่ผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะมีไอออนประจุบวกเป็นไอออนบวก

ในรูปที่ 7.28 ถ้าให้น้ำกระด้างผ่านเรซินในรูปของเกลือโซเดียมคลอไรด์ (Ca-Cl$_2$) จะมีโซเดียมไอออนตัวนี้ออกมา อัตราการวัดนี้จะขึ้นกับขนาดของน้ำด้วย

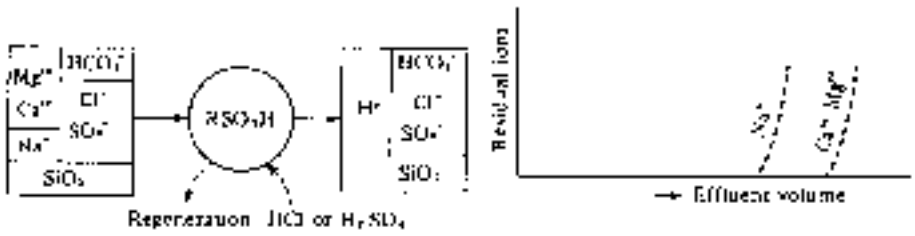
7.6 ปริมาณโซเดียมในน้ำดิบ ในรูปที่ 7.29 แสดงให้เห็นว่า ถ้าน้ำดิบมีความเข้มข้นของโซเดียมไอออนสูงขึ้น อัตราการวัดของโซเดียมไอออนจะสูงขึ้น



รูปที่ 7.38 ลักษณะชั้นเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแต่ละชั้นในหอแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ใช้งานได้ดี



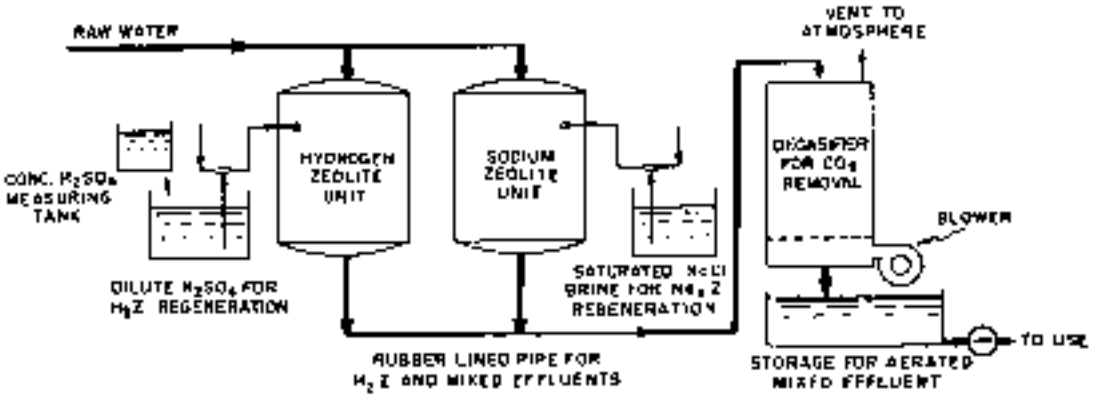
รูปที่ 7.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนโซเดียมที่รั่วออกมากับปริมาณสารที่ใช้ในการสร้างน้ำยาใหม่



รูปที่ 7.40 การจับยึดไอออนของเรซินชนิด SC ในรูปไฮโดรเจน

7.6.1 ระบบ Sodium Zeolite /Hydrogen Zeolite Split – Stream Softening

ระบบนี้ใช้เรซินชนิด SC แต่อยู่ในรูปไฮโดรเจนกับหนึ่ง และในรูปโซเดียมกับหนึ่ง ซึ่งจะต่อกันแบบอนุกรม ทั้งนี้เพื่อลดและน้ำกรด น้ำที่ได้จากอุปกรณ์นี้จะสามารถนำมาผสมกับเพื่อให้ได้ความเป็นด่างของน้ำที่ได้ตามต้องการ ดังรูปที่ 7.41 อุปกรณ์ชุดนี้จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้ดังนี้ ประกอบด้วยดังนี้



รูปที่ 7.31 ระบบเรซินในรูปไฮโดรเจนและโซเดียมกับการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ให้ Z = เรซิน

$$\begin{bmatrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SO_4 \\ 2Cl \\ 2HCO_3 \\ 2NO_3 \end{bmatrix} + 2HZ \rightarrow 2Z + \begin{bmatrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_2SO_4 \\ 2HCl \\ 2H_2CO_3 \\ 2HNO_3 \end{bmatrix}$$

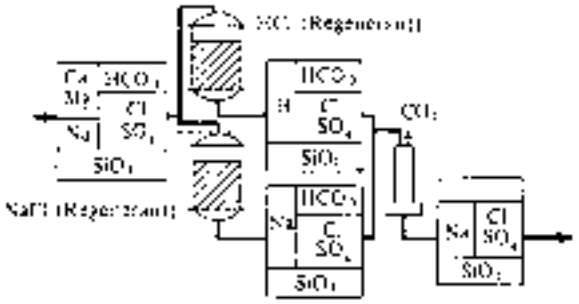
จะเห็นได้ว่า การที่เรซินจับไอออนประจุบวกจะก่อให้เกิดกรดขึ้นหลายชนิด กรด HCl, H_2SO_4, HNO_3 รวมทั้ง FMA มีหน่วยเป็น พีพีเอ็ม ในรูป $CaCO_3$ น้ำที่ได้จะปราศจากแคลเซียมและแมกนีเซียม และมีโซเดียมอยู่ด้วย แต่ละมิโลอีควิวาเลนท์ของแข็งจะเพิ่มขึ้นไปด้วย ถ้าน้ำดิบมีโซเดียมมากขึ้น จะยิ่งทำให้ค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นและโซเดียมนี้ก็จะมีปัญหาเมื่อใช้ในหม้อไอน้ำต่อไป

น้ำที่ผ่านมาผ่านชุดนี้แล้วก็ยังมีน้ำอ่อนที่จะขจัดความกระด้างแคลเซียมและแมกนีเซียมได้ แต่น้ำที่ปราศจากความกระด้างแล้วนี้มีความเป็นด่างในรูปโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) อยู่ ซึ่งความเป็นด่างนี้จะไปทำปฏิกิริยากับกรดที่เกิดในชุดแรก ดังสมการ

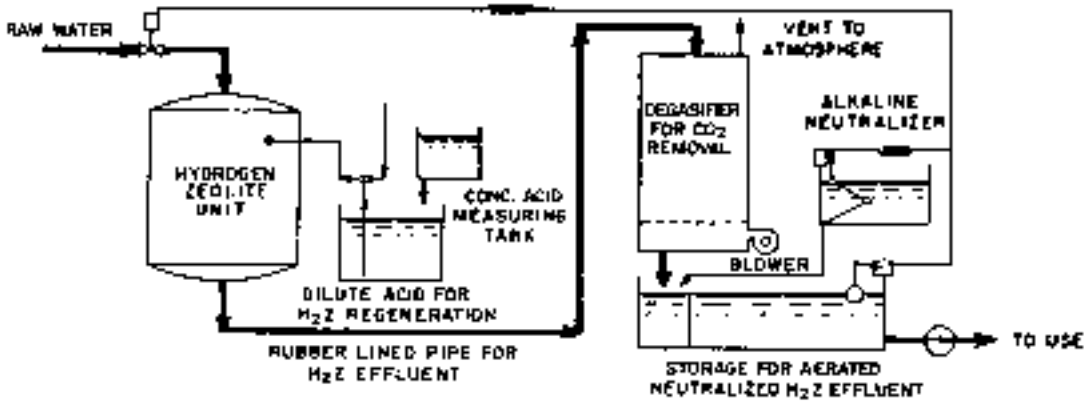
$$2NaHCO_3 + \begin{bmatrix} 2HCl \\ H_2SO_4 \\ 2HNO_3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2NaCl \\ Na_2SO_4 \\ 2NaNO_3 \end{bmatrix} + H_2CO_3$$

ดังนั้น เมื่อน้ำผ่านทั้งสองชุดมาร่วมกัน ในน้ำนั้นจะมีกรดคาร์บอนิกอยู่มาก และกรดนี้สามารถขับไล่ได้ง่าย จำเป็นต้องใช้โดยผ่านหอไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Decarbonator) ซึ่งเรซินจะมีหน้าที่สลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยการใช้ระบบนี้สามารถลดความเป็นด่างของน้ำที่ได้ลงมาได้ โดยการปรับอัตราไหลของน้ำที่ผ่านเข้าแต่ละชุดให้พอเหมาะ ถ้าผ่านชุดเรซินน้ำอ่อนมากน้ำจะมีความเป็นด่างที่สูงขึ้น

ตามรูปที่ 7.31 เป็นการใช้เรซินชนิด SC ในรูปไฮโดรเจนเพื่อขับไอออนประจุบวก และมีหอไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำที่ออกมาต้องเติมด่างเพื่อสะเทินกรด FMA ที่เกิดขึ้นให้เป็นกลาง

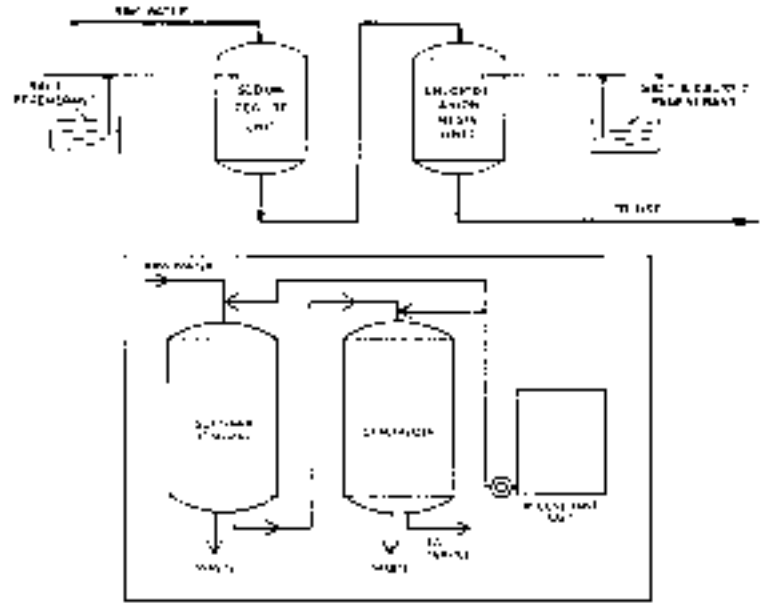


รูปที่ 7.13 ระบบกำจัดความกระด้างและความเป็นด่างของน้ำ



รูปที่ 7.14 ระบบกำจัดความกระด้างและความเป็นด่างโดยใช้ร่วมกับเรซิน SC

7.6.2 เรซิน Sodium Zeolite/Chloride Anion Dealkalization



รูปที่ 7.15 ระบบกำจัดความกระด้างและความเป็นด่างโดยใช้ร่วมกับเรซิน SC ในรูปไฮเดียมร่วมกับเรซิน SB

เมื่อระบบที่ใช้เรซินทำหน้าที่ดูดซับไอออนบวกแล้ว SB แต่ยังมีน้ำเหลือค้างเรซินผสมอยู่ จึงต้องใช้ชุดที่ใช้ถัง SB นี้เรียกว่า Decationizer ถังนี้ก็ต้องมีเรซินทำหน้าที่ดูดซับเช่นกัน แต่ชนิดของเรซินจะต่างกับชุดแรกโดยสิ้นเชิง ดังต่อไปนี้

ให้ Z = เรซิน

$$\begin{bmatrix} Na_2SO_4 \\ 2NaHCO_3 \\ 2NaNO_3 \end{bmatrix} + 2ZCl \longrightarrow 2NaCl + 2Z + \begin{bmatrix} SO_4^{--} \\ 2HCO_3^{-} \\ 2NO_3^{-} \end{bmatrix}$$

ในชุดนี้ของความรู้ในข้อนี้ ในขณะที่ผ่านเรซินนั้นจะมีไอออนที่เป็นบวกถูกดูดซับ มีอยู่ในน้ำที่ผ่านออกมาเรียกว่าน้ำอ่อนบวก จะถูกกำหนดให้ด้วยอักษรตัวที่สอง ถังที่ใช้เรซิน SB ที่อยู่ในกลุ่มโรงไฟฟ้านี้ จะทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดอ่อนๆ ดังนั้นจึงต้องนำน้ำที่ผ่านถังนี้ไปผ่านเรซินตัวที่สองต่อไป

$$2Z \begin{bmatrix} SO_4^{--} \\ 2HCO_3^{-} \\ 2NO_3^{-} \end{bmatrix} + 2NaCl \longrightarrow 2Z + \begin{bmatrix} Na_2SO_4 \\ 2NaHCO_3 \\ 2NaNO_3 \end{bmatrix}$$

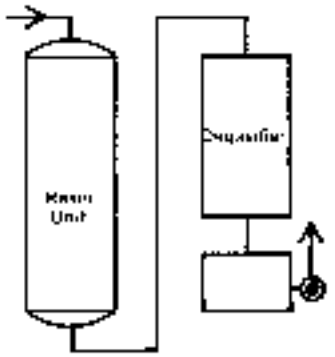
น้ำที่ผ่านถังเรซินไฟฟ้าผสมนี้ น้ำจะมีค่าเป็นด่างเล็กน้อย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ดังรายละเอียดในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.1 คุณภาพน้ำที่ผ่าน Decationizer ซึ่งล้างด้วยน้ำเกลือและผงผสมน้ำด่างโซดา

Identification of Analysis Tabulated Below :							
A Typical Soft Water				D Your Softened Water			
B Decationized Water							
Salt Regeneration				C			
Decationized Water, Salt							
Caustic Regeneration				E			
Constituent	PPM as	A	B	C	D	E	F
Calcium	$CaCO_3$	Nil	Nil	Nil			
Magnesium	$CaCO_3$	Nil	Nil	Nil			
Sodium	$CaCO_3$	200	200	200			
Total Electrolyte	$CaCO_3$	200	200	200			
Bicarbonate	$CaCO_3$	100	80	80			
Carbonate	$CaCO_3$	0	0	0			
Hydroxyl	$CaCO_3$	0	0	0			
Sulfate	$CaSO_4$	85	90	90			
Chloride	$CaCl_2$	15	120	120			
Nitrate	$Ca(NO_3)_2$	0	0	0			
M.Alk	$CaCO_3$	100	80	80			
P.Alk	$CaCO_3$	0	0	0			
Carbon Dioxide	CO_2	0	0	0			
pH		8	6.0	8.0			
Silica	SiO_2	10	10	10			
Iron	Fe						
Turbidity							
TDS							
Color							

7.6.3 ระบบ Weak Acid Cation

ในบางระบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ต้องใช้เรซินถึง 3 ชนิด และอุปกรณ์ 3 ชุด แต่ถ้าใช้เรซินชนิด WC จะใช้เพียงทอดเดียว เรซินชนิดนี้จะเป็นสารประกอบ Carboxyl ซึ่งอยู่ในรูปของไฮโดรเจนสามารถจับอิออนประจุบวกส่วนใหญ่ที่ต้องการ



รูปที่ 7.15 ระบบขจัดความเป็นด่างโดยใช้เรซิน WC และหอไล่ก๊าซ

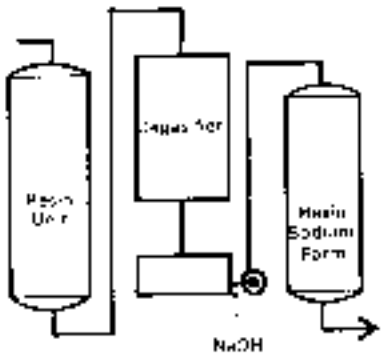
Z = เรซิน

$$\begin{bmatrix} Ca \\ Mg \\ Na \end{bmatrix} \quad 2HCO_3 + 2HZ \longrightarrow 2Z \begin{bmatrix} Ca \\ Mg \\ Na \end{bmatrix} + H_2CO_3$$

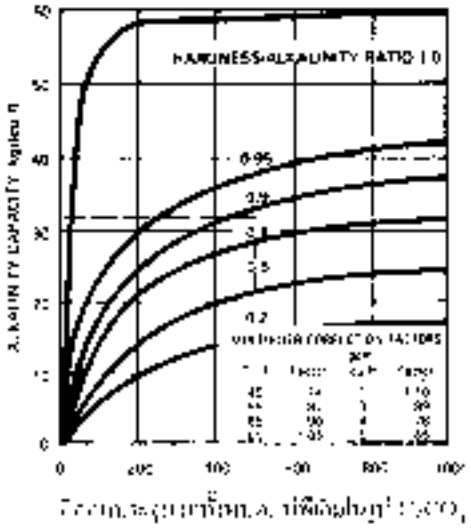
จากสมการนี้จะเห็นว่าเกิดกรดคาร์บอนิกขึ้น ดังนั้น ถึงแม้ว่าจะมีไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้น เมื่อการแลกเปลี่ยนชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับประจุบวกของด่างที่เป็นส่วนประกอบของความเป็นด่าง ดังนั้น จึงเป็นการลดความเป็นด่างไปด้วย คุณภาพของน้ำที่ได้จะขึ้นกับคุณภาพน้ำดิบและค่าความของความกระด้างและความเป็นด่างของน้ำดิบ ถ้าในน้ำดิบมีความกระด้างมากกว่าความเป็นด่างแล้ว น้ำที่ได้จะมีความกระด้างด้วย เช่น น้ำดิบมีความกระด้าง 150 พีพีเอ็ม ความเป็นด่าง 100 พีพีเอ็ม จะได้น้ำที่มีความกระด้าง 50 พีพีเอ็ม ดังนั้น ถ้าต้องการน้ำที่ปราศจากความกระด้างก็ต้องผ่านเครื่องทำน้ำอ่อนอีกครั้ง ถ้าค่าความกระด้างต่ำกว่าความเป็นด่างเท่านั้น เช่น ถ้าความเป็นด่างเท่ากับ 100 แล้ว การใช้งานจะอยู่ในจุดที่ดีที่สุด (Optimum) และจากนี้ เพราะเรซินเป็นชนิด WC ดังนั้น ในช่วงที่ใช้งานต่ำกว่าแรก (ราว 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของระยะการใช้งานเต็มที่) จะพบว่ามีความ FMA ในน้ำด้วย ที่มีลักษณะไม่มากนักเพราะมีสภาพประจุบวกที่ดักจับเฉพาะไฮโดรเจนไอออนเท่านั้น และไบคาร์บอเนตอยู่ด้วย ซึ่งจะรวมกันเป็นน้ำ ทำให้เกิดความกระด้างได้ ดังนั้น วิธีแก้ FMA ก็โดยการใช้ด่างเข้าไปทำให้เกิดเป็นเกลือ

การล้างเรซินชนิดนี้ใช้ได้ทั้งกรดกำมะถันและกรดเกลือ ปริมาณการฟื้นฟูความกระด้างหรือความเป็นด่างของน้ำที่ได้

$$2Z \begin{bmatrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{bmatrix} + H_2SO_4 \longrightarrow 2HZ + \begin{bmatrix} CaSO_4 \\ MgSO_4 \\ Na_2SO_4 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 7.36 ระบบขจัดความเป็นด่างโดยใช้เรซิน WC ชนิดไฮโดรเจน และเครื่องทำน้ำอ่อน



รูปที่ 7.37 ประสิทธิภาพของเรซินชนิด WC เมื่อมีอัตราส่วนความกระด้างและความเป็นด่างต่าง ๆ

เนื่องจากประสิทธิภาพของเรซินชนิดนี้สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น และด้วยเหตุผลมากกว่าความประหยัดเพียงเล็กน้อย การใช้เรซินชนิด WC จะมีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่าชนิด SC เพราะเรซินชนิด SC นั้น จะมีประสิทธิภาพการทำงานเพียง 30 - 50 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ดังนั้น และด้วยเหตุผลที่ดีกว่าเล็กน้อย ของค่าความกระด้างถาวร นำไปพิจารณาและตัดสินใจในการเลือกประสิทธิภาพของเรซินชนิด WC ให้เหมาะสมกับระดับที่แข่งขันได้ไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหลีกเลี่ยงการลดประสิทธิภาพของเรซินชนิดนี้ ถ้าต้องการจัดความกระด้างและความเป็นด่างโดยไม่ใช้เครื่องทำน้ำอ่อนก็ให้ใช้เรซินชนิด SC ในการทำงานแบบเดียวกันที่ใช้เรซิน WC เนื่องจากเรซิน SC มีความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่าเรซิน WC ซึ่งอยู่ด้านบน หลังจากการล้างกลับ ในการที่จะได้ประสิทธิภาพที่ใช้ได้และใกล้เคียงกับ 100 เปอร์เซ็นต์นั้น

การเปรียบเทียบระหว่างระบบต่าง ๆ

ระบบที่ 1 Sodium zeolite/Hydrogen zeolite จะได้น้ำที่มีความกระด้างต่ำ ความเป็นกรดด่างของน้ำ (DS) ในน้ำใช้ในเรือกลที่สึกหรอน้อยลง ความกระด้างของน้ำ ระบบนี้ง่าย สะดวกในการใช้งาน ราคาถูก ต้องการน้ำเค็มจำนวนมาก และน้ำที่ได้จากระบบนี้ยังมีความเป็นกรดด่างสูงอยู่

ระบบที่ 2 Sodium zeolite/Chloride Anion จะได้น้ำที่มีความกระด้างต่ำ ความเป็นกรดด่างของน้ำ ระบบนี้มีข้อได้เปรียบคือ ไม่ต้องใช้กรดกำมะถัน ใช้น้ำ ข้อเสียของระบบนี้คือ ต้องใช้ระบบแลกเปลี่ยนแคตไอออน ระบบนี้นิยมใช้ปรับสภาพน้ำสำหรับหม้อไอน้ำแรงดันสูง

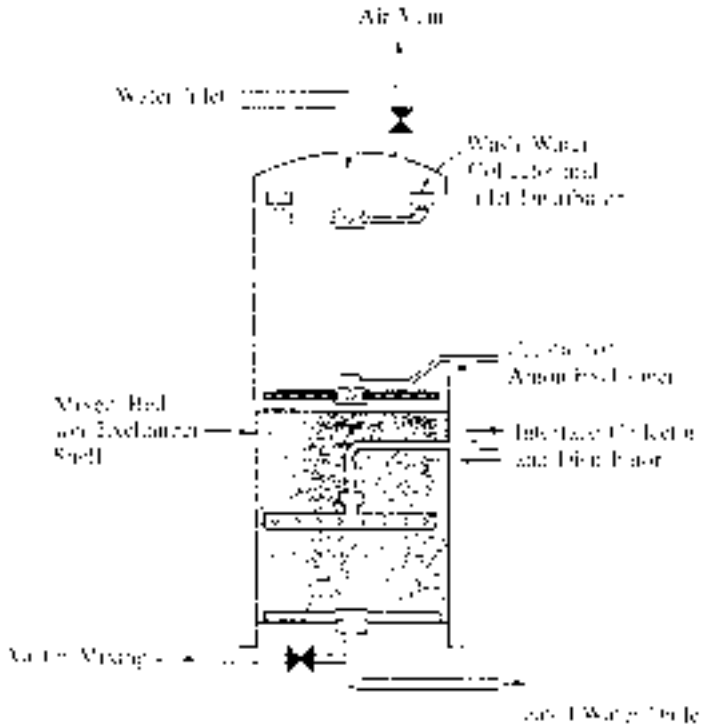
ระบบที่ 3 Weak Acid Cation จะได้น้ำที่มีคุณภาพดีกว่าระบบที่ 1 ความกระด้างของน้ำ ความเป็นกรดด่างของน้ำ ระบบนี้ไม่ต้องการกรดกำมะถัน ความกระด้างของน้ำ ระบบนี้ยังมีข้อเสียอีกหลายประการ

7.6.5 ข้อจำกัดของแต่ละระบบ

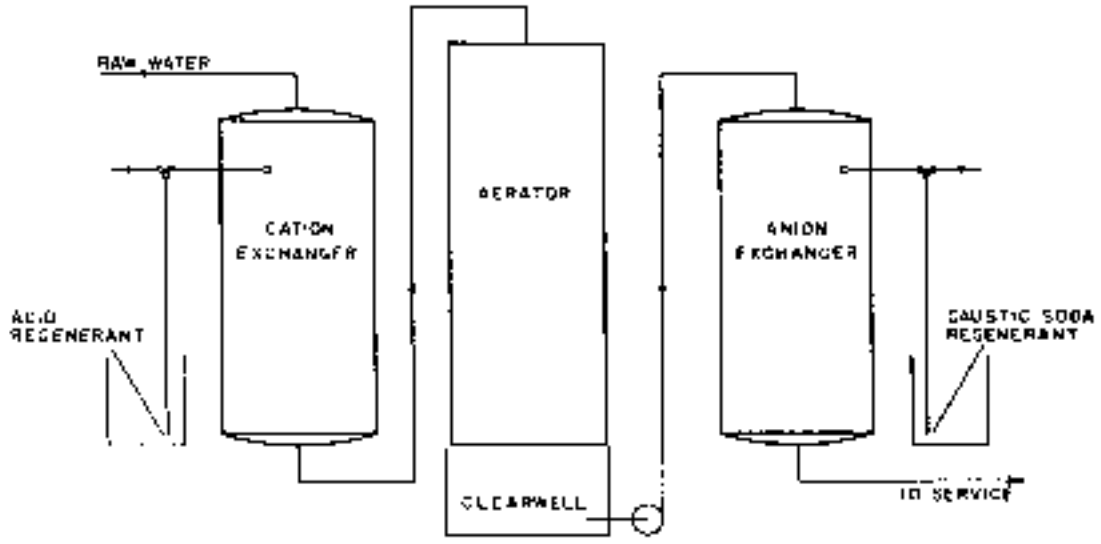
ระบบแลกเปลี่ยนไอออน ทุกระบบมีข้อจำกัดเหมือนกันหมด ดังนี้ คือ ไม่สามารถใช้กับน้ำที่มีสารแขวนลอย สารอินทรีย์ปนอยู่ด้วย ซึ่งจะไปอุดตันเม็ดเรซิน ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการกรองน้ำก่อนเข้าระบบแลกเปลี่ยนไอออนเสมอ

7.7 การผลิตน้ำบริสุทธิ์ (Deionization or Demineralization)

ระบบนี้จะใช้เรซินที่เป็นกรดและด่างแลกเปลี่ยนไอออนในน้ำให้หมด โดยการใช้เรซินประจุบวกและเรซินประจุลบ อุปกรณ์ที่ใช้อาจใช้เป็นชนิดที่เรซินทั้งสองชนิดอยู่ในเครื่องเดียวกัน (Mixed Bed) หรือแยกกันอยู่คนละเครื่องก็ได้



รูปที่ 7.36 อุปกรณ์ Mixed bed Demineralizer



รูปที่ 7.37 การผลิตน้ำปราศจากไอออนโดยใช้เครื่องกำเนิดอากาศและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนไอออนแบบต่างๆ

ตารางที่ ๖.๒ คุณภาพน้ำที่ผ่านเครื่องผลิตน้ำบริสุทธิ์ระบบต่าง ๆ

คุณภาพน้ำป้อน :

ความกระด้างรวม	๒๐๐ ppm	ความเป็นด่าง	๒๐๐ ppm
ซิลิกา	๑๐ ppm	ค่าพีเอช	๗.๐
ความนำไฟฟ้า	๔๐๐ ไมโครโมห์/ซม.	อื่น ๆ	๑๐ ppm

คุณภาพน้ำ	ความนำไฟฟ้า ไมโครโมห์	ซิลิกา ppm
Hydrogen Cation + Weak Base Anion	๓๐ - ๖๐	๒๐
Hydrogen Cation + Weak Base Anion + Degasifier	๕ - ๑๐	๑๐
Hydrogen Cation + Strong Base Anion	๑ - ๕	๑ - ๕
Mixed - Bed	๐.๑ - ๐.๕	๐.๑
น้ำกลั่น	๑.๐	๐.๑

ปฏิกิริยาของสารแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่ใช้ในการกำจัดประจุบวกที่ไม่ต้องการ ดังนี้

ให้ Z = เรซิน

$$\begin{Bmatrix} Ca^{++} \\ Mg^{++} \\ Na^{+} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} SO_4^{--} \\ 2Cl^{-} \\ 2HCO_3^{-} \\ 2NO_3^{-} \end{Bmatrix} + 2HZ \quad \rightarrow \quad 2Z \begin{Bmatrix} Ca^{++} \\ Mg^{++} \\ 2Na^{+} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} H_2SO_4 \\ 2HCl \\ 2H_2CO_3 \\ 2HNO_3 \end{Bmatrix}$$

ปฏิกิริยาของสารแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบที่ใช้ในการกำจัดประจุลบที่ไม่ต้องการ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} H_2SO_4 \\ 2HCl \\ 2HNO_3 \end{Bmatrix} + 2ZOH \quad \rightarrow \quad 2Z \begin{Bmatrix} SO_4^{--} \\ 2Cl^{-} \\ 2NO_3^{-} \end{Bmatrix} + 2H_2O$$

ในการกำจัดประจุลบที่ได้นั้นเป็นชนิดอ่อน (WBA) จะสามารถแลกเปลี่ยนได้เฉพาะประจุลบที่มาจากกรดแก่ เช่น กรดกำมะถัน กรดเกลือ และกรดไนตริก เท่านั้น ไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุลบที่มาจากกรดอ่อนได้ เช่น

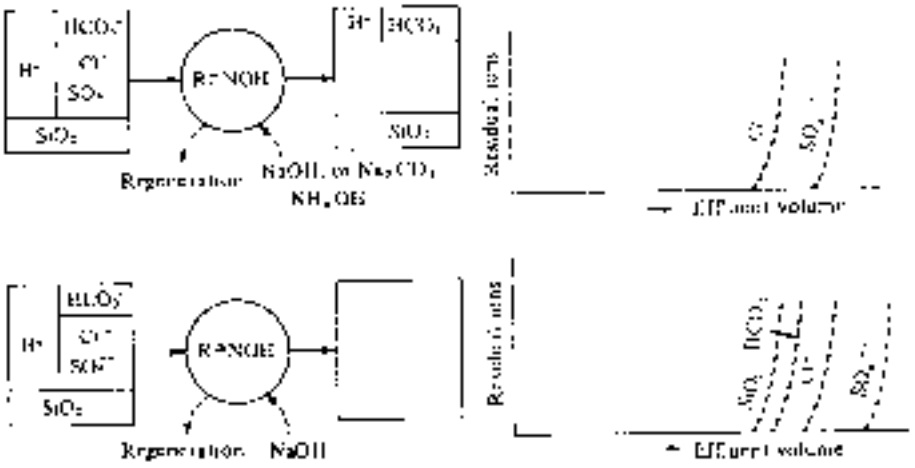
$$\begin{Bmatrix} H_2CO_3 \\ HNO_3 \end{Bmatrix} + ZOH \quad \rightarrow \quad Z \begin{Bmatrix} HCO_3^{-} \\ NO_3^{-} \end{Bmatrix} + H_2O$$

ดังนั้นประจุลบที่ถูกกำจัดได้ด้วยเรซินชนิดนี้ตามลำดับดังนี้

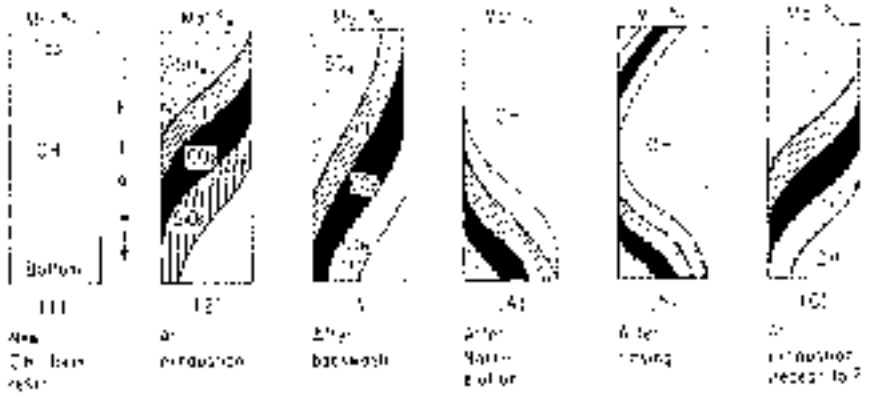
$$SO_4^{--} > Cl^{-} > HCO_3^{-} > SiO_3^{-}$$

(ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ)

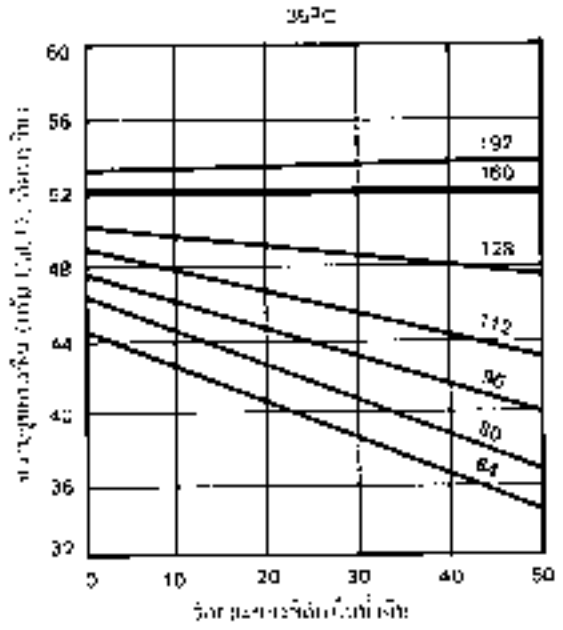
ในการแลกเปลี่ยนประจุลบและประจุลบนั้นจะมีปัญหาอยู่ว่า ประจุลบที่ไม่ต้องการนั้นจะถูกกำจัดออกได้หมดหรือไม่ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำป้อน ชนิดของเรซินที่ใช้ และการออกแบบเครื่องผลิตน้ำบริสุทธิ์ด้วย ปกติแล้วเรซินชนิดอ่อนจะมีความสามารถในการกำจัดประจุลบได้ดีกว่าเรซินชนิดแก่ ดังนั้นในการออกแบบเครื่องผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ต้องการกำจัดประจุลบออกให้หมดจึงมักใช้เรซินชนิดอ่อนเป็นตัวกำจัดประจุลบ



รูปที่ 7.40 ระบบอัดกลับแบบจุดคุม



รูปที่ 7.41 การแยกของไอออนชนิดต่าง ๆ ในคอลัมน์แลกเปลี่ยนประจุบวกโดยมีการล้างด้วยน้ำ



รูปที่ 7.42 ความจุของเรซินประจุลบที่ขึ้นกับปริมาณการใช้ด่างล้างซาง และปริมาณซิลิกาในน้ำดิบ

ในการที่จะหยุดใช้ถังเรซินชนิด SB เอาไว้ตอนที่ระยะเวลาไม่ถึงค่าการนำไฟฟ้า สูงขึ้นจะแสดงให้เห็นค่าซิลิกาเพิ่มขึ้น ก่อนที่ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพราะซิลิกาเป็นไอออนที่จับกับเรซินได้ไม่แน่นหนา หรือหลุดออกได้ง่ายที่สุด และเมื่อเรซินหมดสภาพจึงจะมีไอออนอื่นตามมา ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น [illegible] ในการล้างเรซินประจุลบจะใช้ด่าง [illegible] ประจุลบที่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ดังนั้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ $(NaOH)$ จึงเป็นด่างที่ดีที่สุด

ในขณะที่ความจุของเรซินประจุลบกำลังจะหมดสิ้น ไม่สามารถจับซิลิกาได้อีก จะมีซิลิกาหลุดออกมา ซิลิกานี้จะไม่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งมีความนำไฟฟ้าต่ำกว่าไอออนอื่น ดังนั้นจึงควรใช้ค่าซิลิกาเป็นตัวบ่งชี้ ต้องหยุดการใช้งานทันที ถ้าปล่อยให้ใช้งานต่อไปจนกระทั่งค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นมากแล้ว น้ำที่ได้ก็ไม่เหมาะสม [illegible] จะเข้าไปแทนที่ซิลิกาที่ติดอยู่บนเรซินแล้ว ซึ่งจะมีซิลิกาออกมามากกว่าที่ควร

หลังจากใช้งานจนครบวัฏจักรแล้ว ก็ต้องล้างเรซินเพื่อฟื้นฟูประสิทธิภาพ ถังที่บรรจุเรซินประจุลบที่ใช้การล้าง เรซินประจุลบใช้ด่างโซดาไฟเข้มข้น 4 % อย่างที่เห็นดังนี้

$$2Z\begin{bmatrix} SO_4 \\ 2Cl \\ 2NO_3 \\ 2HCO_3 \\ 2HSiO_3 \end{bmatrix} + 2NaOH \rightarrow 2ZOH + \begin{bmatrix} Na_2SO_4 \\ 2NaCl \\ 2NaNO_3 \\ 2NaHCO_3 \\ 2NaHSiO_3 \end{bmatrix}$$

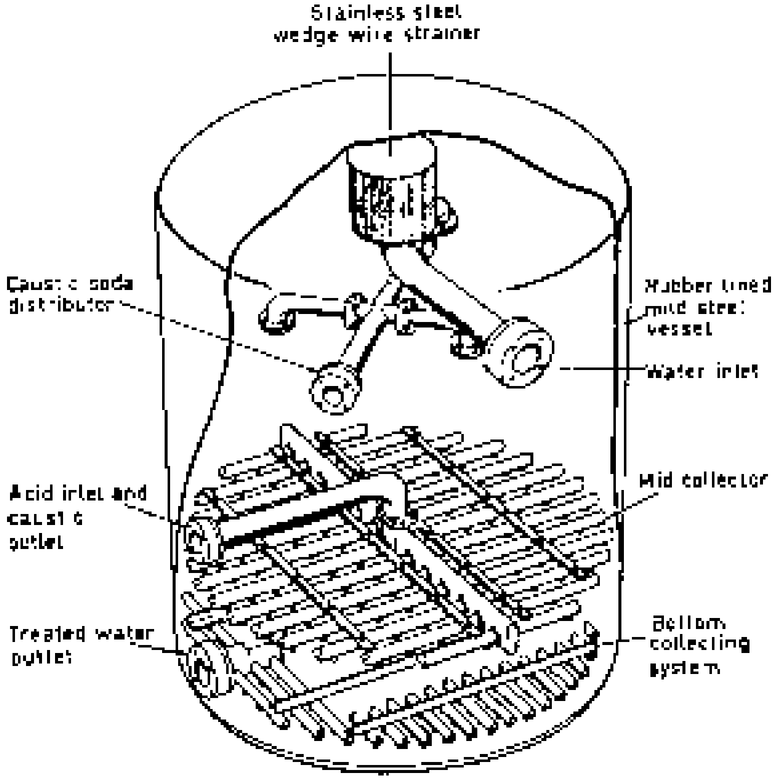
ถ้าเป็นเรซินชนิด SB ต้องใช้ด่างโซดาไฟเท่านั้นเพราะสามารถขจัดซิลิกาได้ แต่ถ้าเป็นเรซินชนิด WB อาจใช้โซดาไฟ น้ำแอมโมเนีย หรือโซดาแอชก็ได้ เพราะไม่ต้องขจัดซิลิกาให้หมด

7.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบขจัดไอออน

ถังที่ใช้บรรจุเรซินแตกต่างกัน อุปกรณ์ที่ใช้จะมีลักษณะคล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 7.11 หรือ 7.10 หรือ 7.12 สำหรับการต่อท่อต่อกันนั้นขึ้นกับระบบและคุณภาพน้ำที่ต้องการ ถังที่บรรจุเรซินประจุบวกและถังบรรจุเรซินประจุลบจะต้องมีการออกแบบพิเศษโดยเฉพาะ เพราะการล้างเรซินด้วยกรดและด่างจะต้องทำในภาชนะเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นแบบแยกหรือรวมกัน วัสดุที่ใช้จะต้องมีความต้านทานการกัดกร่อนของกรดหรือด่างได้

ถังที่ใช้บรรจุเรซินทั้งสองชนิด (Mixed-bed) นั้นมีหลักการทำงาน [illegible] เพื่อใช้ในการขัดกรอง ขนาดของถังขึ้นกับปริมาณเรซินที่ใช้และอัตราการผลิตน้ำที่ต้องการ

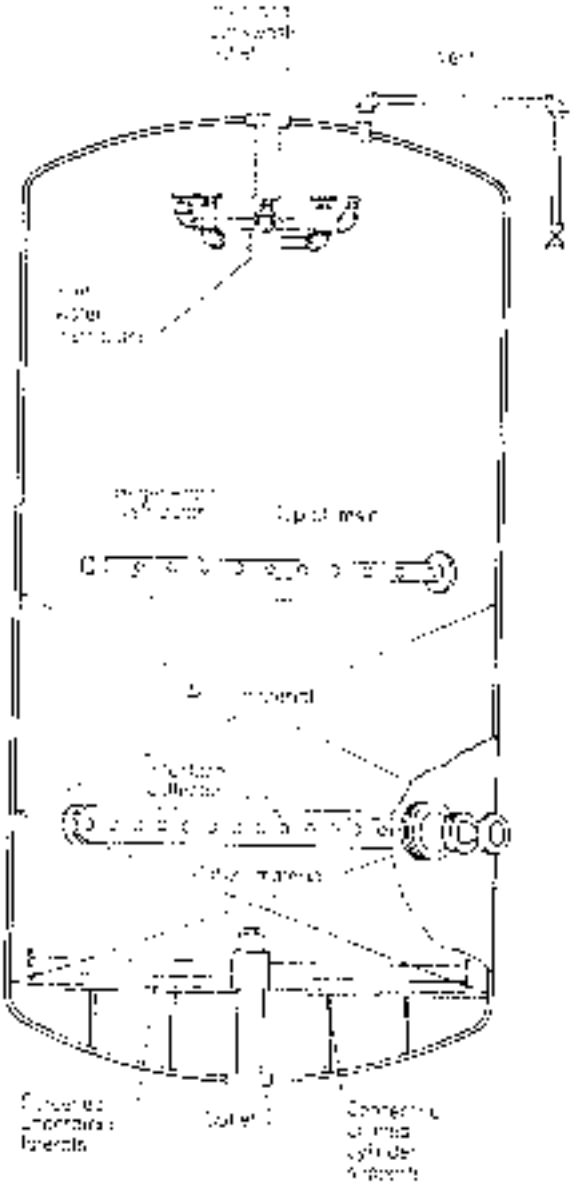
เมื่อใช้งานไปจนครบวัฏจักรแล้ว ต้องทำการล้างย้อนกลับซึ่งจะแยกเรซินออกเป็น 2 ชั้น คือเรซินประจุลบซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่า ชั้นล่างเป็นเรซินประจุบวกซึ่งหนักกว่า การล้างเรซินจะไม่ต้องแยกถัง [illegible] ในตอนแรกให้ล้างเรซินประจุลบด้วยด่าง โดยที่กรดจะไหลเข้าทางด้าน [illegible]



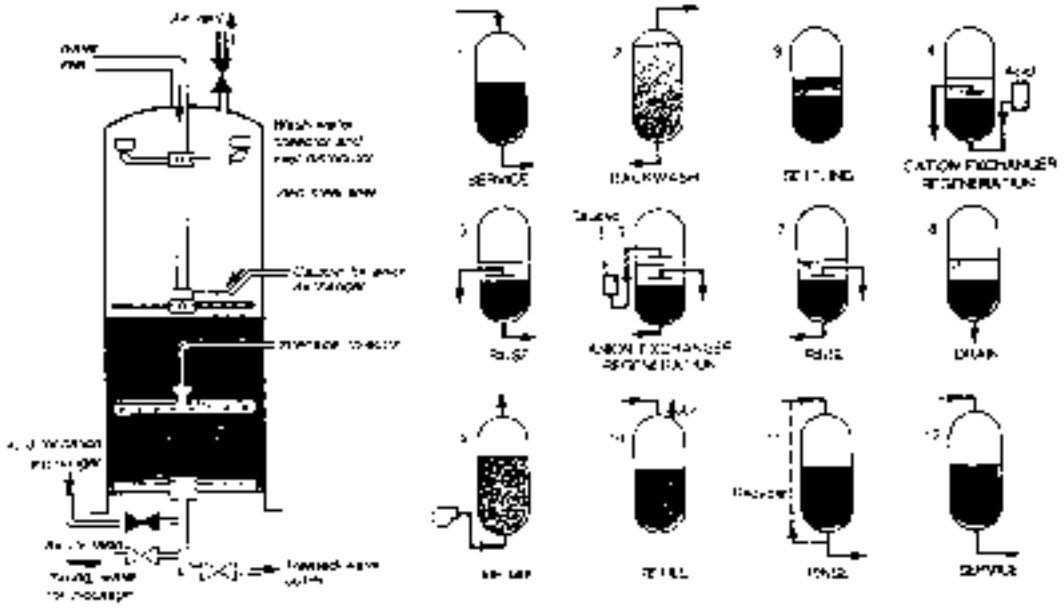
รูปที่ 7.41 โครงสร้างภายในของถัง Mixed-bed

ด่างและกรดจากท่อกลาง ซึ่งอยู่ตรงรอยต่อของชั้นเรซินพอดี ด้วยเหตุนี้จึงมีน้ำไหลเข้ามาจากด้านบนด้วยเพื่อกัน ไม่ให้ด่างที่ไหลลงไปจากส่วนบนเพื่อต้านทานการไหลของกรดไม่ให้ไหลขึ้นมาถูกชั้นเรซินประจุลบได้ หลังจากล้างแล้ว ล้างด้วยน้ำจนสะอาด ต่อจากนั้น ล้างชั้นเรซินประจุบวกด้วยกรดซึ่งปล่อยจากท่อที่อยู่เหนือชั้นเรซินประมาณ 10 (4-6 นิ้ว) และไหลออกทางท่อกลางที่อยู่ระหว่างชั้นเรซิน ส่วนด้านล่างจะมีกระแสน้ำไหลผ่านเข้ามาด้วย เพื่อไม่ให้กรดมาทำปฏิกิริยากับเรซินชนิดลบได้ หลังจากนั้นก็ล้างด้วยน้ำ แล้วผสมเรซินทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน โดยใช้ลมเป่าให้ปั่นป่วนผสมกันอย่างดี หรือใช้อีเจ็กเตอร์ (Ejector) ดูดเรซินสองชนิดมาผสมกัน หลังจากนั้นก็ล้างอีกทีแล้วเตรียมใช้งาน

ถ้าในการล้างใช้กรดซัลฟูริกจะต้องระมัดระวังในการล้างเพิ่มขึ้น เพราะถ้ามีแคลเซียมอยู่ในชั้นเรซินและเมื่อล้างด้วยด่าง แคลเซียมจะทำปฏิกิริยากับโซดาไฟเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ได้ ปัญหาในการใช้ถัง Mixed-bed ก็คือ การแยกชั้นเรซิน และการล้างแต่ละชั้นมักไม่สมบูรณ์ ซึ่งทำให้ยุ่งยากมาก ทั้งนี้จึงมีผู้ผลิตเรซินชนิดพิเศษที่ไม่มีคุณสมบัติในการจับอิออนใด ๆ ทั้งสิ้น แต่มีความหนาแน่นอยู่ระหว่างความหนาแน่นของเรซินประจุบวกและลบ ดังนั้น เมื่อล้างย้อนจึงมีการแยกชั้นของเรซินพิเศษนี้จะแทรกอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นทั้งสองเป็นตัวกั้นชั้น ทำให้ประสิทธิภาพในการล้างดีขึ้นมาก แต่ปัญหาเรื่องน้ำยาล้างไหลผ่านเรซินต่างชนิดกัน และยังคงการรั่วไหลของกรดเนื่องจากเรซินล้างไม่สมบูรณ์ด้วย



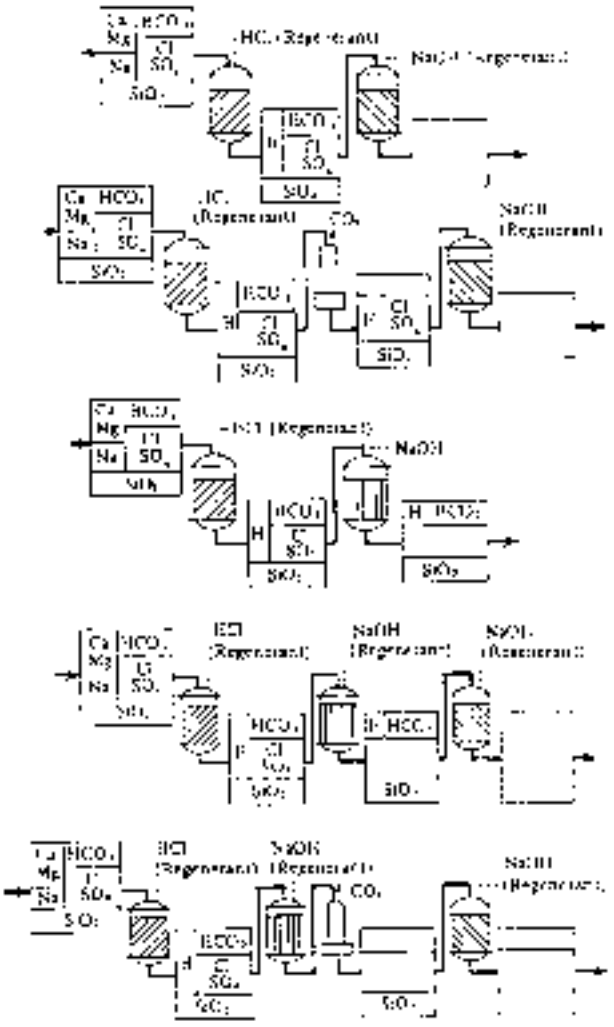
รูปที่ 7.44 ตัวอย่างของ Mixed-bed Evaporator



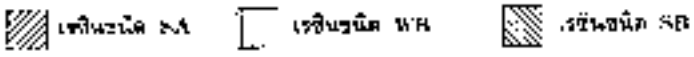
รูปที่ 7.45 ขั้นตอนการล้างเรซินและเครื่องผสมน้ำบริสุทธิ์แบบ Mixed bed

รูปที่ 7.46 แสดงชั้นเรซินที่เสื่อมสภาพระหว่างเรซินประจุบวกและประจุลบ Inert Resin

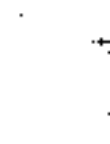
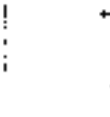
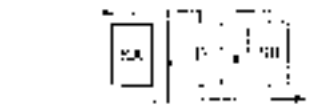
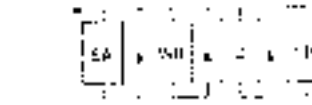
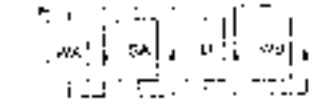
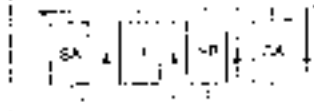
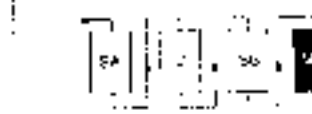
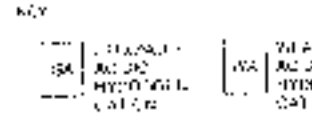
7.9 ระบบการขจัดซิลิกอนแบบต่าง ๆ



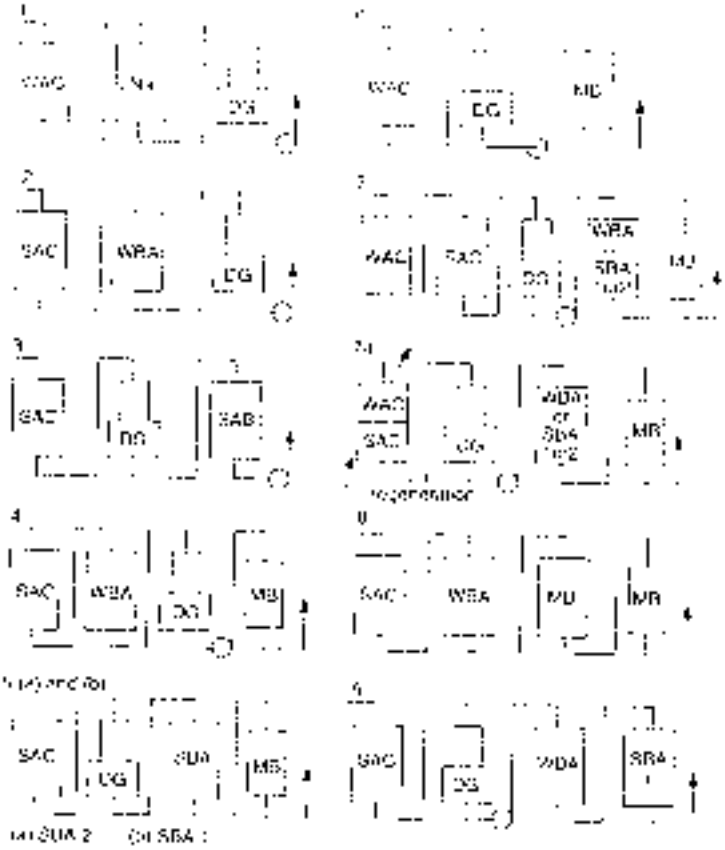
รูปที่ 7.47 ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบต่าง ๆ และสิ่งเหลือที่ขจัดได้



ตารางที่ ... แสดงลักษณะการใช้งาน คุณภาพน้ำที่ได้ และข้อได้เปรียบเสียเปรียบของระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบต่าง ๆ

ระบบ	การใช้งาน	คุณภาพน้ำ	ข้อได้เปรียบ เสียเปรียบ
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...
	...	...	...

KEY

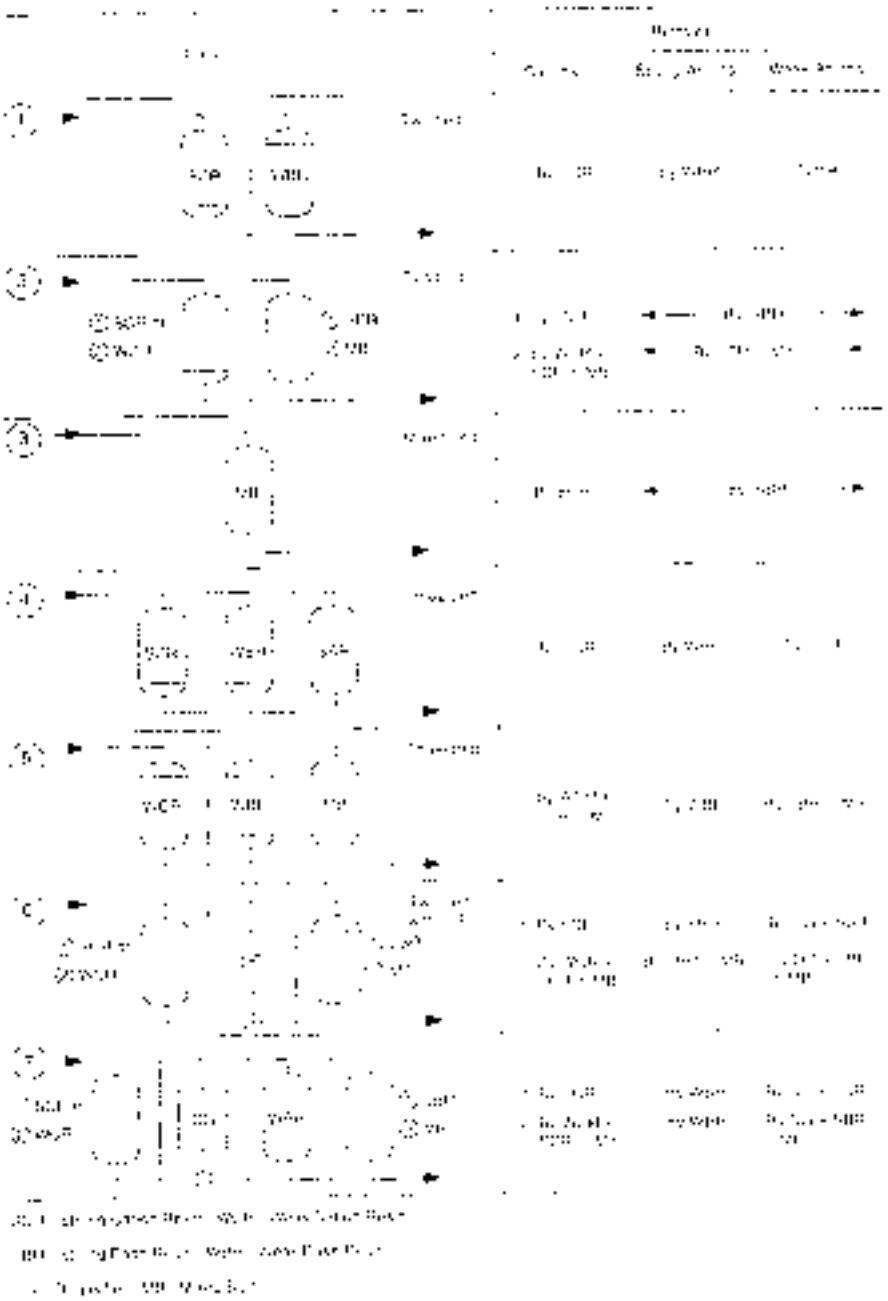


SAC = Strong Acid Cation WAC = Weak Acid Cation
SBA = Strong Base Anion WBA = Weak Base Anion
MB = Mixed Bed DG = Degasifier

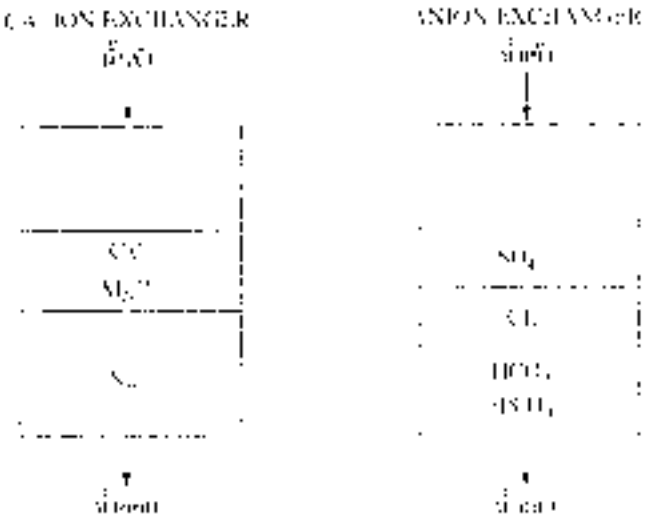
รูปที่ 7.48 ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบต่าง ๆ (ต่อเติม)

จากรูปที่ 7.48 ระบบการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงที่สุด (Ultra pure Water) และยังประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอีกด้วย น้ำที่ได้จะมีความต้านไฟฟ้าจำเพาะมากกว่า 0.1 ไมโครโมห์ เซนติเมตร และซิลิกาน้อยกว่า 0.02 พีพีเอ็ม ในขณะที่น้ำดิบมีโซเดียมคลอไรด์อยู่ 1,000 พีพีเอ็ม

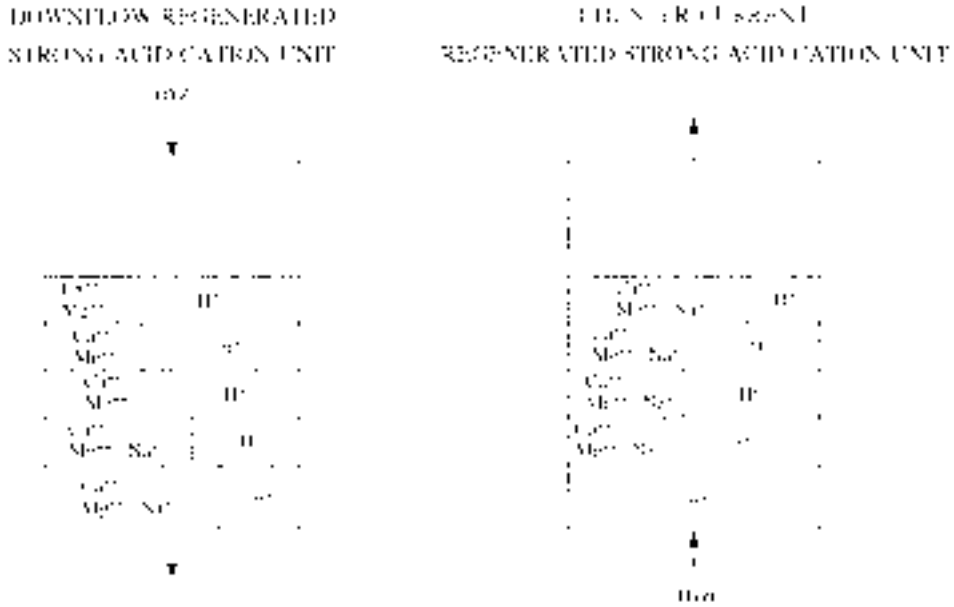
ตารางที่ 7.3 ผลลัพธ์การพิมพ์ผลลัพธ์ในระบบปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์ 95



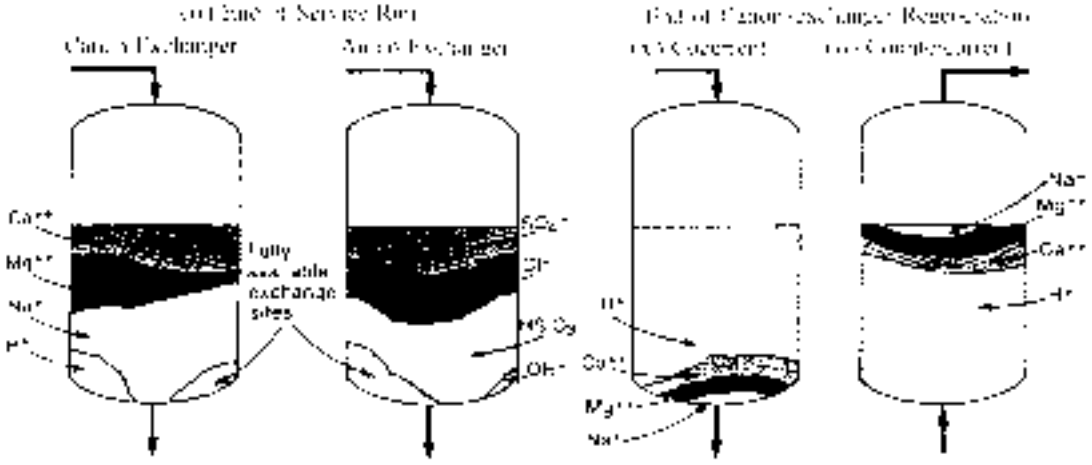
7.10 การแก้ปัญหาการชั้นของอิสระ



รูปที่ 7.9 ลักษณะของเรซินเมื่อผ่านการใช้งานไปแล้ว เช่น หลังจากระยะเวลา หลังจาก



รูปที่ 7.10 ลักษณะของเรซินประจุบวกเมื่อใช้งานแบบ เช่น ไหลทางเดียวกัน ระบบ ไหลสวนทางกัน



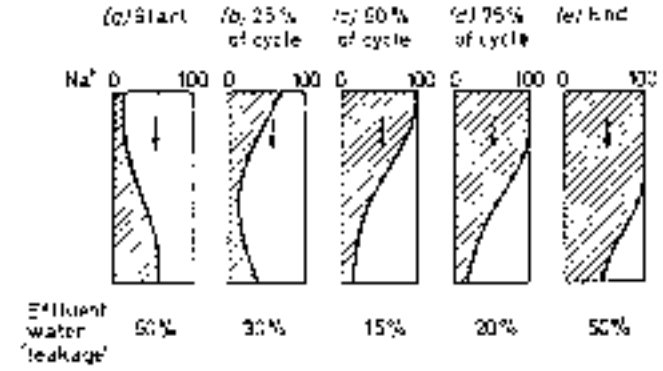
รูปที่ ๗.๕ ลักษณะของชั้นเรซินในขณะที่จับไอออนจนเต็มหมด และหลังจากล้างเรซินแบบไหลตามกันและไหลสวนทาง

ในรูปที่ ๗.๕ (ก) และ (ข) แสดงลักษณะการจับไอออนที่ชั้นเรซินยังไม่เต็ม ๆ และมีการล้างเรซินจนสิ้นสุดการล้างแบบไหลตามกันและไหลสวนทาง ตามลำดับ ส่วนรูป (ค) และ (ง) แสดงชั้นเรซินที่ถูกชั้นล่างสุดไว้ด้วยตาข่ายกันไม่ให้หลุดออกจากถังกรองขณะล้างย้อนกลับ ส่วนรูป (ค) แสดงชั้นเรซินขณะจับไอออนจนเต็มหมดแล้ว ส่วนรูป (ง) แสดงชั้นเรซินขณะล้างย้อนกลับ ซึ่งจะทำให้ชั้นเรซินขยายตัวขึ้นและเรซินที่มีขนาดเล็กจะถูกพัดพาขึ้นไปอยู่ด้านบน ส่วนเรซินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงมาอยู่ด้านล่าง ทำให้เรซินที่มีขนาดเล็กอยู่ด้านบนและเรซินที่มีขนาดใหญ่อยู่ด้านล่าง ดังนั้นเมื่อมีการล้างย้อนกลับแล้วจึงทำให้เรซินที่มีขนาดเล็กอยู่ด้านบนและเรซินที่มีขนาดใหญ่อยู่ด้านล่าง ซึ่งจะทำให้ชั้นเรซินด้านบนมีความต้านทานต่อการไหลของน้ำน้อยกว่าชั้นเรซินด้านล่าง ทำให้น้ำที่ไหลผ่านชั้นเรซินด้านบนมีมากกว่าน้ำที่ไหลผ่านชั้นเรซินด้านล่าง ดังนั้นเมื่อมีการล้างย้อนกลับแล้วจึงทำให้ชั้นเรซินด้านบนมีความต้านทานต่อการไหลของน้ำน้อยกว่าชั้นเรซินด้านล่าง

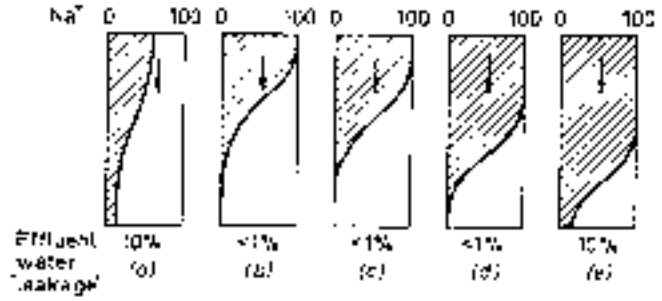
ตารางที่ ๗.๖ การเรียงของไซต์แลกเปลี่ยนไอออนเมื่อล้างด้วยวิธีการสวนทางกัน (ใช้เรซินชนิด SAC)

คุณภาพน้ำดิบ		แหล่ง ก	แหล่ง ข
Na^+	(มิลลิกรัมต่อลิตร $CaCO_3$)	๗๐	๔๐
$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	(มิลลิกรัมต่อลิตร $CaCO_3$)	๖๐	๘๐
ด่างทั้งหมด	(มิลลิกรัมต่อลิตร $CaCO_3$)	๔๐	๖๐
$Cl^- + SO_4^{2-}$	(มิลลิกรัมต่อลิตร $CaCO_3$)	๘๐	๔๐

คุณสมบัติ	กรดกำมะถัน (ระดับที่ ๔๐ กรัมต่อเรซิน)			
	ไหลตามกัน		ไหลสวนทาง	
	แหล่ง ก	แหล่ง ข	แหล่ง ก	แหล่ง ข
ไฮโดรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร $CaCO_3$)	๘	๖	๑๐๐	๑๐๐
ความนำไฟฟ้า (ไมโครซีมอน)	๔๑	๔๐	๔๓	๔๐



(a) ช่วงเริ่มต้น (b) 25% ของรอบการล้าง (c) 50% ของรอบการล้าง (d) 75% ของรอบการล้าง (e) สิ้นสุดรอบการล้าง



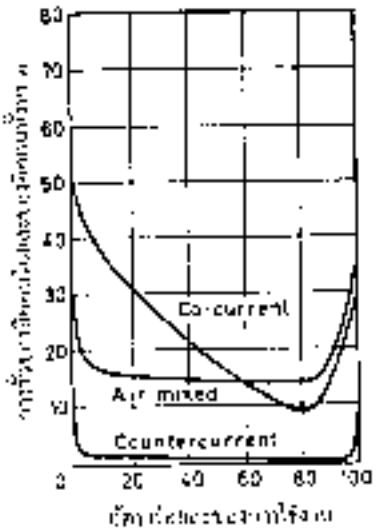
Leakage during countryflow operation (a) Start (b) 25% of cycle (c) 50% of cycle (d) 75% of cycle (e) end

(a) ช่วงเริ่มต้น (b) 25% ของรอบการล้าง (c) 50% ของรอบการล้าง (d) 75% ของรอบการล้าง (e) สิ้นสุดรอบการล้าง

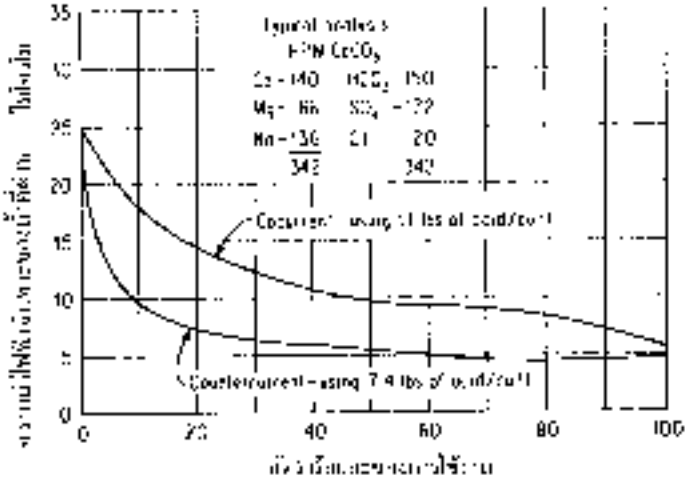
รูปที่ 7.12 เปรียบเทียบสภาพของชั้นเรซินและการรั่วของน้ำในการล้างของแบบ

ข้อดีของการล้างเรซินแบบไหลสวนทาง

1. น้ำที่ใช้มีคุณภาพดีกว่าการล้างแบบไหลตามปกติ
2. สิ้นเปลืองน้ำล้างเรซินน้อยกว่า
3. เพิ่มประสิทธิภาพของเรซิน
4. มีน้ำทิ้งที่ล้างแล้วน้อยกว่า
5. เพิ่มความจุ (Capacity) ของเรซิน
6. ช่วยให้เรซินคืนสภาพได้ดีขึ้น



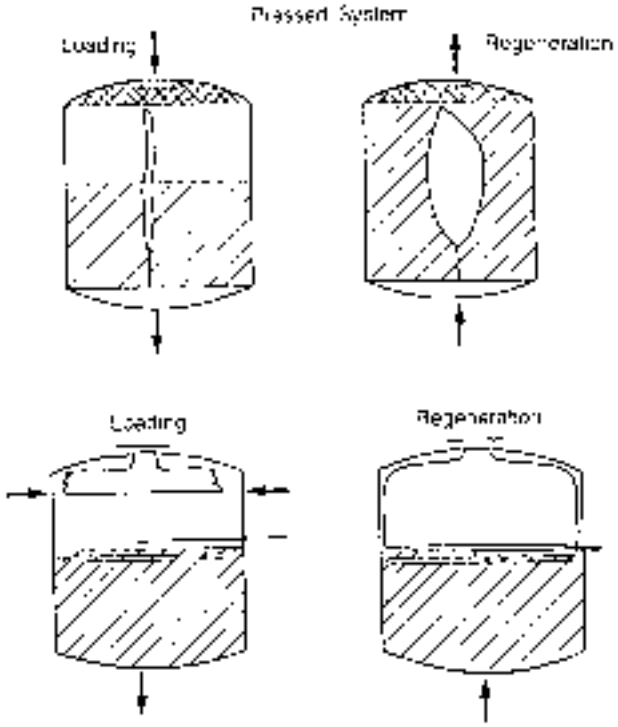
รูปที่ ๗.๑๓ กราฟเปรียบเทียบอัตราการชิ้นของมิลลอนไนการดังแบบและให้ทางตรงข้ามกับแรงดันอากาศ



รูปที่ ๗.๑๔ เปรียบเทียบคุณภาพน้ำจากการล้างเรซินประจุบวกแบบไหลตามกันและไหลสวนทาง

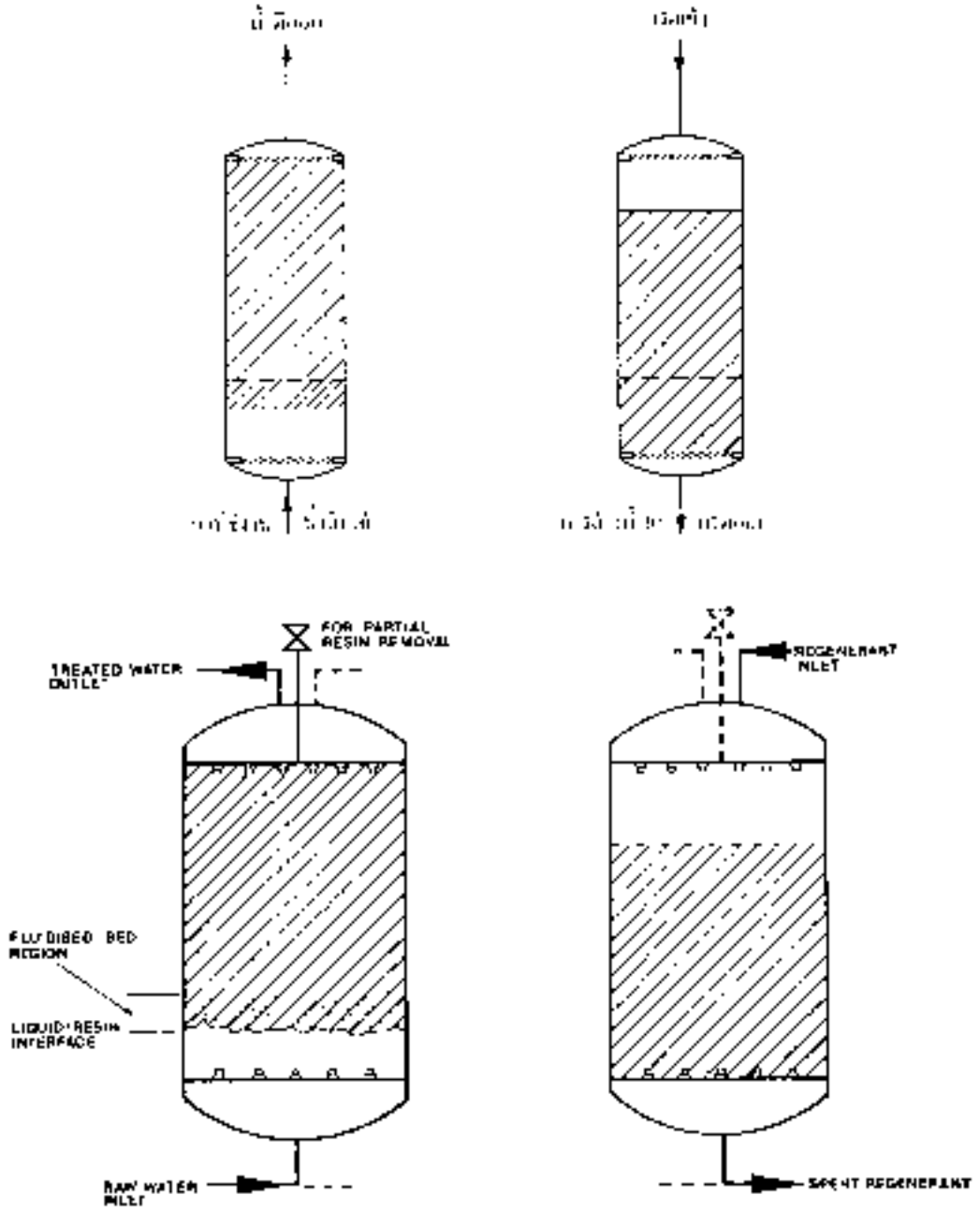
วิธีการล้างเรซินไหลสวนทางจะต้องเพิ่มอุปกรณ์หรือวิธีพิเศษเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในขณะที่ล้างมีวิธีต่าง ๆ ดังนี้

1. ใช้ถุงลม (Press Bed System)



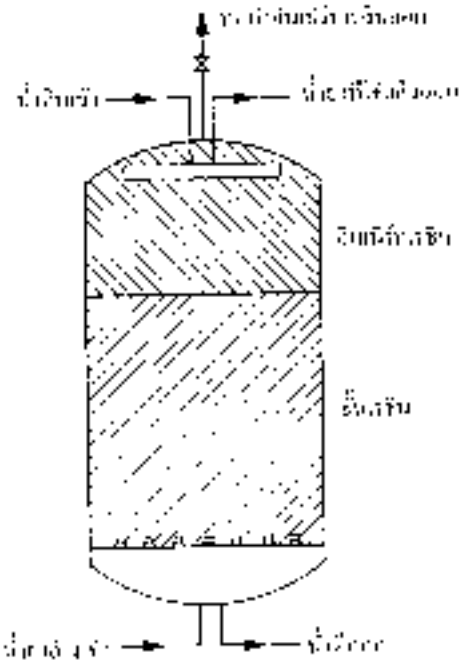
รูปที่ ๗.๑๕ ระบบใช้ถุงลมอัดเพื่อไม่ให้มีช่องว่างในขณะที่ล้าง

2. **ใช้ตะแกรงกั้น** (Perforated Plate System) ใช้ตะแกรงที่มีขนาดเล็กพอที่จะกั้นไม่ให้เรซิน เคลื่อนออกไปได้ ปิดไว้ที่ด้านบนและด้านล่างของถัง เมื่อใช้งานจะป้อนน้ำเข้าทางด้านล่างขึ้นด้านบน ซึ่งจะทำให้ชั้นเรซินที่เต็มจะถูกดันขึ้นไปข้างบน เรียกว่าเป็น Fluidised Bed วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ลมกวนกันก็ได้ แต่ต้องมีหัวรับน้ำอยู่ที่ด้านบนและด้านล่างของถังน้ำเพื่อรับเรซินจะหลุดไป

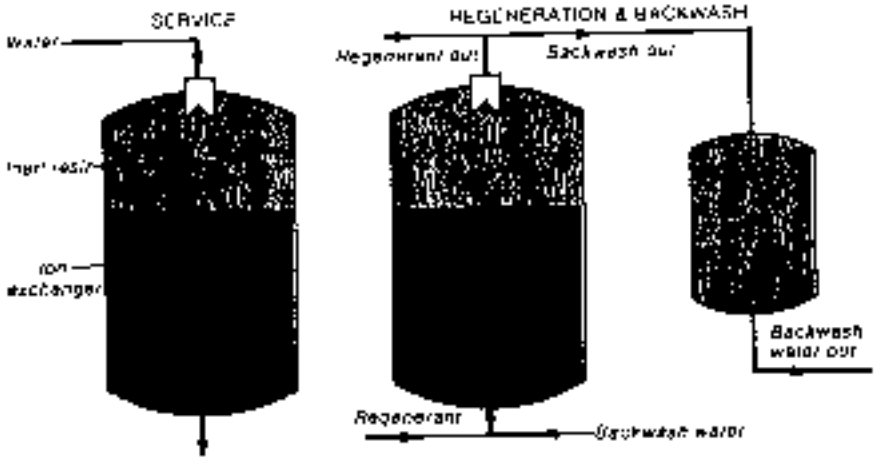


รูปที่ 7.54 ระบบ Fluidised Bed

3. **ใช้ Inert Resin** โดยการใส่เรซินพิเศษที่เรียกว่า Inert Resin ซึ่งไม่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนต่าง ๆ ติดอยู่ เพื่อให้ช่องว่างภายใน ชั้นเรซินพิเศษนี้จะไปอัดแน่น ทำให้ชั้นเรซินแต่ละชนิดมีผิวสัมผัสกันในขณะฟอกน้ำได้ เรซินพิเศษนี้จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าแบบแรก มีข้อดีคือลดค่าใช้จ่ายในการ ล้างย้อนน้ำได้ด้วย



รูปที่ 2.55 ระบบ Fixed Bed โดยใช้ Inert Resin

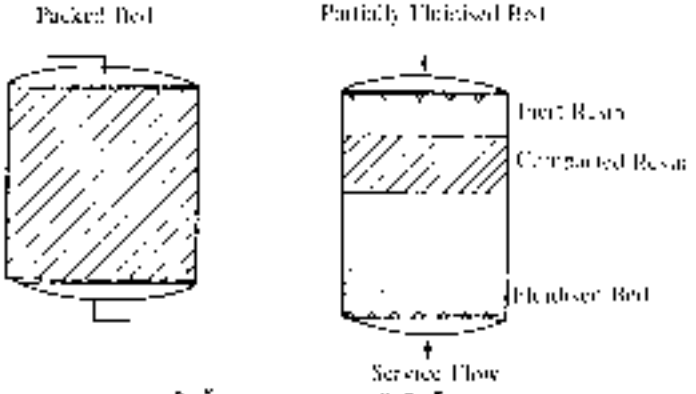


รูปที่ 2.56 การใช้ Inert Resin บรรจุจนเต็มไม่ให้มีช่องว่าง และขณะทำงานจับ จะถ่ายเรซินพิเศษนี้ไปไว้ในถังต่างหาก เพื่อให้มีช่องว่างในการขยายตัว

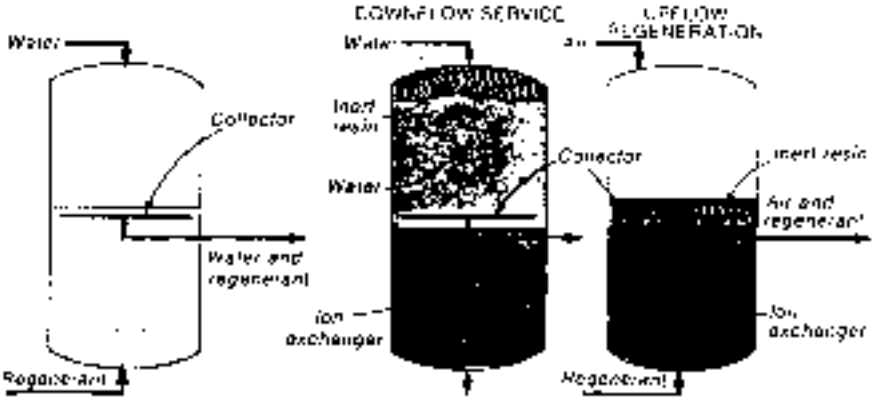
4. **วิธีอื่น ๆ**

(1) *Packed Bed* โดยการบรรจุเรซินจนเต็ม การจะใช้ทำให้ยิ่งที่ไหลจากถังจะมีปริมาณ ของน้ำที่ใช้ในการล้างย้อนน้ำได้มีปริมาณต่ำลงมาก ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการล้างย้อนน้ำได้ดีขึ้น

(2) Partially Fluidised Bed ใช้ลักษณะที่ใช้ Inert Resin ที่มีขนาดและความหนาแน่นของน้ำที่ไหลจากด้านล่างสูงกว่าเรซิน และน้ำจะพาเรซินให้ลอยตัวขึ้นมาด้านบน ซึ่งเรซินจะมีลักษณะเหมือนที่ไหลมา (Fluidised) ได้

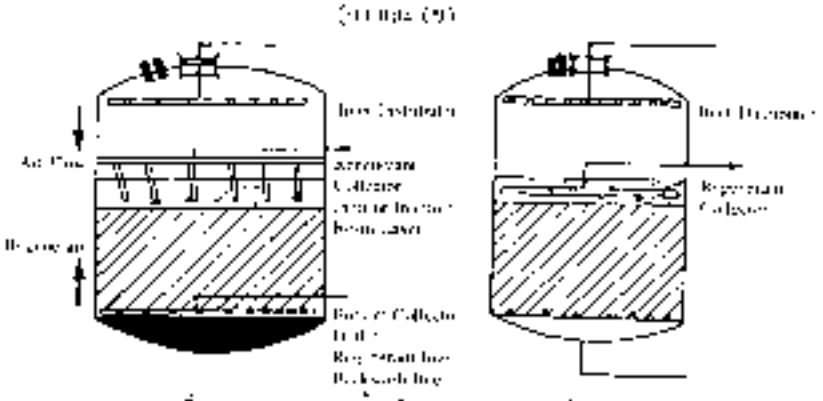


รูปที่ 7.59 การใช้น้ำหรืออากาศช่วยพ่นไม่ให้เรซินขยายตัว



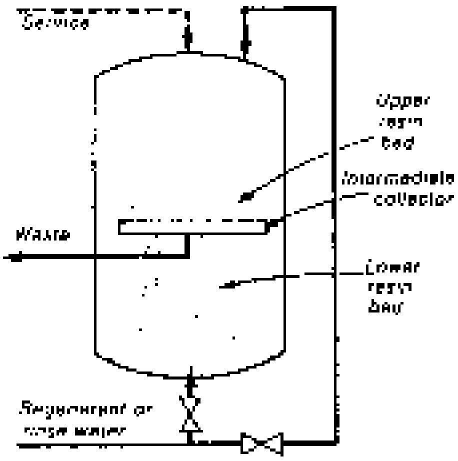
รูปที่ 7.60 ระบบ Packed Bed และ Partially Fluidised Bed

(3) ใช้น้ำหรืออากาศดัน ในขณะที่ล้างจะเปิดน้ำหรืออากาศเข้าดันด้านล่างเพื่อให้เรซินลอยตัวขึ้นมาด้านบนทำการไหลของน้ำและพ่นให้แรงดันไม่ให้ชั้นเรซินยุบตัวลงไป



รูปที่ 7.61 ระบบบ่อน้ำหรืออากาศดันด้านไว้

(ค) Co-counter Current Regeneration เป็นการล้างไอออนโดยให้น้ำยาล้างไหลเข้าทั้งสองด้าน คือด้านบนและด้านล่างพร้อม ๆ กัน เพื่อให้เกิดแรงสมดุลกันพอดี น้ำยาล้างจะไหลออกทางตรงกลาง วิธีนี้จะทำให้เม็ดเรซินมีการเคลื่อนไหวน้อยที่สุด เม็ดเรซินจึงมีการแตกหักเสียหายน้อยที่สุดด้วย



รูปที่ 7.62 ระบบ Co-counter Current

7.11 การกรองน้ำคอนเดนเสต (Condensate Polishing)

ในปัจจุบันนี้ต้นทุนในการผลิตได้เพิ่มสูงขึ้นทั้งจากการเพิ่มราคาของวัสดุดิบและพลังงาน ทำให้กระบวนการผลิตน้ำที่มีคุณภาพเหมาะสมสำหรับเป็นน้ำเลี้ยงป้อนเข้าหม้อไอน้ำก็พบปัญหาเช่นเดียวกัน แม้ว่าจะสูบน้ำได้ฟรี แต่ก็ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในรูปพลังงานไฟฟ้า ค่าสารเคมี และค่าเครื่องมืออุปกรณ์ปรับสภาพน้ำต่าง ๆ ค่าพลังงานความร้อนในการทำให้น้ำเข้าหม้อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งถ้าน้ำเลี้ยงมีอุณหภูมิต่ำก็จะสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น ในหลายโรงงานปรากฏว่าไอน้ำที่ใช้แล้วหรือน้ำคอนเดนเสตนั้น มิได้มีการนำหมุนเวียนกลับมาใช้มากเท่าที่ควร ส่วนหนึ่งจะปล่อยทิ้งไปเลย ๆ เนื่องจากไม่มีท่อลำเลียงนำกลับมาใช้ บางแห่งจำเป็นต้องปล่อยทิ้ง เนื่องจากมีตะกอนเหล็กในรูปสนิมเหล็กปนอยู่ ทำให้นำกลับมาใช้เป็นน้ำเลี้ยงได้อีก การพยายามนำน้ำคอนเดนเสตกลับมาใช้ให้มากที่สุดนั้น นอกจากจะเป็นการประหยัดวัสดุดิบคือน้ำแล้ว ยังเป็นการประหยัดพลังงานอีกด้วย เพราะน้ำคอนเดนเสตนั้นมีอุณหภูมิสูงอยู่แล้ว ย่อมสิ้นเปลืองพลังงานในการทำให้เป็นไอน้ำน้อยกว่า เนื่องจากน้ำคอนเดนเสตเป็นน้ำที่มีสภาพเกือบบริสุทธิ์ จึงละลายสิ่งสกปรกชนิดต่าง ๆ ได้ง่าย สิ่งสกปรกเหล่านี้มาจากหลายแหล่งดังนี้คือ จากอุปกรณ์ปรับสภาพน้ำต่าง ๆ ที่ทำงานไม่ได้เต็มที่ จากสารเคมีที่ใส่ในหม้อไอน้ำ ซึ่งบางชนิดระเหยไปได้ เช่น ไฮดราซีน จากการกัดกร่อนหรือสึกกร่อน ซึ่งได้แก่ออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ เช่น เหล็ก ทองแดง และนิกเกิล จากอากาศที่รั่วเข้าไปเพราะระบบมีสภาพเป็นสุญญากาศ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนจะเล็ดลอดเข้าไปละลายในน้ำคอนเดนเสตได้ จากการรั่วของระบบคอนเดนเซอร์ ทำให้น้ำหล่อเย็นซึ่งเป็นน้ำดิบรั่วไหลเข้าไปในน้ำคอนเดนเสตได้ เนื่องจากสิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในน้ำคอนเดนเสตนั้นมีปริมาณน้อยมากจึงนิยมใช้หน่วย ppb แทน ppm

ppb = Part Per Billion หรือหนึ่งส่วนต่อพันล้าน

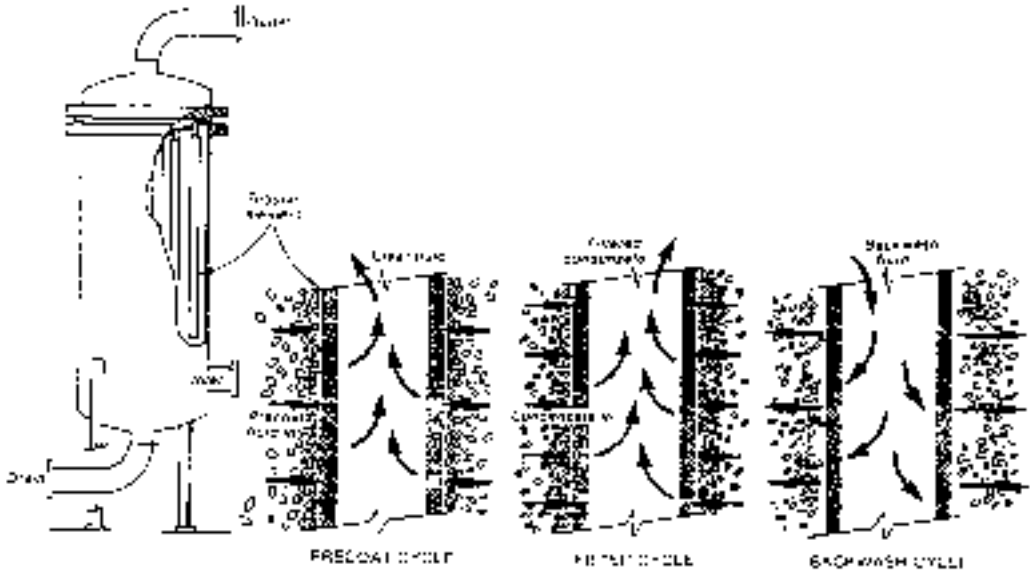
1 ppm = 1,000 ppb

ตารางที่ 7.5 คุณภาพน้ำคอนเดนเสตเหล่านี้

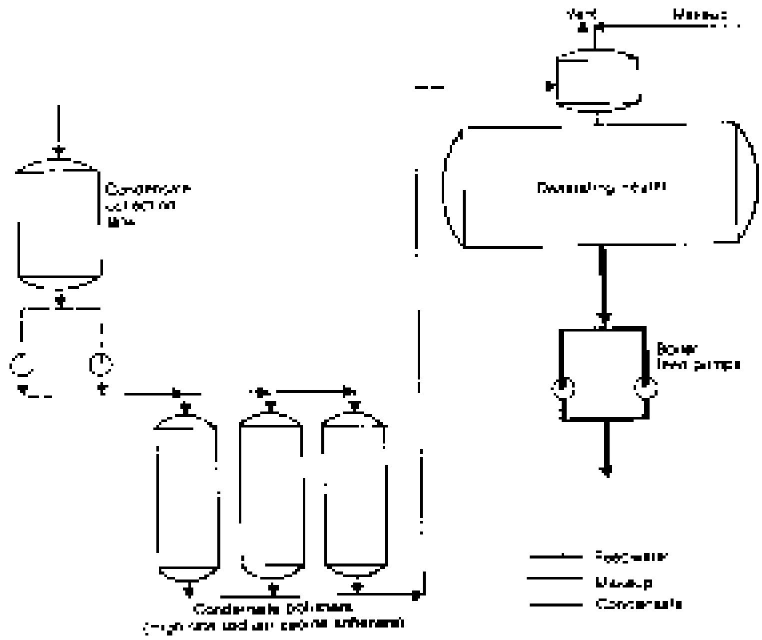
ปริมาณสารปนเปื้อน หน่วยเป็นส่วนในล้านส่วน (ppb)	ช่วงเดินหม้อไอน้ำปกติ	ช่วงเริ่มเดินหม้อไอน้ำ
ซิลิกาในรูป SiO_2	20 - 200	300 - 1,000
เหล็กในรูป Fe	10 - 50	500 - 2,000
ทองแดงในรูป Cu	5 - 10	50 - 100
โซเดียมในรูป Na	5 - 20	50 - 150
คาร์บอนไดออกไซด์ในรูป CO_2	20 - 40	200 - 300
ซัลเฟตในรูป SO_4	10 - 30	100 - 300
คลอไรด์ในรูป Cl	5 - 20	100 - 200
ซัลเฟตในรูป SO_4	-	200 - 350

วิธีการกำจัดคอนเดนเสตมีอยู่ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. **ระบบ Precoat**
   - (1) Cellulose ชนิดผง
   - (2) Diatomaceous Earth
   - (3) เรซินชนิดผง
2. **ระบบ Deep-Bed ใช้ชั้นเรซินลึก**
   - (1) ใช้เรซินประจุบวกและลบ
   - (2) ใช้เรซินประจุบวกในรูปโซเดียม
3. **ระบบอื่น ๆ เช่น ใช้สนามแม่เหล็ก**



รูปที่ 7.63 ระบบใช้เรซินชนิดผงซึ่งจะไปเกาะตาม ๆ ตะแกรงแม่เหล็ก



รูปที่ 7.64 ระบบกรองน้ำคอนเดนเสทโดยใช้เรซินประจุบวกในรูปโซเดียม

ระบบกรองน้ำคอนเดนเสทที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ ระบบใช้เรซิน ทั้งที่ใช้ในรูปโซเดียมซึ่งได้กล่าวแล้ว และใช้เป็น Mixed-bed ทั้งนี้เพราะเม็ดเรซินจะดักจับสารแขวนลอยที่เป็นสารกรองแล้ว ยังดักจับสารปนเปื้อนอื่น ๆ ได้อีกด้วย การใช้ระบบเรซินแยกแต่ละชนิดนั้นจะใช้กับอัตราไหลของน้ำได้ 5 – 10 gpm/ft² (12.25 – 24.5 เมตร/ชั่วโมง) ในกรณีระบบ DS เกาะติดตาม แต่ถ้าใช้ระบบแยกจะใช้กับน้ำคอนเดนเสทซึ่งมี DS ต่ำก็เพิ่มอัตราไหลให้สูงถึง 50 gpm/ft² (122.5 เมตร/ชั่วโมง) ในปัจจุบันนี้ใช้ระบบ Mixed-bed มากที่สุด ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

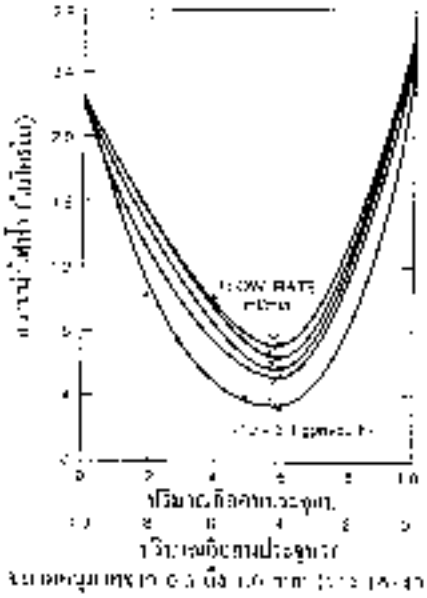
1. ระบบเรซินผสม (Mixed-bed) ใช้อัตราไหล 15–50 gpm/ft² (36.75 – 122.5 เมตร/ชั่วโมง) โดยมีเครื่องกรองก่อนหน้า และล้างเรซินภายนอกอุปกรณ์

2. ระบบเรซินผสมที่มีอัตราไหลสูง 50 gpm/ft² (122.5 เมตร/ชั่วโมง) หรือสูงกว่า มีเครื่องกรองก่อนหน้า และล้างเรซินภายในอุปกรณ์

3. ระบบเรซินผสมที่มีอัตราไหล 50 gpm/ft² (122.5 เมตร/ชั่วโมง) หรือสูงกว่า ไม่มีเครื่องกรองก่อนหน้า ล้างเรซินภายนอกอุปกรณ์

ในตอนแรกนั้น ก่อนเข้าหอเรซินต้องมีเครื่องกรองดักหน้าก่อนเพื่อกรองเอาสารแขวนลอยและตะกอนต่าง ๆ ออก เครื่องกรองที่ใช้มักเป็นแบบ Pre coat Filter ซึ่งมีอัตราไหลหรือความเร็วต่ำ ดังนั้นจึงต้องใช้ขนาดใหญ่เหมือนถัง ๆ เครื่อง ซึ่งทำให้ต้องลงทุนสูง ต่อมาภายหลังมีผู้ค้นพบว่าเรซินชนิด SC ก็มีคุณสมบัติในการขจัดเหล็กได้ และจะเพิ่มเติมทำหน้าที่เป็นชั้นสารกรองไปด้วย ดังนั้น ในหอเรซินแบบผสมนั้นจะเพิ่มชั้นเรซินประจุบวกให้มากขึ้น ซึ่งมีข้อจำกัดในการเพิ่มจำนวนเรซินดังกล่าว เพราะอัตราส่วนระหว่างเรซินประจุบวกและลบนั้น จะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบนี้ด้วย จากรูปที่ 7.65 จะเห็นได้ว่า

เมื่ออัตราส่วนระหว่างเรซินประจุบวกและลบที่ 4 : 6 (เรซินประจุบวก 40 % ประจุลบ 60%) จะให้น้ำที่มีคุณภาพดีที่สุด และขณะเดียวกันประสิทธิภาพในการกรองระดับสูง โดยทั่วไปส่วนการออกแบบระบบ MB นั้นจะใช้เรซินประจุบวกมากกว่า เพราะมีราคาถูกกว่าเรซินประจุลบมาก

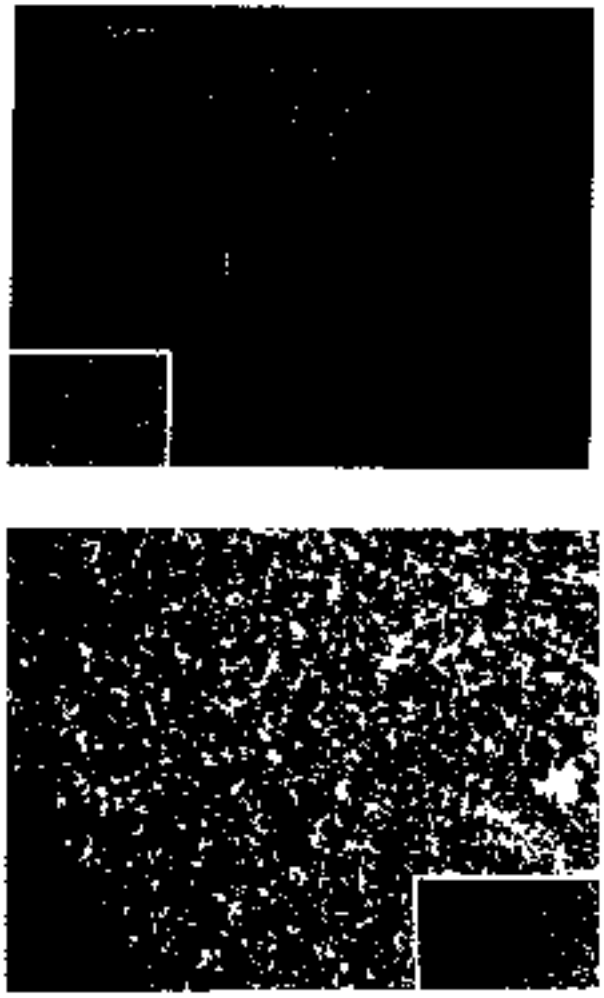


รูปที่ 7.45 แสดงประสิทธิภาพของระบบ Mixed-bed โดยมีเรซินประจุบวกและลบผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ

ในปัจจุบันนี้ระบบกรองน้ำแบบคอมแพคจะใช้เรซินประจุบวกและลบในอัตราส่วน 50 : 50 จนถึง 40 : 60 และ 100 : 50 ด้านล่างของถังเพื่อปรับค่า pH มีอัตราการไหลสูงในช่วง 40 - 60 gpm/ft² (98 - 122.5 ลิตร/นาที/ตร.ฟุต) ชั้นเรซินจะสูงอย่างน้อย 2 - 3 ฟุต (0.61 - 0.91 เมตร) เนื่องจากของเรซินมีขนาดเล็กกว่า MB ดังนั้นเมื่อใช้งานระยะเวลาหนึ่งแล้วจะต้องเรซินไปไว้ในภาชนะภายนอกเพื่อสะดวกในการล้างเรซินและจะนำมาแยกกัน

รูปที่ 7.46 ภาพเมื่อเรซินถูกแยกไซด์ของเพลิกชนิดแคทไอท์จนถูกแม่เหล็กดูดได้

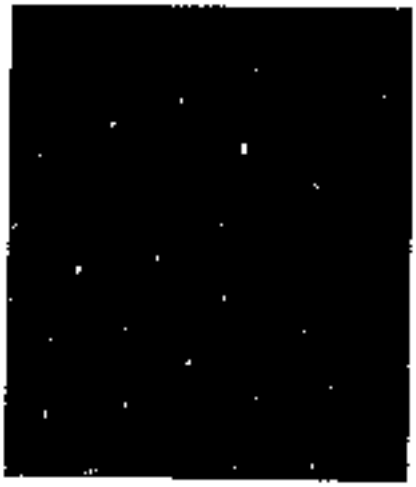
ในการกรองน้ำสามารถใช้เรซินนั้น ต้องเลือกชนิดของเรซินให้เหมาะสม เรซินที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเม็ดเจล (Gel) ซึ่งมีช่องว่างภายใน มีพื้นที่ผิว (Surface Area) ในเม็ดน้อย ๆ ตารางเมตรต่อกรัมเรซินแห้ง เรซินชนิดนี้จะไม่ทนทานต่อการใช้งานในการกรองน้ำสามารถได้ง่าย เมื่อในน้ำมีเหล็กและแมงกานีสมาก บางครั้งจากอุตสาหกรรมมีสารพิษเจือปนอยู่ในน้ำ เรซินที่เป็นเจล เรซินอีกแบบเป็นชนิด Macroreticular (Macroporous) ซึ่งเม็ดเรซินมีรูพรุนภายในมากกว่าเม็ดในเรซินประเภทเจลมีพื้นที่ผิว 40 - 65 ตารางเมตรต่อกรัมเรซินแห้ง และเรซินประเภทนี้มีความจุแลกเปลี่ยนประมาณ 50 ตารางเมตรต่อกรัมเรซิน



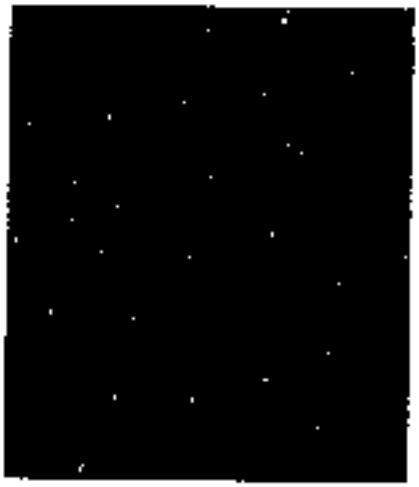
รูปที่ 7.67 ภาพขยายอิเล็กตรอน
(บน) ผิวของเรซินชนิดเจล
(ล่าง) ผิวของเรซินชนิด Macroporous เรซินรูพรุน

สมบัติและการใช้งานของเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกและประจุลบ ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน ดังนั้น จึงควรเลือกใช้เรซินที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งควรมีคุณสมบัติดังนี้

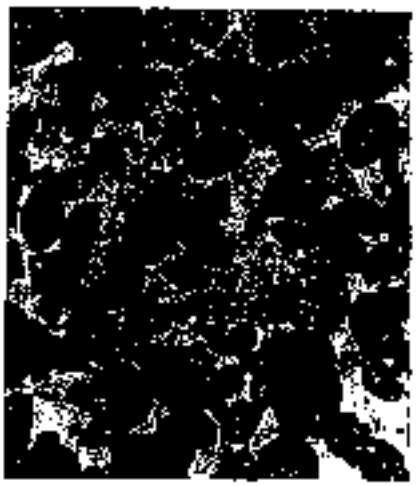
1. ทนทานต่อการเสียดสีกับผิวสัมผัส
2. มีความสามารถในการไหลต่ำ
3. ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันได้ดี
4. มีความต้านทานต่อการออกซิไดซ์
5. ต้านทานต่อการดูดซับสารอินทรีย์และจุลินทรีย์
6. มีความบริสุทธิ์สูงในการใช้งานด้านอาหารและยาได้ดี
7. เม็ดเรซินมีความแข็งแรงพอควร



ก) ชนิดใช้งานทั่วไป



ข) ชนิดใช้งานพิเศษ



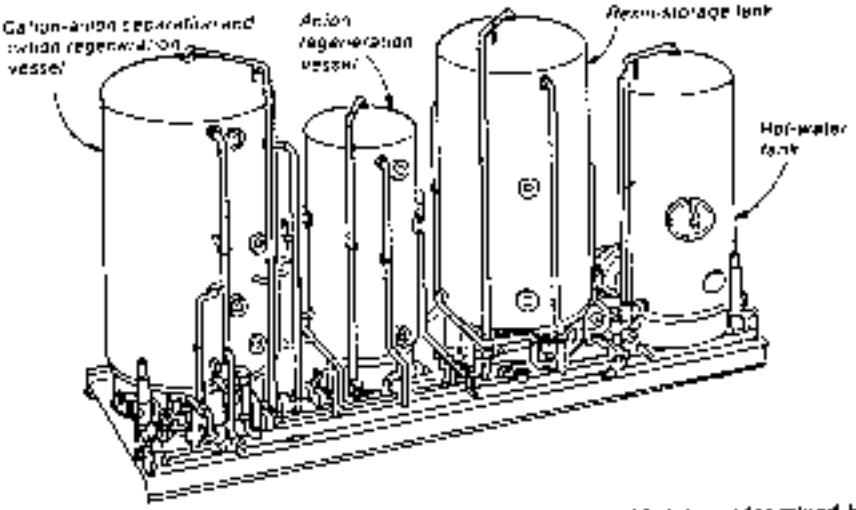
ค) ชนิดใช้งานพิเศษ

ง) ชนิดใช้งานพิเศษ

รูปที่ 7.68 ความคงทนต่อการใช้งานของเม็ดเรซิน ก) ชนิด เจลลิเคิลเจล ข) ค) ง) เรซินชนิด Macroreticular

7.11.1 การล้างเรซินในระบบ Condensate Polishing

เมื่อเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกและลบถูกใช้งานจนหมดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว จำเป็นต้องนำเรซินมาล้างฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้งานได้ใหม่ ซึ่งเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกและลบจะถูกล้างแยกกันในถังล้างเรซินคนละใบ ดังรูปที่ 7.10 ขั้นตอนแรกของการล้างเรซินคือการแยกเรซินทั้งสองชนิดออกจากกันก่อน โดยอาศัยหลักการที่ว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกมีความหนาแน่นมากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ ดังนั้นเมื่อเรซินทั้งสองชนิดถูกผสมรวมกันอยู่ในถังเดียวกัน และมีการไหลของน้ำจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสม เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะตกตะกอนอยู่ด้านล่าง ส่วนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบจะลอยอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 7.11



Typical Regeneration Vessel (left) and regeneration assembly (above) for mixed-bed condensate polishing. Anion-exchange resin is hydraulically separated from mixture and moved to adjacent vessel so resin types can be regenerated separately

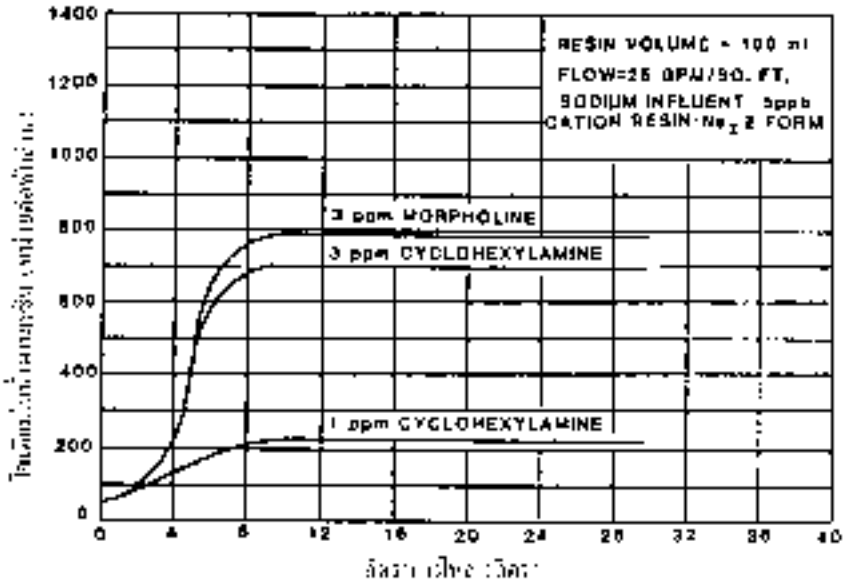
รูปที่ 7.10 ระบบแยกเรซินประจุลบไปยังถังล้างเรซิน

ปัญหาที่พบมากก็คือไม่สามารถจะแยกเรซินทั้งสองชนิดได้อย่างเด็ดขาด มักจะมีเรซินคนละชนิดปนกันไปบ้างเสมอ นักวิจัยจึงได้พัฒนาวิธีแยกเรซินประจุบวกได้ด้วยโซดาไฟ (NaOH) เรซินประจุบวกจำนวนเล็กน้อยนั้นจะถูกไฮโดรเจนไอออนไว้เสียหมด เมื่อนำไปรวมกันอย่างสม่ำเสมอและให้น้ำหล่อผ่านเพื่อแยกเรซินทั้งสองชนิดออกจากกัน เรซินประจุบวกที่จับไฮโดรเจนไอออนไว้จะปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนออกมาเพื่อแลกเปลี่ยนกับโซเดียมไอออนและไอออนอื่นๆ ที่มีอยู่ในสารละลาย นอกจากนี้ยังมีการป้อนสารเคมีพวก Morpholine หรือ Cyclohexylamine เข้าไปเพื่อป้องกันการกัดกร่อนแล้ว จะได้สารเหล่านี้ปนมากับน้ำคอนเดนเสท ซึ่งสารเหล่านี้จะไปแลกเปลี่ยนกับไฮโดรเจนไอออนที่เรซินจับไว้ได้ ทำให้น้ำที่ผ่านขึ้นเรซินมีไฮโดรเจนไอออนอยู่ Morpholine จะแลกเปลี่ยนกับเรซินได้ดังนี้

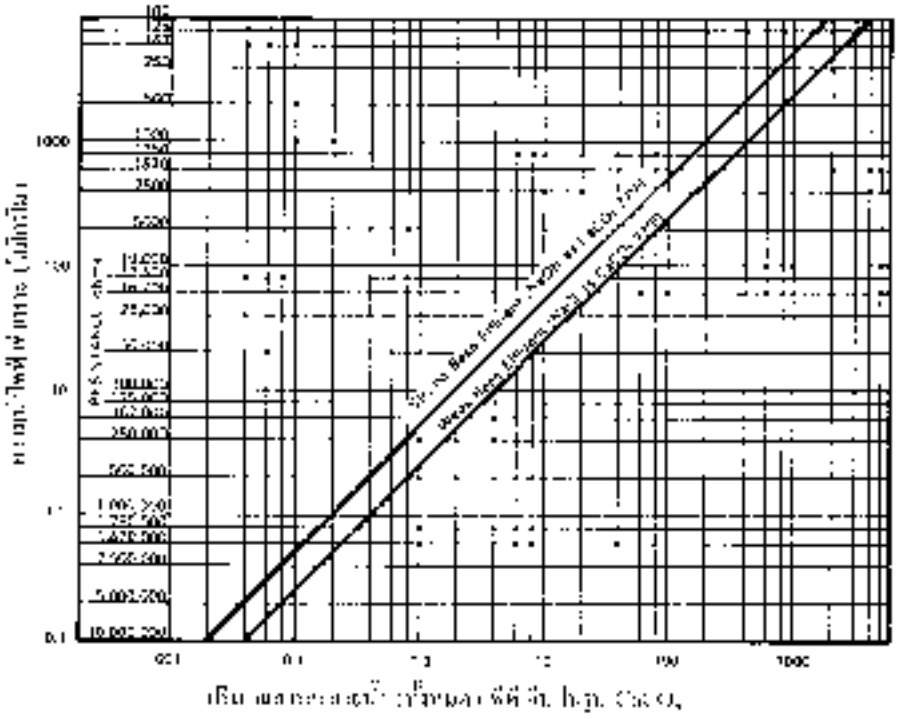
$$O-(C_2H_4)_2NH + H_2O \rightarrow O-(C_2H_4)_2-NH_2^+ + OH^-$$

$$2[O-(C_2H_4)_2-NH_2]^+ + 2OH^- + Na_2Z \rightarrow 2NaOH + [O-(C_2H_4)_2NH]_2Z$$

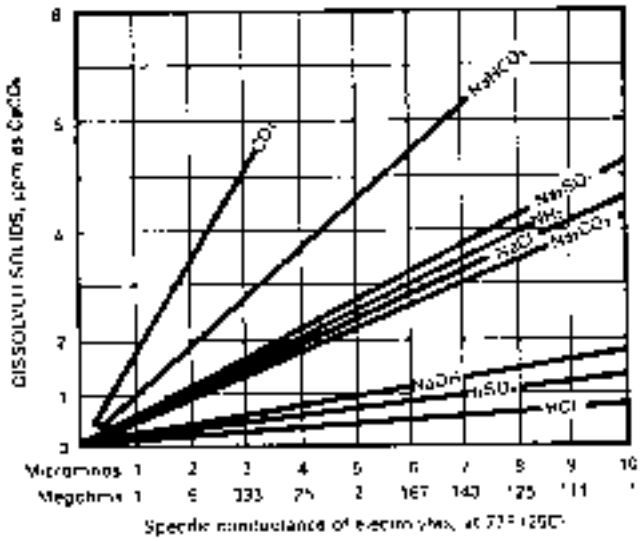
จากสมการจะเห็นได้ว่าเรซินจะจับ Morpholine ไว้และปล่อยไฮโดรเจนไอออนออกมา



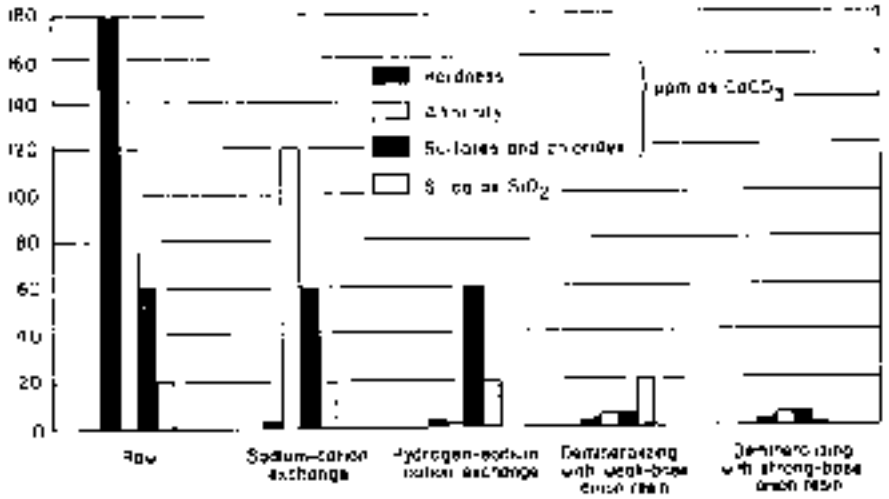
รูปที่ 7.70 คอนดักแตนซ์ที่มี Morpholine และ Cyclohexylamine อยู่ ออกทำให้เรซินประจุบวกโซเดียมอิ่มตัว



รูปที่ 7.71 ความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้าจำเพาะ และความเข้มข้นของสารละลายน้ำแอมโมเนีย ๆ



รูปที่ 7.72 ความสัมพันธ์ระหว่าง TDS และความนำไฟฟ้าจำเพาะของสารประกอบชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 7.73 รูปเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการขจัดแคทไอออนชนิดต่าง ๆ ของระบบแลกเปลี่ยนไอออนแบบต่าง ๆ

7.12 การระเบิดที่เกิดจากการใช้ยางดินประสิวล้างเรซิน

ยางดินประสิว (ไนเตรต) หรือยางดินประสิว (KNO$_3$) ในการฟื้นฟูสภาพเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก ระหว่างปฏิบัติการ ระบบน้ำที่มีเรซินจำนวนมาก ถ้าไม่มีระบบกำจัดเกลือหรือสูญเสียน้ำที่ปฏิบัติการนี้เกิดขึ้นเรซินทั้งชนิดประจุบวกและประจุลบ เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ระบุ WB และ SB ที่ระบุลงในนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันในรูปของ Quaternary Amine หรือในรูปของ ฟีนอลในกลุ่ม เรซินประจุบวกจะอยู่ในรูปของออนเนียม เมื่อใช้ยางดินประสิวที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้เกิดสารละลายเข้มข้นในเรซินได้ ภายในเม็ดเรซินที่ถูกกัดกร่อน เมื่อมีความร้อนสูงขึ้น และถูกเติมอากาศอย่างรวดเร็ว และหรือมีการออกซิไดซ์ประกอบอยู่ด้วยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการระเบิดได้

$$NH_4NO_3 \longrightarrow N_2O + 2H_2O$$

$$2NH_4NO_3 \longrightarrow 2N_2 + 4H_2O + O_2$$

ปฏิกิริยาของการสลายตัวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ และมีสิ่งที่ทำให้เกิดขึ้นได้ง่าย เช่น แอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) ที่มีอยู่ในสารละลายเดิม และสิ่งที่ทำให้เกิดขึ้นได้ง่ายนี้ จะทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกเข้มข้นอย่างรุนแรง ที่อุณหภูมิ 80 - 90°C ก่อให้เกิดไนโตรเจนไดออกไซด์

7.12.1 ข้อควรระวังในการใช้กรดเติมประสิทธิ์ก้างเรซิน

1. ห้ามใช้กรดในประสิทธิ์ก้างเรซินประจุลบชนิด WB
2. ในการใช้งานสารประสิทธิ์ก้างเรซินประจุลบชนิด SB แม้ว่าจำเป็นต้องใช้แน่ แต่ใช้ด้วยความระมัดระวังให้มากที่สุด
3. ถ้าใช้กรดเติมประสิทธิ์ก้างเรซินประจุบวกชนิด SC เกินปริมาณที่กำหนดไว้ จะมีไอออนของโลหะ เช่น Fe^{3+} ซึ่งจะเป็นตัวก่อปฏิกิริยากับเรซินแลกเปลี่ยน
4. โดยปกติแล้วจะใช้งานเรซินเมื่อมีการดูดซับสารอินทรีย์ต่ำ
5. มีไอออนที่ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยน
6. อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น
7. ปริมาณเรซินมาก
8. เรซินแต่ละชนิดมีความคงทนต่อการสึกกร่อนต่างกัน
9. ต้องใช้น้ำเจือจางกรดเติมประสิทธิ์ที่ระดับที่เหมาะสมกับการดูดซับ
10. ต้องใช้น้ำล้างเรซินหลังจากล้างด้วยกรดเพื่อนำสารละลายกรดที่ค้างอยู่ในเรซินออกให้หมด ปฏิกิริยาการสลายตัวจะทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนได้

7.13 ปัญหาในการใช้งานเรซิน

เรซินที่นำไปใช้งานในกระบวนวิธีต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะมีปัญหาในการดำเนินงานเสมอ ปัญหาเหล่านี้ถ้าหากไม่ได้รับการแก้ไขอย่างรีบด่วนแล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพของเรซินในการดักจับสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำลดลง ซึ่งมีสาเหตุใหญ่ ๆ 3 ประการด้วยกัน คือ

1. กำลังหรือความจุของเรซินลดลง (Short Capacity)
2. น้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพเปลี่ยนแปลงไป
3. มีการสูญเสียความดัน (Head Loss) มาก และการไหลของน้ำที่ผลิตได้ลดลง

7.13.1 กำลังหรือความจุของเรซินลดลง

สาเหตุที่จะทำให้ความสามารถในการดักจับสารต่าง ๆ ของเรซินลดลงมีดังนี้คือ

1. มีสารอินทรีย์ปนมากับน้ำที่ผลิตได้
2. มีการสูญเสียเรซินออกไปกับกระบวนการล้างย้อน
3. เรซินแตกหัก

ง. น้ำดิบมีคุณสมบัติเป็นกรดมากเกิน

จ. อัตราการไหลของน้ำดิบมากเกินไป หรือปริมาณน้ำที่ผ่านสูงเกินไป

ฉ. สภาพของสารเคลือบเปลี่ยนแปลง

1. **มิเตอร์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำไม่ถูกต้อง** เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำดิบที่ใช้ในระบบน้ำดิบของโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นมิเตอร์ประเภทที่ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านท่อปิด ซึ่งจะอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของความดันที่เกิดขึ้นในท่อ หรือความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อ ในการวัดอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีสารแขวนลอยอยู่ในปริมาณสูง ๆ เช่น น้ำดิบจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ โรงงานน้ำตาล โรงงานแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น ย่อมทำให้เกิดการสึกหรอของมิเตอร์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำดิบได้ง่าย ทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้มิเตอร์ประเภทนี้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีสารแขวนลอยอยู่ในปริมาณสูง ๆ

2. **เรซินรั่วไหลหรือสูญเสีย** ถังกรองที่ใช้ในการกรองน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบแลกเปลี่ยนไอออนนั้น ถ้าหากมีการรั่วไหลของเรซินออกมาด้วยแล้ว ย่อมทำให้ประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนไอออนลดลงอย่างมาก ๆ การรั่วไหลของเรซินนี้อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในขณะที่มีการจ่ายน้ำดิบเข้าสู่ถังกรอง และในขณะที่มีการล้างเรซินด้วยน้ำย้อนกลับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการออกแบบถังกรองที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือเกิดจากการสูญเสียน้ำยาและน้ำล้างเรซินในขณะที่มีการล้างเรซินด้วยน้ำย้อนกลับ ซึ่งอาจเนื่องมาจากความหนืด (Viscosity) ของน้ำที่เพิ่มขึ้น และขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นเรซินในถังกรองด้วย ดังนั้นการล้างเรซินด้วยน้ำย้อนกลับจึงควรกระทำด้วยความระมัดระวัง และควรมีการตรวจสอบปริมาณเรซินที่สูญเสียไปในขณะที่มีการล้างเรซินด้วยน้ำย้อนกลับทุกครั้งด้วย

3. **สภาพการล้างเรซินไม่เพียงพอ** ในการล้างเรซินด้วยน้ำเกลือนั้น ถ้าหากมีการล้างเรซินด้วยน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไป และระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างเรซินกับน้ำเกลือสั้นเกินไปแล้ว ย่อมทำให้ประสิทธิภาพในการล้างเรซินลดลง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินลดลงด้วย

โดยปกติแล้วเรซินที่ใช้ในการประจุไอออนบวกจะใช้เกลือแกงเป็นน้ำยาในการล้างเรซิน ในขณะที่การประจุไอออนลบจะใช้โซดาไฟเป็นน้ำยาในการล้างเรซิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าในการล้างเรซินแต่ละครั้งนั้นจะต้องใช้น้ำยาในการล้างเรซินเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงควรมีการวางแผนในการใช้น้ำยาล้างเรซินที่ใช้แล้วนั้นให้น้อยลงที่สุด หรือมีการนำน้ำยาล้างเรซินที่ใช้แล้วนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือมีการนำน้ำยาล้างเรซินที่ใช้แล้วนั้นไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำยาล้างเรซินมาใช้ในการล้างเรซินแต่ละครั้ง นอกจากนี้ ในบางครั้งอาจจำเป็นต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำยาล้างเรซินให้สูงขึ้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้น้ำยาล้างเรซินชนิด SAC อุณหภูมิของน้ำยาล้างเรซินจะเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการตัดสินใจว่าจะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำยาล้างเรซินให้สูงขึ้นหรือไม่ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการล้างเรซินสูงสุดนั่นเอง

4. **น้ำดิบมีคุณสมบัติแปรผันมาก**

(1) เนื่องจากปริมาณฝนตกชนิดต่าง ๆ

(2) เนื่องจากอุณหภูมิ

ถ้าในน้ำดิบมีปริมาณสิ่งตกชนิดต่าง ๆ ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณมากแล้ว ย่อมทำให้อุปกรณ์ในระบบแลกเปลี่ยนไอออนทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพ และทำให้อุปกรณ์นั้นผลิตน้ำในอัตราที่ต่ำกว่าความสามารถที่มีอยู่ เนื่องจากในน้ำมีสิ่งตกค้างบางชนิดตกตะกอนอยู่ในถังกรองต่าง ๆ มากขึ้น ซึ่งจะเป็นอุปสรรคขัดขวางการไหลของน้ำผ่านถังกรอง ทำให้ความดันในถังกรองสูงขึ้น และอาจทำให้เรซินแตกหักได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้เรซินชนิด Weak Acid Cation ซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมการจับอิออนของแคลเซียมอย่างรวดเร็วเพื่อยืดอายุการใช้งานของเรซินออกไป

5. **อัตราไหลในการใช้งานสูง** (Service Flow Rate) ค่าดังกล่าวสามารถใช้ในการจับอิออนของเรซินตั้งแต่เริ่มใช้งานจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว คือเริ่มมีอิออนหนีออกมาในน้ำ ซึ่งน้ำที่ผ่านเข้าไปนั้นมีสัดส่วนของอิออนชนิดต่าง ๆ และอุณหภูมิคงที่แล้ว จึงสามารถบอกอัตราไหลนั้นได้ เพราะจำนวนที่ไหลผ่านชั้นเรซินมีอัตราไหลมากขึ้นก็จะทำให้เวลาสัมผัสกันน้อยลงด้วย ในกรณีที่อุปกรณ์นั้นใช้กับน้ำดิบที่มี TDS สูง (มากกว่า 800 พีพีเอ็ม) จะมีโอกาสที่จะเกิดสภาพเสื่อมสมรรถนะหรือกำลังความสามารถในการจับอิออนลดลง ไม่ว่าจะเนื่องจากมีอัตราการไหลสูงกว่าค่าที่ใช้ในการคำนวณตามแบบหรือมาจากสิ่งปนเปื้อน (โดยเฉพาะ) ในน้ำดิบเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ทำนายไว้ เมื่อใช้งานที่อัตราการไหลสูงสุดตามที่ออกแบบไว้ การที่กำลังความสามารถในการจับอิออนลดลงนั้นแสดงว่าคุณสมบัติของเรซินเองนั้นเอง เรซินชนิด WC และ WB จะเกิดปัญหานี้ได้ง่าย เมื่อระดับที่ใช้งานกับน้ำดิบที่มีปริมาณเฉลี่ยกลาง (โดยเฉพาะ) ต่ำกว่า 800 พีพีเอ็มมากแล้วก็ตาม

6. **สภาพของเม็ดเรซินเปลี่ยนแปลง** โดยปกติแล้วอายุการใช้งานของเรซินนั้นมีจำกัด แต่จะนานเพียงใดนั้นขึ้นกับสภาพการใช้งานด้วย การเปลี่ยนแปลงสภาพของเม็ดเรซินซึ่งจะทำให้ความสามารถและสมรรถนะของมันเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้ คือ

(1) เม็ดเรซินแตกหรือบิ่น

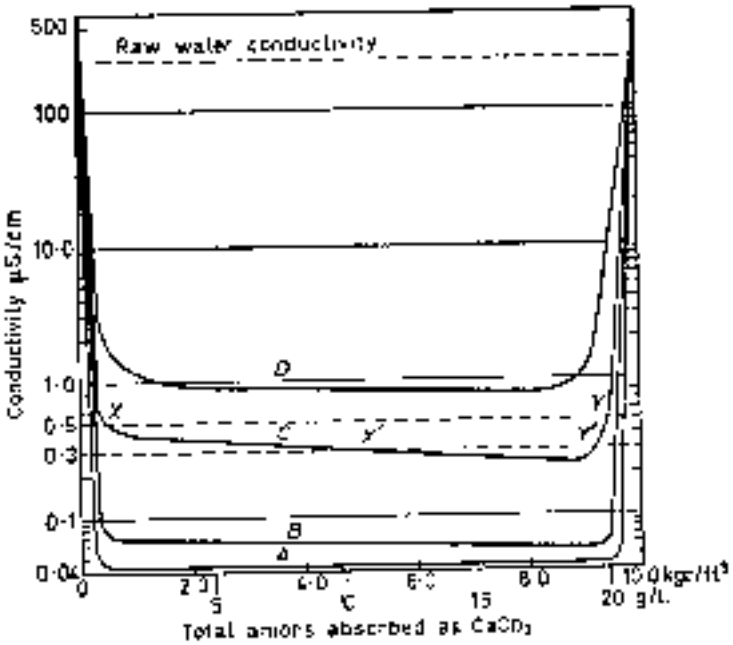
(2) โครงสร้างภายในของเม็ดเรซินเปลี่ยนแปลง สูญเสียหมู่ประกอบทางเคมีบางอย่าง (Functional Group)

(3) เรซินสกปรกหรืออุดตันเนื่องจากสารอินทรีย์และหรือสารอนินทรีย์

(1) **เม็ดเรซินแตกหรือบิ่น** เมื่อใช้งานไปนานเข้าจะพบว่าทั้งเรซินประจุบวกและประจุลบจะเริ่มแตกหรือบิ่น เม็ดที่แตกหรือบิ่นนี้จะมีขนาดเล็กลง ซึ่งมีโอกาสที่จะหลุดลอยไปในคอลัมน์หรือตกอยู่ของหัววัดน้ำ (Strainer) ไปได้ ซึ่งทำให้ปริมาณเรซินลดลงย่อมทำให้สมรรถนะต่ำลงด้วย เม็ดเรซินที่แตกหรือบิ่นที่ค้างคาอยู่บนผิวหน้าของชั้นเรซินจะทำให้น้ำไหลกระจายไปทั่วผิวหน้าไม่สม่ำเสมอ

(2) *โครงสร้างภายในของเรซินเกิดการเปลี่ยนแปลง* น้ำในน้ำดิบมีปริมาณคลอรีนที่เหลือ (Residual Chlorine) อยู่มากกว่า 1 พีพีเอ็ม จะออกซิไดซ์เรซินได้ ซึ่งทำให้โครงสร้างเรซินเสียกำลังความสามารถในการจับอิออนไปบ้าง เนื่องจากการออกซิไดซ์จะทำให้เกิด De cross Linking ซึ่งทำให้เรซินหดน้ำหนักหรือขนาดตัวได้ เมื่อเม็ดเรซินขนาดหัวทำให้ปริมาตรของเม็ดเรซินเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันกำลังความสามารถของเรซินต่อปริมาตร (Volume Capacity) จะลดลง สมรรถนะของเรซินจะลดลงเมื่อเรซินเกิดออกซิไดซ์จนน้ำหนักลดลงจากหมู่แรกไปต่าง ๆ ในเรซินประจุลบจะมีเสถียรภาพต่ำกว่ากรุ๊ปที่อยู่ในเรซินประจุบวก อายุการใช้งานของเรซินจะสั้นหรือยาวนั้นขึ้นกับอัตราการสูญเสียกรุ๊ปต่าง ๆ เหล่านี้ เท่าที่เคยพบมา ตัวที่ไวต่อเรซินชนิด SB เมื่อนำไปใช้งานจะสูญเสียกำลังความสามารถในการจับอิออนไปราว ๆ 10-15% ภายใน 2-3 เดือนแรกที่ใช้งาน แต่อัตราการสูญเสียนี้จะลดลงเป็นไม่กี่เปอร์เซ็นต์ในปีต่อไป การสูญเสียนี้จะยอมรับได้มากน้อยขึ้นกับว่าน้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพดีตามที่ต้องการหรือไม่ และหากการสูญเสียสมรรถนะนี้ได้ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายจนเกินกำหนดหรือไม่

(3) ***เรซินสกปรกหรืออุดตัน (Resin Fouling)*** การสกปรกหรืออุดตันของเรซินนั้นเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ



รูปที่ 7.74 ผลของการดูดซับของเรซินแลกเปลี่ยนอันพริกในระบบ Mixed bed

เส้น A เป็นน้ำที่ [illegible]

เส้น B เป็นน้ำที่ [illegible]

เส้น C เป็นน้ำที่มี TDS และซิลิกาเป็น [illegible]

เส้น D เป็น [illegible]

รูปที่ 7.75 ภาพขยายเม็ดเรซินจะเห็นแต่ละเม็ดไว้ชัดเจน

7.13.2 น้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพเปลี่ยนแปลงมาก

เกิดขึ้นได้จากสาเหตุดังนี้

1. เริ่มมีการอุดตันในไส้กรองเรซิน และเรซินเสื่อม
2. ใช้น้ำล้างเรซินที่มีคุณภาพไม่ดีในการล้างย้อนกลับ
3. การรั่วของน้ำดิบ
4. ถูกโจรกรรมหรือลักขโมย

1. **การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำดิบจะทำให้มีสิ่งสกปรกหลงเหลือบรรจุเรซินมากขึ้นอย่างไร**

(1) การเกิดตะกรันของแคลเซียมที่มีความเสถียร (Monocalcium Ion) ซึ่งมักได้แก่ ไบคาร์บอเนตที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเรียกเพิ่มเติมคือ ความกระด้างถาวร

(2) มี EMA (Equivalent Mineral Acidity) หรือการวัดกรดแร่ธาตุเพิ่มขึ้น (EMA มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม $CaCO_3$ ต่อลิตร หรือ ppm $CaCO_3$)

การปรับแก้ไขเมื่อมีความผิดพลาดนี้ จะต้องมีการล้างย้อนกลับบ่อยครั้งขึ้น และการฟื้นฟูเรซินจะไม่สมบูรณ์

(3) คุณภาพน้ำที่ได้จากระบบที่ใช้เรซินประจุบวกในเมืองมีเรซินหนึ่งตัว (Multi-stage) เช่นกัน ซึ่งต้องการการบำรุงรักษาเช่นเดียวกับเรซินประจุบวกในเมืองที่ใช้ระบบเดี่ยว

คุณภาพน้ำที่ได้จากเรซินประจุบวกในเมืองที่ใช้ระบบเดี่ยว ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าความกระด้างที่ใช้ระบบเดี่ยวเท่านั้น

เช่นการใช้เรซิน SBA ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับกรดอินทรีย์ได้ดี ดังนั้นการใช้น้ำประจุบวกในเมือง SB ที่ผลิตแล้วมาผสมกับน้ำดิบในอัตราส่วนที่เหมาะสม

การผลิตน้ำประจุบวกในเมือง ข้อเสีย คือ ต้องมีการปรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำดิบที่ใช้เรซินประจุบวกในเมือง SB ก่อน ซึ่งมีผลต่อค่า pH และมีค่าความเป็นกรดของน้ำ

การใช้ประโยชน์ ข้อดี คือ ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ (Residual Organic) ในน้ำได้ ซึ่งทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้นกว่าการใช้เรซินประจุบวกในเมือง WB ในขณะที่ข้อเสียคือ ต้องมีการปรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำดิบก่อนที่จะเข้าเรซินประจุบวกในเมือง SB ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินที่ใช้ (Mixed-bed) ซึ่งคุณภาพของน้ำจะดีกว่าแบบที่ไม่ผสมกันอย่างมาก

2. **ถ้าน้ำยาที่ใช้ล้างเรซินมีคุณภาพ ปริมาตรหรือความเข้มข้นและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง** มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นได้ในสภาวะปกติ หรือถูกโจรกรรมในผู้ประกอบการ ซึ่งมีผลต่อการรั่วไหลของน้ำกระด้างมากขึ้น (Ion Leakage)

การที่น้ำยาล้างเรซินมีคุณภาพไม่ดีนั้น เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

(1) ผู้ประกอบการที่ใช้น้ำยาที่ไม่ได้มาตรฐานโดยเฉพาะในผู้ประกอบการขนาดเล็กที่ไม่มีการควบคุมที่ดีพอ

(2) เกิดจากโจรกรรมหรือลักขโมย ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ไม่มีการป้องกันที่ดีพอ ในกรณีที่ผู้ประกอบการมีการเก็บน้ำยาไว้ในที่ที่ไม่มีการป้องกันที่ดีพอ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำยาล้างเรซินมีราคาแพงมาก

(5) ถ้าน้ำมีค่าความกระด้างสูงกว่า 200 Milliequivalent Liter ควรนำไปผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchanger) ก่อนเข้าเครื่องปรับคุณภาพน้ำ เพื่อลดความกระด้างของน้ำที่ใช้ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองดีขึ้น ไม่เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว ปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นกับการใช้งานประเภทน้ำไหลลงทางเดียว (Down Flow) ที่ใช้ทรายแก้วประเภทเดียวหรือใช้ทรายแก้วและถ่านกรองน้ำ ซึ่งจะมีการอัดตัวของชั้นทรายน้อยกว่าการใช้งานประเภทน้ำไหลสวนทางกัน (Counter Flow) ที่ทรายแก้วประเภทหยาบจะอยู่ด้านล่าง ทรายแก้วละเอียดจะอยู่ด้านบน ทำให้เกิดการอัดตัวของชั้นทรายได้ง่าย ซึ่งจะทำให้เกิดการอุดตันของน้ำที่ผ่านการกรองได้ง่าย โดยเฉพาะในกรณีที่มีการรวมตัวของสารแขวนลอยในน้ำที่ผ่านการกรองสูง ปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นกับการใช้งานประเภทน้ำไหลสวนทาง ในกรณีที่ใช้กับการใช้งานประเภทน้ำไหลลงทางเดียว หรือ Mixed Bed

3. **การที่มีตะกอนสกปรกหรืออุดตัน** ทำให้ค่าความดันของน้ำในการกรองสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้เป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ชั้นกรองมีสิ่งสกปรกมาปิดกั้นอยู่ ทำให้ผิวหน้าของชั้นกรองมีการอัดตัวแน่นขึ้น ทำให้ความดันของน้ำที่ผ่านชั้นกรองสูงขึ้นมาก ทำให้ปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นกรองลดลง และเกิดการอัดตัวของชั้นกรองมากขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่ทำการล้างย้อน แต่สิ่งสกปรกนี้จะถูกชะล้างออกไปได้ยาก ทำให้ชั้นกรองมีการอัดตัวแน่นขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ความดันของน้ำที่ผ่านชั้นกรองสูงขึ้นมาก ๆ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องคุณภาพน้ำที่ไม่ได้มาตรฐาน

ถ้ามีการอัดตัวของชั้นกรองประจุบวก จะทำให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำได้เช่นกัน โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้งานประเภท Mixed-bed เพราะคุณภาพน้ำที่ได้จะผสมกันไปหมด ทำให้ยากต่อการแก้ไข สารกันตะกรันต่าง ๆ ที่ใช้ก็จะไม่ได้ผลเท่าที่ควร ทำให้เกิดการอุดตันของชั้นกรองได้ง่าย โดยการอุดตันจะเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้นกรอง ทำให้ยากต่อการแก้ไข จะต้องเปลี่ยนชั้นกรองใหม่ทั้งหมด

4. **การที่อุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่นั้นเกิดมีปัญหาหรือชำรุดเสียหาย** ซึ่งจะมีผลต่อการผลิตน้ำที่มีคุณภาพน้ำเสียหายต่อไป

5. **วิธีการใช้งานหรือเดินเครื่อง (Operation) ได้เปลี่ยนแปลงไปจากที่ผู้ผลิตแนะนำไว้** ในการจะเพิ่มความสะดวกหรือด้วยเหตุผลอื่น ๆ เช่น เพิ่มน้ำในการล้างย้อน ลดการสูญเสีย ประหยัดน้ำ ลดค่าใช้จ่าย ทำให้เกิดปัญหาเรื่องคุณภาพน้ำได้ เช่น ใช้ความดันในการล้างย้อนต่ำเกินไป ใช้น้ำที่มีคุณภาพไม่เหมาะสมในการเตรียมน้ำยาฟื้นสภาพการอัดตัวของชั้นกรอง ใช้น้ำยาฟื้นสภาพที่เข้มข้นมากเกินไป และปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างย้อนต่ำกว่าที่ควรเป็นต้น

7.13.3 การอุดตันของสิ่งสกปรกหรือตะกรัน

ปัญหาการอุดตันของสิ่งสกปรกหรือตะกรันในชั้นกรองนั้น ไม่ว่าจะเป็นชั้นกรองที่เป็นทรายแก้วหรือถ่านกรองน้ำก็ตาม ย่อมจะมีผลต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ทั้งสิ้น ซึ่งสาเหตุของปัญหานี้ ได้แก่

1. มีสิ่งสกปรกอยู่ในน้ำที่ผ่านชั้นกรองมาก เนื่องจากชั้นกรองทำหน้าที่กรองน้ำได้ไม่ดี ทำให้มีสิ่งสกปรกต่าง ๆ ปนมากับน้ำที่ผ่านชั้นกรองมาก ๆ ทำให้ชั้นกรองมีการอุดตันได้ง่าย

2. มีตะกรันเกิดขึ้นในชั้นกรองมาก ซึ่งจะทำให้ชั้นกรองมีการอัดตัวแน่นขึ้นได้ง่าย

3. เครื่องปรับคุณภาพน้ำประเภทแลกเปลี่ยนประจุบวกมีสิ่งสกปรกหรือตะกรันอุดตันอยู่ในเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเรซินลดลง หรือทำให้เกิดการอุดตันของชั้นกรองในอุปกรณ์

7.14 การแก้ปัญหาเรซินสกปรกหรืออุดตัน (Fouled Resin)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อเรซินแลกเปลี่ยนไอออนถูกใช้งานไปนานๆ ก็จะทำให้เกิดการสกปรกหรืออุดตันได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ตะกอนแขวนลอย ไขมัน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ แบคทีเรีย เป็นต้น ถ้าเป็นเพราะน้ำมีสิ่งใดสิ่งหนึ่งหรือหลายอย่างดังต่อไปนี้ คือ Polycarboxylic Acid มากที่สุด องค์ประกอบที่สำคัญของกรดนี้ คือ กรด Humic และกรด Fulvic นอกจากนี้ ยังมีกรด Tannic ซึ่งมีต้นกำเนิดจากการสลายตัวของพืช สัตว์ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่ได้ตายไปแล้ว ปัญหาจะเกิดขึ้นได้ง่าย ถ้าเป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคลอรีนและซัลเฟอร์ประกอบ

เมื่อเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในน้ำดิบ ที่ได้ใช้งานไปนานๆ ก็จะทำให้ค่า TOC (Total Organic Carbon) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของอินทรียวัตถุที่มีอยู่ในน้ำดิบ ลดลงเป็นอย่างมาก ในขณะเดียวกันก็จะทำให้ค่าออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (O_2) หรือ Acidified-permanganate Oxygen absorption ซึ่งจะใช้เฉพาะสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (Carbonaceous) เท่านั้น

7.14.1 วิธีตรวจหาค่า O_2

1. ตวงน้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ Flask
2. เติมกรดกำมะถันเจือจาง (9.6 N) 10 มิลลิลิตร และสารละลายโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.125 N) 10 มิลลิลิตร
3. ต้มในน้ำเดือด (Water Bath) เป็นระยะเวลานาน 30 นาที
4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ให้สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ลงในขวดรูปชมพู่ 100 มิลลิลิตร เติมน้ำแป้งลงไป
5. นำขวดรูปชมพู่ไปต้มในน้ำร้อนนาน 30 นาที ทำ 4 เติมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (0.025 N)
6. ในขณะที่ยังร้อนอยู่ทำการละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตต่อไปจนกระทั่งสีของน้ำตัวอย่างจางลงจนไม่มีสีของน้ำแป้งเหลืออยู่

$$\text{ค่าที่เป็นออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์} = \frac{\text{มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต} \times 8}{\text{มิลลิลิตรของน้ำตัวอย่าง}} \times 100$$

7.14.2 วิธีการแก้ไขปัญหาเมื่อเรซินสกปรกหรืออุดตัน

1. โดยทำ Prechlorination เนื่องจากสารจำพวกคลอรีนสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำได้ คลอรีนที่นิยมใช้กันจะใช้ในรูปของการไฮโปรคลอรัส ซึ่งจะมาจากไฮโปคลอไรต์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการคลอรีนจะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

$$C + 2Cl_2 + 2H_2O \rightarrow 4HCl + CO_2$$

ปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นได้ดังสมการข้างล่างนี้ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีคลอรีนอิสระเหลืออยู่ในน้ำ และมีปริมาณมากพอ ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ต่อไปจนได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรค และสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนแล้วจะถูกปล่อยออกมาอยู่ในรูปของสารประกอบคลอรีนอินทรีย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดคลอรีนที่ตกค้างอยู่ให้หมดก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปนิยมใช้ โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3)

$$Na_2SO_3 + Cl_2 + H_2O \longrightarrow Na_2SO_4 + 2HCl$$

ในการปฏิบัตินิยมใช้โซเดียมซัลไฟต์ 1.8 กรัม ต่อการขจัดคลอรีน 1 มก. โดยปกติแล้วในน้ำดิบจะมีความกระด้างอยู่ด้วย ดังนั้น การใช้โซเดียมซัลไฟต์จำนวนเล็กน้อยจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องความกระด้างมากนัก

2. **การล้างเรซิน (Cleaning Fouled Ion Exchange Resin)** การล้างเรซินที่ใช้งานแล้วนั้น จำเป็นต้องมีการวางแผนและเตรียมการเป็นอย่างดี ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดความเสียหายต่อเรซินและเพื่อให้ได้ผลการล้างที่ดีที่สุด ดังนั้นก่อนที่จะทำการล้างเรซินจริงๆ ควรจะได้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของน้ำดิบและปริมาณความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำดิบ

(1) วิธีการทดสอบการล้างเรซินประจุบวกในห้องปฏิบัติการ เมื่อเรซินประจุบวกที่ใช้งานแล้วมีสารแขวนลอย เช่น พวกจุลชีพ ตะกอนดิน หรือตะกอนอื่นๆ ในน้ำดิบ ซึ่งจะถูกจับเรซินกรองไว้และสะสมอยู่ในชั้นของเรซิน นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น เคลือบ อะมิโน และแคลเซียมซัลเฟต ก็มีแนวโน้มที่จะตกตะกอนในชั้นเรซินได้ ทำให้ประสิทธิภาพของเรซินลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการล้างเรซินเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกเหล่านี้ออกไป ก่อนที่ประสิทธิภาพของเรซินจะลดลงมากเกินไป ซึ่งจะสังเกตได้จากคุณภาพน้ำที่ผ่านเรซินประจุบวกแล้วมีความกระด้างเพิ่มขึ้น หรือมีค่าความเป็นด่างลดลง ซึ่งจะสังเกตได้จากการเติมกรดลงไปแล้วปรับให้ได้ pH ต่ำกว่า 4.5 แล้วเติมสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ลงไปจนกระทั่งได้ pH 4.5 ซึ่งจะเป็นจุดยุติของการไทเทรต ปริมาณกรดที่ใช้ไปนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นด่างของน้ำดิบ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับปริมาณความกระด้างของน้ำดิบด้วย ดังนั้นเมื่อเรซินประจุบวกมีประสิทธิภาพลดลงไปมาก จนสังเกตได้จากคุณภาพน้ำที่ผ่านเรซินประจุบวกแล้วมีค่าความกระด้างเพิ่มขึ้นหรือมีค่าความเป็นด่างลดลงมากๆ ก็จำเป็นต้องทำการล้างเรซินประจุบวกนั้นเสียใหม่ เพราะเรซินชนิดนี้ไม่สามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพกลับคืนมาได้ด้วยการล้างน้ำธรรมดา แต่จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่เหมาะสมในการล้างเรซินประจุบวกเท่านั้น ซึ่งได้แก่ กรดเกลือ และกรดซัลฟิวริก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำดิบที่ผ่านเรซินประจุบวกเป็นหลัก ถ้าน้ำดิบมีความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียมไบคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ ก็ควรใช้กรดเกลือในการล้างเรซิน แต่ถ้าน้ำดิบมีความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมซัลเฟตเป็นส่วนใหญ่ ก็ควรใช้กรดซัลฟิวริกในการล้างเรซิน นอกจากนี้ ในบางครั้งพบว่าแคลเซียมซัลเฟตก็สามารถตกตะกอนอยู่ในเรซินได้เช่นกัน แต่โดยปกติแล้วจะตกตะกอนอยู่ภายในส่วนของเม็ดเรซินมากกว่า ดังนั้นเมื่อเรซินไปถึงจุดที่ต้องล้างแล้ว จะพบว่าเม็ดเรซินจะมีลักษณะผิวเปลือกเรซินไว้ วิธีการนั้นมีขั้นตอนดังนี้ คือ (ดูการควบคุมน้ำจำนวนหนึ่งตามมาตรฐาน 2555) และใช้ความเข้มข้นของกรดที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินที่ใช้ ซึ่งอาจมีได้โดยการล้างดังนี้

มีวิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการขจัดด่างการกวนและปรับค่าดังนี้ ให้ตวงแบ่งขนาดเม็ดเรซินตามปริมาตร 1-5 เซนติเมตร และยาว 50-100 เซนติเมตร ซึ่งความยาวขนาดเม็ดเรซินนี้จะเพียงพอที่จะให้กระทำให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างสมบูรณ์ ให้เติมน้ำลงในปริมาณ 10-15 เท่า แล้วทิ้งให้เรซินพองตัว ดูว่าน้ำที่อยู่เหนือชั้นเรซินขุ่นหรือไม่ ถ้าความขุ่นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการกวนนี้มากเกินไป ก็ควรจะต้องล้างเรซินด้วยน้ำ เพื่อให้ความขุ่นที่เกิดขึ้นลดลงเสียก่อน ก่อนที่จะทำการล้างเรซินด้วยกรดต่อไป

หลังจากใช้งานมาช่วงเวลาหนึ่งแล้ว เรซินจำเป็นต้องมีการฟื้นฟูสภาพหรือรีเจนเนอเรชัน เพราะ
เกิดการจับเอาประจุบวกที่เป็นเกลือของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ไว้ใช้วิธีแช่เรซินไว้ในกรดเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อ
หาความเข้มข้นของกรดและระยะเวลาที่ดีที่สุดในการฟื้นสภาพเรซิน

วิธีการ ให้เตรียมบีกเกอร์หรือกระบอกตวง ๔ ชุด แต่ละชุดบรรจุเรซินจำนวน ๒๕ มิลลิลิตร และน้ำที่
ขังอยู่ในระหว่างเม็ดเรซินออกให้หมด เติมกรดเกลือเจือจาง ๒๕ มิลลิลิตร ทาบแล้วเขย่าเบา ๆ แล้ว
ทิ้งไว้ระยะหนึ่ง คอยสังเกตดูลักษณะของเม็ดเรซินทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกรดหมดจึงนำ
เรซินไปทดสอบเพื่อที่จะเลือกใช้ว่าควรใช้กรดเข้มข้นและระยะเวลานานเท่าไรจึงจะได้ผลดีที่สุด ใช้กรดความเข้มข้นต่าง
ๆ กันดังนี้ คือ ๒%, ๕%, ๑๐%, ๒๐%, และ ๒๕ - ๓๐% โดยเลือกความเข้มข้นของกรดในการล้างเรซินนั้น
ต้องเลือกกรดที่มีความเข้มข้นต่ำที่สุดที่จะใช้ล้างอย่างได้ผลและใช้ระยะเวลาที่น้อยที่สุด ๑ - ๒ ชั่วโมง
หรือ ๑ วัน ในการล้างเรซินต้องระวังไม่ให้กรดตกค้างเมื่อล้างออกหมดแล้ว

(๑) วิธีการทดสอบการล้างเรซินประจุลบในห้องปฏิบัติการ ถ้าแยกจากการล้างเรซินประจุบวก
ต้องมีอุปกรณ์ที่ไม่มีสนิมเหล็กเจือปน ให้ดำเนินการเช่นนี้ด้วยวิธีการเดียวกัน ถ้าเรซิน
มีสารเจือปนประจุบวกดังกล่าวแล้ว

ถ้าเรซินมีเหล็กและอินทรีย์สารที่เกาะอยู่นั้นปนอยู่ด้วย ให้ตรวจสอบว่ามีเหล็กอยู่ในเนื้อเรซินหรือไม่
จึงเป็นสาเหตุที่จะต้องล้างเหล็ก ซึ่งควรทำก่อน เพื่อจะได้ล้างได้ง่ายต่อการล้างเรซินด้วยกรด
เพื่อขจัดเหล็กก่อนหรือไม่ก่อนที่จะทำการขจัดสารอินทรีย์

วิธีการตรวจว่ามีเหล็กหรือไม่ ให้ใช้หลอดทดลอง (Test Tube) บรรจุเรซินประมาณ ๑๐ มิลลิลิตร
และเติมกรดเกลือ (HCl A.R. หรือใกล้เคียง) และเขย่าประมาณ ๓ - ๕ นาที หลังจากนั้นทิ้งสารละลายไว้
ในหลอดหรือขวดแก้วใสแล้วเติม ๑๐% ลงไปอีก ๔ - ๕ หยด ถ้ามีเหล็กอยู่จะเกิดสีน้ำเงินของ
Ferro Cyanate ขึ้น แสดงว่าเรซินต้องนำไปทดสอบหรือล้างเหล็กก่อนได้ แต่ถ้า
พบว่าไม่มีเหล็กหรือมีน้อยมาก ก็ขจัดสารอินทรีย์ตามวิธีการดังกล่าวนี้

(ก) การขจัดเหล็ก ใช้หลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๒๐ มิลลิเมตร ยาว ๕๐ มิลลิลิตร
บรรจุเรซิน ๒๐ มิลลิลิตร เติมกรดเกลือเข้มข้น ๑๐% ซึ่งควรมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของเรซิน
(Bed Volume) ของการฟื้นฟูเพื่อให้ท่วมสูงของชั้นเรซิน ซึ่งต้องเติมทีละน้อย และปล่อยทิ้งไว้
๓๐-๔๐ นาที แช่เรซินไว้ในกรดนาน ๑ ชั่วโมง ถ้ายังไม่หมดก็ล้างเรซินด้วยน้ำกลั่นที่มีปริมาตร ๔ เท่า
ของปริมาตรเรซิน น้ำที่ใช้ต้องเป็นน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากเหล็ก และมีอัตราการไหลประมาณ ๑๒ Bed
Volume ต่อนาที นำเรซินมาตรวจหาเหล็ก ถ้าพบว่ายังมีเหล็กอยู่ให้ทำการล้างด้วยกรดอีกครั้งหรือมี
น้อยมาก หลังจากนั้นนำเรซินไปล้างเพื่อขจัดสารอินทรีย์ต่อไป

(ข) การขจัดสารอินทรีย์ ใช้หลอดแก้วเดิมที่บรรจุเรซินที่ล้างเหล็กแล้ว เติมสารละลายที่
มีน้ำเกลือ (NaCl) เข้มข้น ๑๐% ผสมกับโซดาไฟ (NaOH) เข้มข้น ๒% ลงไปในชั้นเรซินด้วยอัตราไหล
๑ Bed Volume ต่อ ๑๕ นาที จะเห็นว่าเม็ดเรซินจะปล่อยสีเหลืองหรือสีน้ำตาลออกมา เมื่อน้ำเกลือที่มีสีจางลง
เป็นสีน้ำตาลอ่อน ให้น้ำเกลือไหลผ่านไปจนกระทั่งสีที่ออกมาเป็นสีเหลืองอ่อนหรือใส ให้หยุดเติมน้ำเกลือ
ส่วนที่ใช้ไปจนกระทั่งถึงจุดนี้

วิธีการที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่างและวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ ตัวอย่างวิธีการที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีดังนี้

(1) การระเหยแห้งด้วยลม จากการทดลองในห้องปฏิบัติการจะเห็นว่าน้ำที่ใช้ล้างไม่ได้ระเหยหายไปในชั่วพริบตา และในอุปกรณ์นั้นมีไม่มีห้องปฏิบัติการที่สามารถ ที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการ ผ่านศูนย์กลางในแต่ 2 มิลลิเมตร ใช้ได้ห้องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในต่ำ ๆ เช่น ขนาดเล็ก ต้องการเพียงแค่ ปล่อยให้น้ำระเหยไปเองในที่ร่ม ๆ ในขณะที่ยังมีน้ำอยู่ในหลอด ปล่อยให้น้ำระเหยไปเองในที่ร่ม ๆ ในขณะที่ยังมีน้ำอยู่ในหลอด ก่อนจะเริ่มต้น ให้น้ำเข้าไปในหลอดจนเต็ม ประมาณ 20 มิลลิลิตร เพื่อให้ระดับน้ำในหลอดสูงกว่าระดับน้ำในภาชนะ ประมาณ 1 cm ซึ่งจะมีน้ำจากภายนอกไหลเข้าสู่หลอดได้ เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนที่ก้นหลอดฟุ้งขึ้นมา ในขณะที่ดูดน้ำออก ควรดูดน้ำออกจากผิวหน้าของน้ำในหลอดเท่านั้น ไม่ควรดูดน้ำลึกลงไปจนถึงตะกอนที่ก้นหลอด เพราะจะทำให้ตะกอนฟุ้งขึ้นมาได้ ปล่อยให้น้ำระเหยไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำในหลอดแห้งสนิท ตะกอนที่เหลืออยู่ก้นหลอดจะมีลักษณะเป็นผงแห้ง ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 1-2 วัน ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและสภาพแวดล้อม

(2) การล้างด้วยกรด วิธีการนี้ใช้สำหรับตัวอย่างที่มีสารประกอบคาร์บอเนต เช่น หินปูน ดินที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการล้างด้วยกรด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งจะใช้ในความเข้มข้นต่ำ ๆ เช่น 0.1-1 โมลาร์ (M) ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง ผู้ใช้ต้องสวมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล เช่น ถุงมือยาง แว่นตานิรภัย และเสื้อกาวน์ ก่อนการใช้งาน ต้องตรวจสอบความเข้มข้นของกรดที่ใช้ ควรใช้กรดที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ เช่น 0.1 M หรือ 1 M ก่อน เพื่อป้องกันการทำลายตัวอย่างที่มากเกินไป ค่อย ๆ เติมกรดลงในตัวอย่างทีละน้อย ๆ ไม่ควรเติมกรดทีเดียวในปริมาณมาก เพราะอาจทำให้เกิดฟองแก๊สจำนวนมาก ซึ่งอาจทำให้ตัวอย่างกระเด็นออกมาได้ ควรเติมกรดลงในตัวอย่างทีละน้อย ๆ และรอให้ฟองแก๊สหยุดก่อนเติมครั้งต่อไป ตัวอย่างที่ผ่านการล้างด้วยกรดแล้ว ควรล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง เพื่อกำจัดกรดที่เหลืออยู่ ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-เบสเป็นกลาง (pH 7) ตัวอย่างที่ผ่านการล้างด้วยกรดแล้ว ควรนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ๆ เช่น 40-60 °C เพื่อป้องกันการสูญเสียสารประกอบอินทรีย์

(๑) [illegible]

(๑๐) [illegible]

วิธีการที่ใช้ในการฟื้นฟูประสิทธิภาพของเชื้อ [illegible] ให้กลับมามีชีวิตและมีความแข็งแรงเหมือนเดิม ซึ่งการล้างนี้จะต้องใช้น้ำที่มีอุณหภูมิเหมาะสม จึงจะทำให้เชื้อมีการเจริญเติบโตและแพร่กระจายได้ดี ในการล้างด้วยน้ำเย็นจัดจะทำให้เกิดการช็อค (Dehydration) จนทำให้เชื้อตายหรือเจริญเติบโตได้ช้าลง ที่อุณหภูมิประมาณ ๔๐ องศาเซลเซียส เชื้อจะเจริญเติบโตได้ดีที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ เชื้อจะตายหมด ในการล้างด้วยกรดเกลือ ความเข้มข้นประมาณ ๑ ๐๐๐ ppm ในเวลาประมาณ ๑๐ นาที จะทำให้เชื้อตายหมด แต่ไม่ทำให้เส้นใยเสียหาย ส่วนการล้างด้วยด่างทับทิม ๑๐๐ ppm ก็สามารถฆ่าเชื้อได้ดีเช่นกัน แต่ทั้งสองวิธีนี้ไม่นิยมใช้ในการล้างเชื้อ WB แต่จะล้างด้วยกรดเกลือหรือด่างทับทิมก่อนการใช้งานเล็กน้อย แต่ยังไม่ค่อยมีผู้ประดิษฐ์ค้นคว้าอย่างจริงจังนัก ทั้งนี้ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าเป็นเพราะเหตุใด

หลังจากที่ได้ล้างเชื้อเห็ดเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการคัดเลือกก้อนเชื้อที่ใช้ได้ในการเพาะเห็ดเท่านั้น ก้อนเชื้อที่ใช้ไม่ได้ก็ต้องทำลายทิ้งไป ส่วนก้อนเชื้อที่ใช้ได้ก็นำไปเข้าสู่กระบวนการฟื้นฟูประสิทธิภาพต่อไป ซึ่งมีวิธีการดังนี้

เชื้อบริสุทธิ์ในหลอดทดลอง	- ล้างด้วยน้ำประปา ผสมสารละลายฟอกขาวเข้มข้น ๑๐๐ ppm ในอัตราส่วน ๑:๑
เชื้อเกรด SB หรือ WB	ใช้ด่างทับทิมเข้มข้น ๑๐๐ ppm ล้างเช่นเดียวกับเชื้อบริสุทธิ์ในหลอดทดลอง
เชื้อประดิษฐ์ในเครื่องหมักก้อนเชื้อ	ใช้กรดเกลือ ๑๐๐ ppm ล้างก้อนเชื้อ ๑ ครั้ง ก่อนที่จะนำไปใช้งาน ๑ ชั่วโมง

(๑) *การล้างด้วยน้ำผสมสารฟอกขาว* ในการล้างเชื้อในน้ำยาฟอกขาวที่มีความเข้มข้นต่างกันนั้น ควรจะล้างในอ่างล้างจาน (Basin) โดยใช้น้ำยาฟอกขาวในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ข้างต้น เช่น ๑ ลิตร ต่อน้ำ ๑๐๐ กรัม และโซดาไฟ ๒๐ กรัม ที่ปริมาตรสุดท้าย ๑ ลิตร หรืออัตราส่วนอื่นๆ ก็ได้ แล้วเติมน้ำยาฟอกขาวที่เจือจางแล้วนี้ลงในน้ำเกลือที่เตรียมขึ้นในข้อ ๑ ประมาณ ๑๐๐ ลิตร โดยมีโซดาไฟอยู่ ๑๐๐ กรัม ทิ้งไว้ประมาณ ๑๐ นาที เพื่อให้ด่างช่วยเพิ่มความเข้มข้นและดูดซับสารพิษที่ตกค้างอยู่ในเชื้อ ซึ่งจะได้น้ำเกลือที่มีค่าพีเอช ๑๐ และโซดาไฟ ๑๐๐ กรัมต่อลิตร ถ้าผลการวัดค่าในขั้นตอนนี้ยังไม่ได้ตามที่กำหนดไว้ ให้เติมโซดาไฟลงไปอีก ๑๐ กรัม ต่อน้ำ ๑๐๐ ลิตร ก่อนที่จะนำเชื้อลงแช่ในน้ำเกลือ ส่วนน้ำเกลือที่ใช้แล้วนี้ต้องนำไปบำบัดก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ๒ ครั้งด้วย ให้เชื้อแช่อยู่ในน้ำเกลือดังกล่าวประมาณ ๑๐ นาที ขณะที่เชื้อแช่น้ำอยู่นั้นต้องคอยกลับเชื้อให้ทั่วถึงกันด้วย ข้อควรระวังประการหนึ่งอยู่ตรงที่ว่า ห้ามแช่เชื้อนานเกินกว่าที่กำหนดไว้ เพราะจะทำให้เชื้อตายหมดได้ และที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ ห้ามใช้น้ำเกลือด่างที่ใช้แล้วมาใช้ซ้ำอีกเป็นอันขาด เพราะจะทำให้เชื้อตายหมดเช่นกัน

หลังจากแช่เชื้อในน้ำเกลือด่างได้ตามเวลาที่กำหนดแล้ว ให้ยกเชื้อขึ้นจากน้ำเกลือด่างแล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง ในการล้างครั้งนี้ต้องล้างให้สะอาดจริงๆ เพื่อกำจัดสารพิษที่ตกค้างอยู่ในเชื้อให้หมดไป ซึ่งการล้างนี้จะต้องใช้น้ำในปริมาณมากพอสมควร ในขณะที่ล้างเชื้อนั้นจะต้องคอยกลับเชื้อให้ทั่วถึงกันด้วย ในการล้างเชื้อแต่ละครั้งนั้นจะต้องใช้น้ำประมาณ ๒ เท่าของน้ำหนักเชื้อ ในการล้างเชื้อแต่ละครั้งนั้นจะต้องใช้เวลาประมาณ ๑๐ นาที

(ก) เหล็กในสภาพที่เป็นสารแขวนลอย เนื่องจากเหล็กไม่ละลายน้ำและถูกชั้นเรซินกรองไว้และดักจับอยู่ที่ผิวหน้า

(ข) เหล็กที่ละลายน้ำซึ่งจะถูกกระบวนการไอออนเอกซ์เชนจ์ เปลี่ยนเป็นเฟอริกไอออนที่จะจับอยู่ที่ชั้นเรซิน

(ค) เหล็กที่ละลายในน้ำและถูกแยกออกจากชั้นเรซินแล้ว หลังจากนั้นจึงถูกออกซิไดซ์เป็นเฟอริกไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะไปเคลือบผิวเรซินไว้ ทำให้ประสิทธิภาพในการจับตัวลดลง การแก้ไขปัญหานี้ต้องใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing Agent) ในการล้าง ส่วนกรณี (ค) นั้น ในระยะแรกเหล็กจะอยู่ในสภาพของเฟอร์รัสที่ละลายน้ำ และผิวเรซินดูดซับไว้ หลังจากนั้นเหล็กส่วนหนึ่งจะถูกออกซิไดซ์เป็นรูปเฟอริกไฮดรอกไซด์จนตกตะกอนอยู่ในน้ำ ซึ่งจะไปเคลือบผิวเรซินที่ไม่ละลายน้ำ ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อเรื่องเหล็กในรูปของเม็ดเรซิน ซึ่งจะมีผลให้ประสิทธิภาพในการจับตัวของไอออนลดลงเช่นกัน วิธีการแก้ไขปัญหานี้คือ ใช้กรดเกลือล้าง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

สารเคมีที่นิยมใช้ในการล้างเรซินที่เกิดปัญหาเรื่องเหล็กจากข้อ (ข) คือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (Sodium Hydrosulfite - $Na_2S_2O_4$) ซึ่งจะรีดิวซ์เหล็กที่อยู่ในสภาพเฟอริกเป็นเฟอร์รัสที่ละลายน้ำได้ดี เหล็กไอรุปเฟอร์รัสนี้จะถูกชะล้างออกจากชั้นเรซินได้ง่าย โดยการล้างกลับหรือในระหว่างการล้างฟื้นฟูประสิทธิภาพ

วิธีการล้าง

1. ไล่ของเหลวในชั้นกรองให้ลดระดับลงจนกระทั่งระดับน้ำที่อยู่เหนือชั้นเรซินทำหน้าที่เป็นช่องว่าง (Void Volume) ของชั้นเรซินปกติ ซึ่งมักไม่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของความสูงชั้นเรซิน ทั้งนี้เพื่อให้มีช่องว่างพอที่จะให้เรซินคลายตัวได้ในขั้นตอนต่อไป ซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งของปริมาตรชั้นเรซินโดยประมาณ

2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อนำไปเติมลงในถังที่เตรียมน้ำล้างแล้วจะมีความเข้มข้นประมาณ 0.5 นอร์มอล (โดยการเตรียมต้องระมัดระวังเพราะสารนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ง่าย ในขณะที่เตรียมต้องระบายความร้อนออกด้วย และควรอยู่ในที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก เนื่องจากโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ เมื่อละลายน้ำจะปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเมื่อเตรียมแล้วต้องนำไปใช้ทันที ห้ามเก็บทิ้งไว้นานจะเสื่อมประสิทธิภาพอย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงควรเตรียมในปริมาณเท่าที่ต้องการใช้เท่านั้น

3. เติมสารละลายเข้มข้นที่เตรียมลงในชั้นเรซิน

4. ล้างน้ำออกทางด้านบนจนกระทั่งปริมาตรน้ำที่ล้างออกมานั้นทำหน้าที่เป็นช่องว่างตามปริมาตรข้อ 1 หนึ่งของปริมาตรชั้นเรซิน

5. ใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ล้างออกมาแล้ว ทำให้ทราบว่าเหล็กที่ถูกออกซิไดซ์โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ได้

6. แช่เรซินไว้ในสารละลาย 10 ชั่วโมง ถ้าไม่มีเวลาอาจลดลงได้แต่ต้องไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง

7. ถ่ายน้ำและสารละลายทิ้งให้หมด ใช้น้ำล้างไล่ด้วย หลังจากนั้นทำการล้างแล้วเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อล้างไล่ซึ่งสกปรกที่หลุดและออกมา

8. ทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพและนำไปใช้งานต่อไป

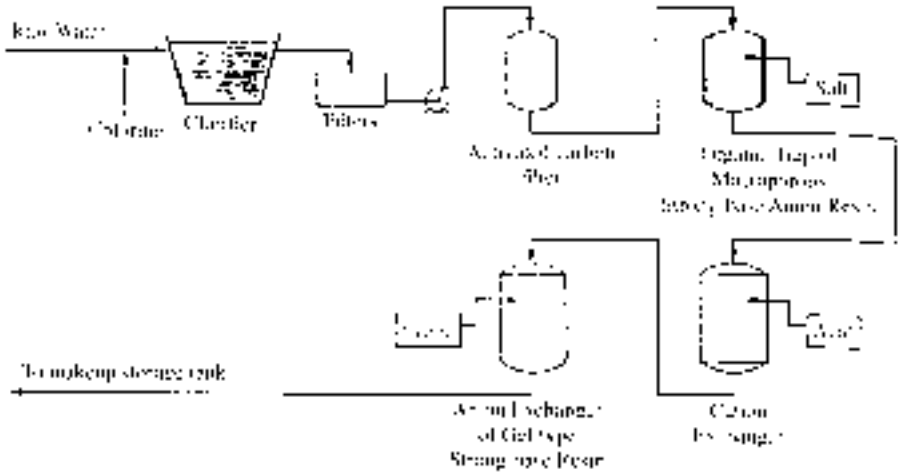
[illegible] ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกรัน [illegible] ($Na_5P_3O_{10}$) [illegible]

[illegible] ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกรันได้ดีกว่าโพลีฟอสเฟตชนิดอื่น [illegible] ทนต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ [illegible] ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี

ถ้าหากไม่ต้องการสูตรสำเร็จเพื่อกำจัดตะกรันในระบบหล่อเย็น [illegible] (Preventive Maintenance) โดยการใช้เกลือโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium Tripolyphosphate) ผสมกับน้ำก่อนป้อนเข้าสู่ระบบหล่อเย็น [illegible] ผสมกับน้ำก่อนป้อนเข้าสู่ระบบหล่อเย็นได้ [illegible] ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกรัน

รูปที่ 7.24 (ซ้าย) เม็ดเรซินที่อุดตัน (ขวา) เม็ดเรซินโซเดียมไอโอไนซ์ไนซ์

3. **เลือกใช้เรซินชนิดพิเศษ** เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีโครงสร้างเป็นร่างแห [illegible] เรซินชนิดนี้ [illegible] Macroporous หรือ Macroreticular [illegible] เรซินแลกเปลี่ยนไอออน [illegible]

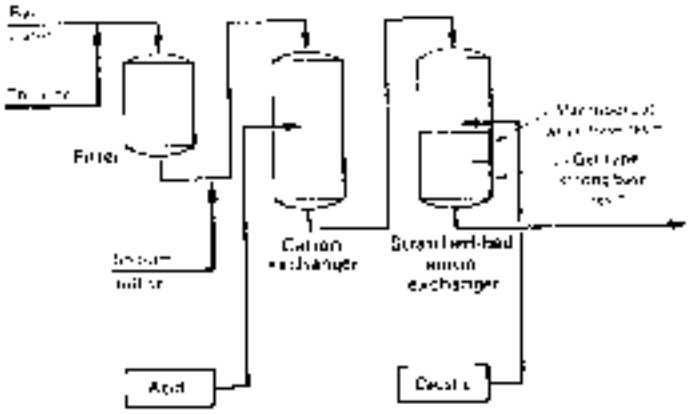


รูปที่ 7.25 ตัวอย่างการใช้เรซินพิเศษร่วมกับตัวกรองอินทรีย์

ตารางที่ 7.7 อัตราไหลสูงสุดของกับสารสีอินทรีย์

อัตราไหล	สารสีอินทรีย์ (O_2 พีพีเอ็ม

รซินที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ได้ดีกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์หรือรซินแต่เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากรซินจะมีคุณสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กได้ดี ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จะมีคุณสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ได้ดี ดังนั้นการใช้รซินที่ผสมกับถ่านกัมมันต์จึงสามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ทั้งที่มีขนาดโมเลกุลเล็กและใหญ่ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ดีขึ้นกว่าการใช้รซินหรือถ่านกัมมันต์แต่เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง ตัวอย่างของรซินที่ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น ไฮมิกแอซิด ฟัลวิกแอซิด เป็นต้น ส่วนรซินที่ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก เช่น ไตรฮาโลมีเทน เป็นต้น



รูปที่ 7.24 การใช้เรซินพิเศษกรองอยู่เหนือชั้นเรซินประจุบวกในหอเดียวกันโดยไม่ปนกัน

7.15 การเก็บรักษาเรซิน (Resins Storage)

เพื่อให้เรซินที่ใช้งานแล้วยังคงมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีเช่นเดิม ก่อนที่จะนำไปใช้งานครั้งต่อไปควรมีการปฏิบัติดังนี้

1. **การเก็บเรซินในคลัง** โดยทั่วไปการเก็บรักษาเรซินที่ยังไม่ได้ใช้งานนั้นจะเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันการสัมผัสกับอากาศ ซึ่งจะทำให้เรซินเสื่อมคุณภาพได้ง่าย ดังนั้นถังหรือภาชนะที่ใช้ในการเก็บรักษาเรซินจึงควรมีฝาปิดสนิทและมีวาล์วสำหรับระบายอากาศที่ติดอยู่ด้วย

วยแบ่ง ทิ้งระยะห่างระหว่างแผ่นกรองให้มีช่องว่างสำหรับการล้างย้อนกลับ ส่วนที่ใช้ในการล้างย้อนกลับนี้ ในกรณีที่มีอุปกรณ์ก่อนหน้าสูง เช่น ถังกรองทรายแรงดัน ในกรณีของโรงงานขนาดเล็ก

2. **เทียบรักษาเมื่อหยุดใช้งาน** ในกรณีที่อุปกรณ์หรือโรงงานต้องหยุดทำงานชั่วคราว ควรจะระมัดระวังสำหรับการเกิดสนิมขึ้นในส่วนที่เป็นโลหะ

เรซินแบบอุบวก ที่สกปรกได้จากน้ำให้ล้างกลับทันที ในระหว่างที่เรซินจะมีการแตกต่างกันในเรื่องของการล้างกลับ หรือการหลังจากล้างที่ผู้ประกอบการแนะนำ ต้องล้างกลับด้วยน้ำอ่อนๆ ให้มีน้ำอยู่เหนือพื้นเรซินอยู่ ต้องระวังอย่าให้น้ำไหลลงมาจนกระทั่งแห้งได้

เรซินแบบอุบวก ในน้ำในขณะที่หยุดนั้นเรซินจะอยู่ในสภาพอย่างไร (ใช้งานต่อเนื่องได้ล้างหรือล้างกลับ) ให้ล้างเรซินกลับด้วยน้ำ แล้วแช่ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) ที่มีความเข้มข้น 10 ถึง 15% ในน้ำ ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดจุลินทรีย์ในเรซินได้ ในกรณีที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน ควรจะทำการฆ่าเชื้อโรคในเรซินก่อนที่จะนำไปใช้งาน โดยการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (น้ำยาซักผ้าขาว) ที่มีความเข้มข้นของคลอรีนอิสระประมาณ 500 ppm เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำมาใช้งาน ในกรณีที่เรซินมีการปนเปื้อนของเหล็กหรือแมงกานีส ควรจะทำการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (กรดเกลือ) ที่มีความเข้มข้นประมาณ 5% เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำมาใช้งาน

ในกรณีที่จำเป็นต้องเก็บรักษาเรซินไว้เป็นเวลานานๆ ควรจะเก็บในสภาพที่เปียกน้ำ ที่อุณหภูมิประมาณ 4 ถึง 40°C ในที่มืด

ให้ใช้สารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นประมาณ 15 ถึง 20% เป็นตัวทำละลาย ในการล้างเรซินที่ใช้แล้วให้ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นประมาณ 10% ถึง 15% ในการล้างย้อนกลับ โดยการผ่านสารละลายนี้ขึ้นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของน้ำ การฟื้นสภาพเรซินแต่ละครั้งจะใช้เวลาประมาณ 30 ถึง 60 นาที ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินและความสกปรกที่เกาะอยู่ ในการฟื้นสภาพเรซินที่ใช้แล้วนี้ จะมีน้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณมาก ซึ่งจะต้องมีการจัดการที่เหมาะสมก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงสู่ธรรมชาติ

7.16 การล้างเรซินเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ส่วนใหญ่จะเป็นระบบปิด ซึ่งจะมีการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง แต่ในบางครั้งเรซินก็จะมีการเสื่อมสภาพลงไปได้ เช่น การแตกหักของเม็ดเรซิน การสูญเสียหมู่ฟังก์ชันไป หรือการปนเปื้อนของสารต่างๆ ที่ไม่สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีการล้างย้อนกลับ ซึ่งสารที่ทำให้เรซินเสื่อมสภาพได้ง่ายที่สุดก็คือ คลอรีนอิสระ ซึ่งจะทำลายโครงสร้างของเรซินแบบโพลีสไตรีน (Polystyrene) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงไปอย่างรวดเร็ว ในกรณีของเรซินแบบอ่อนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ซึ่งจะมีความไวต่อการเสื่อมสภาพจากคลอรีนน้อยกว่า ในกรณีของเรซินแบบเบสแก่ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นเอมีนควอเทอร์นารี (Quaternary amine) ซึ่งจะมีความไวต่อการเสื่อมสภาพจากคลอรีนน้อยกว่าเรซินแบบเบสอ่อนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นเอมีนปฐมภูมิ (Primary amine) ในการเลือกใช้งานเรซินนั้นจะต้องมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมของชนิดของเรซินกับการใช้งานด้วย ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ จะต้องใช้เรซินที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ เป็นต้น

ในกรณีที่จำเป็นต้องมีการล้างเรซินเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ขั้นตอนการล้างเรซินที่ใช้แล้วนี้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดนั้น ควรจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ดังนี้

1. ล้างย้อนกลับด้วยน้ำ เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่ในเรซิน
2. ล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (กรดเกลือ) ที่มีความเข้มข้นประมาณ 5% ในอัตราการไหลประมาณ 2 ถึง 4 ลิตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตของเรซิน เป็นเวลาประมาณ 30 ถึง 60 นาที
3. ล้างด้วยน้ำ เพื่อกำจัดกรดที่เหลืออยู่ออกไป
4. ล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) ที่มีความเข้มข้นประมาณ 4% ในอัตราการไหลประมาณ 2 ลิตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตของเรซิน เป็นเวลาประมาณ 30 ถึง 60 นาที
5. ล้างด้วยน้ำ เพื่อกำจัดด่างที่เหลืออยู่ออกไป
6. ล้างด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) ที่มีความเข้มข้นประมาณ 10% ในอัตราการไหลประมาณ 2 ลิตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตของเรซิน เป็นเวลาประมาณ 30 ถึง 60 นาที
7. ล้างด้วยน้ำ เพื่อกำจัดเกลือที่เหลืออยู่ออกไป

...ล้างเสร็จ ปิดน้ำ และปิดวาล์วน้ำเข้าเครื่องล้างอุปกรณ์ ...

วิธีล้าง

1. ...

2. ...

3. ...

4. ...

5. ...

6. ...

บรรณานุกรม

1. ผศ.ดร. วรวุฒิ วัฒนวัฒก์. **คู่มือการวิเคราะห์น้ำหม้อ**, ตำราภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, 2529.
2. Arden, T.V. "Ultra-Pure Water for High-Pressure Boilers." **E & WT J.** (January 1958)
3. Arden T.V. **Water Purification by Ion Exchange**. London : Butterworth and Co., 1958.
4. Belan, P.Z. **Water Treatment**. Moscow : Mir Publishers. 1981.
5. **BETZ Handbook of Industrial Water Conditioning**. Betz Laboratories. 1980
6. Calmon, C. "Explosion Hazards of Using Nitric Acid in Ion Exchange Equipment." **Chemical Engineering**, (November 17, 1980)
7. Carr, R.E. and Webb, L.C. "Comparison of Six Bed and Three-Bed Demineralization Systems." **Combustion** (August 1969).
8. Dearie, W.M. "Counter Current Regeneration." **Effluent and Water Treatment J.** (October 1980).
9. **DIAION Manual of Ion Exchange Resins**. Volume I & 2 (Revised Edition). Mitsubishi Chemical Industries. 1979
10. Dorfner, K. **Ion Exchangers-Properties and Applications**. Michigan : Ann Arbor Science Publishers, 1975
11. Emmett, J.R. and Granger, P.M. "Ion Exchange Mechanism in Condensate Polishing." **Combustion** (August 1960).
12. Fritchie, R.G. **Water Supply and Treatment**. Atlanta : State-of-the-Art. TAPPI PRESS. 1978
13. Grantham, J.G. **Ion Exchange in Water Treatment**. England : Dia-Prosim. 1970.
14. Kemmer, F.N. **The NALCO Water Handbook**. New York : Mc Graw Hill Book Co., 1979.
15. Knowles, G. and Tittle, K. "The Removal of Organic Matter from Demineralised Water." **E & WT J.** (July 1969).
16. Kohlvick and Siegmund, J.W. "Feedwater Polishing Effective in Reducing Boiler Maintenance Costs." **Pulp & Paper** (June 1980).
17. Lefevre, L.J. "Guidelines for Use of Weak Base Anion Resin in Water Demineralization." **Combustion** (December 1979).
18. Mansfield, G.H. "Salient Features in Deciding the Best Design of Demineralisation Plant." **E & WT J.** (September 1970).

19. McWilliam, J.D. "Processing Demineralizers from Organic Fouling." **Chemical Engineering** (May 22, 1978).

20. Mills, G.R. and Bolton, H.E. "Design and Operation of Condensate Polishing at CEGB Fawley." **E & WT J.** (February 1969).

21. Mottershead, T. "High-purity Water for Semiconductor Technology." **E & WT J.** (July 1970).

22. Nachod, F.C. and Schubert, J. **Ion Exchange Technology**. New York: Academic Press, 1956.

23. Sard, R.A. "Some Factors to be Considered in the Optimization of Demineralising Plants." **E & WT J.** (May 1971).

24. Scott, R.A. "Mixed Bed Technology for Polishing Make-up Water and Condensate Return-part 1." **Effluent and Water Treatment Journal**. (March 1981).

25. Strauss, S.D. "Ion Exchange - A Special Report." **Power** (September 1961).

26. Strauss, S.D. "Water Treatment - A Power Special Report." **Power** (June 1970).

27. **Water Conditioning Manual**. Dow Chemical Co., 1974.

8 การเกิดตะกรันเกาะจับในหม้อไอน้ำ

น้ำบริสุทธิ์เมื่ออยู่ในภาชนะที่ไม่เกิดการกัดกร่อนจะไม่มีตะกรันเกาะจับ (Deposits) ซึ่งประกอบด้วยตะกรัน (Scales) และตะกอนหรือสลัจ (Sludges) ตะกรันเกาะจับที่พบนั้นแบ่งออกได้เป็นสารประเภทคือ

สารอินทรีย์ (Organics)

สารอนินทรีย์ (Inorganics)

- พวกจุลชีพที่เป็นสิ่งมีชีวิต (Biological)

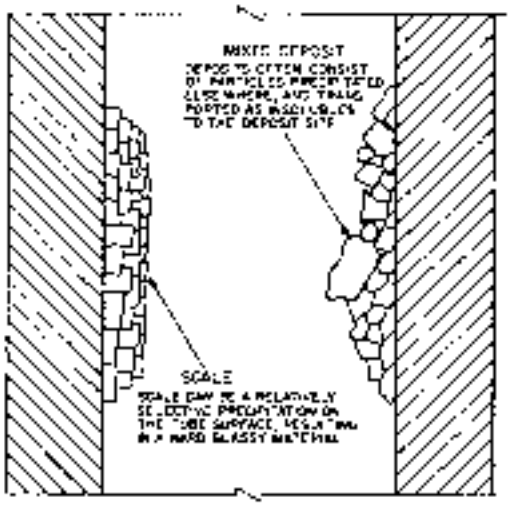
ตะกรันเกาะจับประเภทที่เป็นสารอินทรีย์มักเป็นผลเนื่องมาจากการกัดกร่อนของพื้นผิวโลหะต่าง ๆ หรือจากการทำปฏิกิริยาของสารต่าง ๆ ในน้ำและตกตะกอนออกมา หรือเกิดตะกอนแยกตัวออกมาจากน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น การละลายของสารในน้ำเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลง เกิดการระเหยของน้ำจนทำให้สารเป็นตะกรันหรือตะกอนติดอยู่ หรือเกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

ตะกรันเกาะจับที่เป็นสารอินทรีย์จะเกิดจากการตกตะกอน (Precipitation) ของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ การที่น้ำคอนเดนเสตมีสารอินทรีย์จากกระบวนการผลิตปะปนมา หรือจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่เดิม หรือใส่ลงไปในรูปของสารเคมีประเภทต่าง ๆ

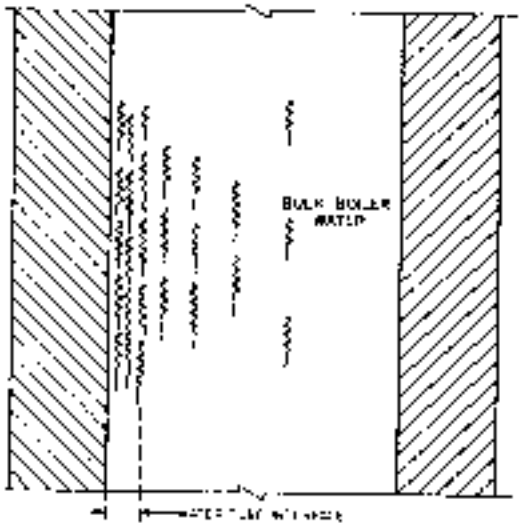
ในระบบการป้อนน้ำเข้าหม้อไอน้ำเป็นน้ำเลี้ยงนั้น สิ่งที่ต้องระมัดระวังในการควบคุมคือการเกิดตะกรันเกาะจับบนพื้นผิวของโลหะความร้อน เช่น ผนังท่อในหม้อไอน้ำ เมื่อมีตะกรันไปเกาะจับอยู่จะทำให้ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่ายเทให้แก่น้ำที่ไหลหมุนเวียนอยู่ในท่อไม่ทันเพราะตะกรันจะทำหน้าที่เสมือนว่าเป็นฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อน จึงทำให้โลหะที่เป็นผนังท่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก โลหะจะอ่อนตัวลงเนื่องจากผนังท่อนั้นมีความดันอยู่ ซึ่งจะดันให้ท่อบวมโป่งออก ผนังท่อบริเวณนั้นจะบางลงและอาจขยายตัวจนกระทั่งแตกและเสียหายได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะที่ใช้ทำท่อนั้นเปราะไปแล้วไม่ควรใช้งานจนกระทั่งมีอุณหภูมิเกินกว่า 480° C (900° F) เพราะตะกรันหรือสิ่งสกปรกต่าง ๆ ผสมจะสูญเสียคุณสมบัติทางกล เช่น แรงดัน ความแข็งแรง ถ้าตะกรันนั้นมีตะกรันที่เกาะจับอยู่หนามาก ก็อาจทำให้ผนังท่อรวมทั้งแกลอมระเบิดหรือแตกร้าวจากภายในได้ จนระเบิดและความเสียหายจากตะกรันจะเป็นเครื่องชี้บอกว่าการต่อและความร้อนผ่านไปทำได้ ในกรณีที่มีตะกรันจับที่ผนังหนา ซึ่งไม่ทำให้

ท่อลดเสียหายได้ ทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพการเผาไหม้ และมีปัญหาเรื่องมลภาวะ ตามมาอีกด้วย ส่วนที่เหลือก็จะไปกับก๊าซเสีย (Flue Gas) ออกทางปล่องไอเสีย นอกจากนี้ ผิวเหล็กถ้าที่มีตะกรันหรือตะกอนเกาะอยู่จะเกิดการกัดกร่อนได้ ซึ่งก็คือจุดที่มีตะกรันและน้ำที่สะสมอยู่ด้วยนั่นเอง ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ง่าย นอกจากนี้ การเกิดตะกรันนั้นยังทำให้เกิดผลเสียอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างทันทีทันใด เช่น Thermal Shock จะทำให้ตะกรันที่เกาะอยู่นั้นหลุดออกมาเป็นชิ้นใหญ่ ซึ่งจะทำให้เกิดการอุดตันของน้ำในท่อไอน้ำ เกิดขยะจำนวนมากและยังเป็นการทำให้เกิดการพาน้ำไปกับไอน้ำ (Carry over)

8.1 หลักการเกิดตะกรันเกาะจับ



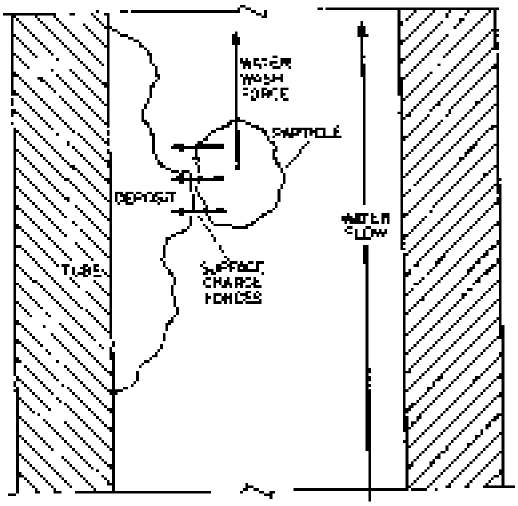
รูปที่ 8.1 ตะกรันเกาะจับที่เกิดในหม้อไอน้ำด้านที่สัมผัสกับน้ำเดือดมีลักษณะเป็นผลึกหรือผลึกฐาน



รูปที่ 8.2 การหุ้มน้ำในหม้อไอน้ำจะอุดพื้นที่การระเหยอยู่มาก ๆ เช่น เกิด หรือเกิดความร้อนเพิ่มเฉพาะจุดทำให้เกิดการเดือดตัวยิ่งขึ้นและเกิดตะกอนเป็นตะกรันเกาะอยู่ตรงนั้น

ในหม้อไอน้ำที่จะมีน้ำในส่วนที่ระเหยอยู่ตลอดเวลา เมื่อน้ำไหลผ่านผิวโลหะที่ร้อน เช่น ผนังท่อแล้วให้พื้นที่ที่ระเหยที่น้ำไหลผ่านเป็นครั้ง อุณหภูมิพื้นที่ผิว (Skin Temperature) ของโลหะจะสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำที่อยู่โดยรอบ ๆ มาก น้ำส่วนที่จะเกิดการระเหยนี้จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ ทำให้เกิดการระเหยน้ำเป็นไอขึ้นมาก ๆ ทำให้ความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ในน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ถ้าความเข้มข้นนี้สูงขึ้นมาก ๆ ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้นมาได้ ตะกอนเหล่านี้จะค่อย ๆ จับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น ถ้าตะกอนนี้เกาะอยู่ที่ผิวโลหะที่ร้อนก็จะทำให้เกิดการเกาะจับของตะกรันขึ้นได้ ตะกรันที่เกิดขึ้นนี้จะมีลักษณะเป็นผลึกหรือผลึกฐาน ขึ้นอยู่กับว่าตะกรันนั้นเกิดจากการตกตะกอนโดยตรงหรือเกิดจากการตกตะกอนที่อื่นแล้วมาเกาะจับที่ผิวโลหะ ในกรณีที่ตะกรันเกิดจากการตกตะกอนโดยตรงจะมีลักษณะเป็นผลึกฐาน ในกรณีที่ตะกรันเกิดจากการตกตะกอนที่อื่นแล้วมาเกาะจับที่ผิวโลหะจะมีลักษณะเป็นผลึกหรือผลึกฐานก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าตะกรันที่เกิดขึ้นนั้นจะสะสมตัวกันอย่างไร

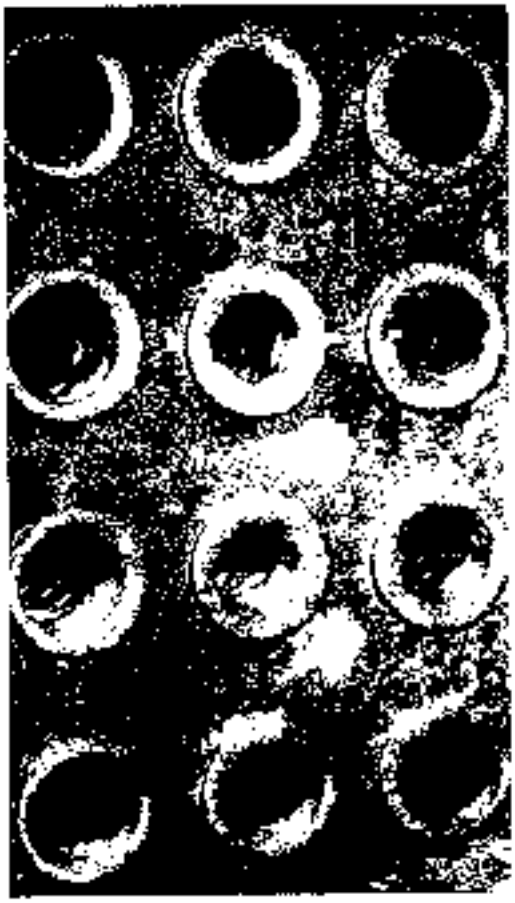
ซึ่งมีทั้งในสภาพที่เป็นผลึกและอสัณฐาน (Amorphous) แต่ถ้าตะกรันนี้เกิดในบริเวณที่มีกระแสน้ำไหล บริเวณที่มีการผสมคลุกเคล้าหรือกวนอย่างแรงจะสามารถพัดพาเอาตะกอนเหล่านั้นไปอยู่ในสภาพที่มีสารแขวนลอยอีก ซึ่งทำให้ไม่เกิดตะกรันเกาะจับ ดังนั้นการไหลหมุนเวียนของน้ำอย่างเพียงพอจะเป็นเครื่องป้องกันไม่ให้เกิดตะกรันเกาะจับได้



รูปที่ 8.3 ตะกรันหรือการจับที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดจากประจุต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำให้รวมกับตะกรันเกาะจับแล้ว การที่มีกระแสน้ำไหลอยู่ตลอดเวลาจะช่วยป้องกันมิให้เกิดกรณีเช่นนี้ได้

ในบางครั้งเมื่อมีตะกรันเกาะจับเกิดขึ้นบ้างแล้ว ตะกรันส่วนนี้จะเป็นเหตุให้เกิดตะกรันเกาะจับที่ใหญ่และรวดเร็วขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.3 เพราะเมื่ออนุภาคของสารต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำไหลผ่านตะกรันเหล่านี้จะถูกดึงดูดเอาไว้เนื่องจากที่ผิวมีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน ดังนั้น น้ำระบายน้ำที่มีตะกอนในตะกอนหรือจุลินทรีย์จะช่วยส่งเสริมการเกิดตะกรันเกาะจับเนื่องจากสาเหตุนี้ได้ นอกจากนี้ ถ้าหากมีการเติมสารเคมีที่ไม่เหมาะสมจนทำให้มีปริมาณสารละลายเข้มข้นซึ่งอาจเกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่ง เนื่องจากมีความเข้มข้นของสารละลายเฉพาะบริเวณนั้นสูงมาก และอุณหภูมิเฉพาะจุดของโลหะเพิ่มสูงขึ้นมากเกินไป และสำหรับตะกรันที่มีสภาพอสัณฐานนั้น มีรูปร่างไม่แน่นอนหรือเป็นตะกอนนั้น ก็ไม่มีโครงสร้างผลึกที่แน่นอน พื้นผิวโลหะสูงพอ ตะกรันเกาะจับบางประเภทจะเกิดขึ้นนอกเหนือจากสาเหตุที่กล่าวถึงแล้วนี้ เพราะเป็นผลิตผลจากการกัดกร่อนของโลหะ (Corrosion Products) ภายในหม้อไอน้ำระบบที่ตกตะกอนเป็นตะกรันเกาะจับขึ้น

รูปที่ 8.4 (ซ้าย) แสดงท่อที่มีตะกรันและเปียมคาร์บอเนตและซัลเฟต
(ขวา) แสดงท่อที่ปิดเกือบสนิทจากไฟฟ้าความร้อนเฉพาะจุดหนาเกินไป



รูปที่ 8.5 ภาพตะกรันและสิ่งสกปรกอยู่รอบนอกของท่อในหม้อไอน้ำ

8.2 หลักการเกิดตะกรันชนิดต่าง ๆ

8.2.1 แคลเซียมคาร์บอเนต

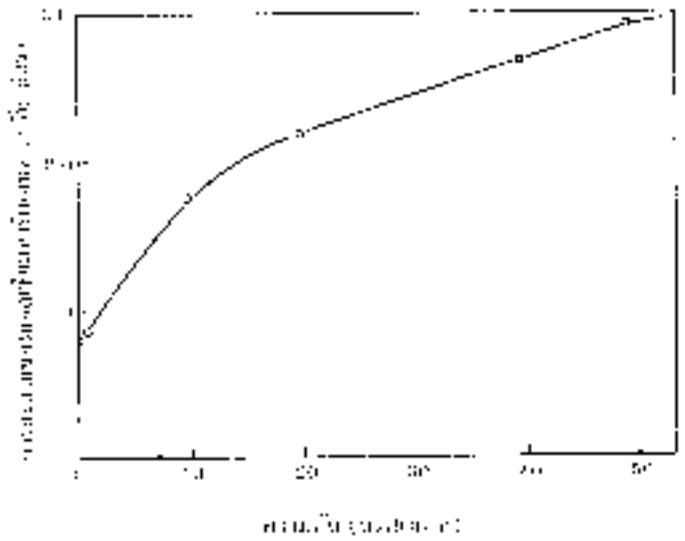
แคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลไซต์ เป็นตะกรันที่เกิดจากสิ่งแปลกปลอมในน้ำ (Impurities) อยู่มากที่สุด เมื่อมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น จะเกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการ

$$Ca^{++} + CO_3^{--} \rightarrow CaCO_3$$

ที่ 25°C (77°F) แคลเซียมคาร์บอเนตละลายในน้ำกลั่นที่มีความดันย่อย (Partial Pressure) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 3.2×10^{-4} บรรยากาศ (atm) ได้ 0.013 กรัมต่อลิตร แต่ในน้ำจืดแคลเซียมคาร์บอเนตจะละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย แต่การละลายนี้ขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ดูสมการ) และปริมาณสารบางชนิดในน้ำ เช่น เกลือ (NaCl)

การที่ละลายน้ำได้ดีของแคลเซียมคาร์บอเนตนี้ส่วนหนึ่งเนื่องจากน้ำทุกประเภทจะมีความเป็นด่างอยู่เสมอ และความเป็นด่างนี้จะอยู่ในรูปของ HCO_3^- ที่ได้รับความร้อนก็จะสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอเนตไอออนออกมา ซึ่งคาร์บอเนตไอออนจะจับกับแคลเซียมไอออนในน้ำกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนอยู่ ดังสมการข้างล่าง จะเห็นได้ว่าน้ำนั้นมีแคลเซียมคาร์บอเนตละลายอยู่ เกินกว่าที่จะละลายได้ (Solubility Product) ของ $CaCO_3$ มีความจำเป็นที่จะต้องมีอยู่ในน้ำโดยไม่ตกตะกอนออกมา ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนหรือตกสะสมออกมาได้ และในขณะเดียวกันคาร์บอเนตไอออนบางส่วนจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นดังสมการ

$$H_2O + CO_3^{--} \rightarrow 2OH^- + CO_2$$



รูปที่ 8.6 กราฟแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 25°C (77°F) กับความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

8.2.2 แมกนีเซียมคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์

ละลายและตกตะกอนแมกนีเซียมได้ง่ายกว่าแคลเซียม แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ตกตะกอนจากแมกนีเซียมคาร์บอเนตในน้ำจืดขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เหมือนกับการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนตเกิดจากการสลายตัวของแมกนีเซียมไบคาร์บอเนตดังสมการ

$$Mg(HCO_3)_2 \longrightarrow MgCO_3 + CO_2 + H_2O$$

แมกนีเซียมคาร์บอเนตละลายในน้ำได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต จึงทำให้น้ำละลายแคลเซียมคาร์บอเนตได้ดีขึ้น ถ้าน้ำมีแมกนีเซียมไบคาร์บอเนตละลายอยู่ด้วย ดังนั้น การมีแมกนีเซียมไบคาร์บอเนตจึงทำให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตละลายในน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งจะทำให้ผลของแคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนลดลง ถ้าน้ำมีค่าความกระด้างถาวรสูง ๆ แมกนีเซียมคาร์บอเนตจะไม่ตกตะกอนเลย มีข้อแตกต่างในการที่น้ำกระด้างชั่วคราวและถาวรอันเนื่องมาจากแมกนีเซียม น้ำบางแห่งมีแมกนีเซียมและแคลเซียมอยู่ในรูปของซัลเฟตและคลอไรด์ น้ำบางแห่งมีแมกนีเซียมและแคลเซียมอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตและซัลเฟตหรือคลอไรด์ ไปผสมกับน้ำอีกชนิดหนึ่งที่มีปริมาณแมกนีเซียมสูง จะทำให้แมกนีเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนออกมาได้

ปูนขาวหรือน้ำหินปูนจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไบคาร์บอเนตได้แมกนีเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจะตกตะกอนได้ที่อุณหภูมิ 80 °C ถ้าหากอุณหภูมิสูงกว่านี้ แมกนีเซียมคาร์บอเนตจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำและเกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ Brucite ดังสมการ

$$MgCO_3 + H_2O \longrightarrow Mg(OH)_2 + CO_2$$

ดังนั้น ปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จึงขึ้นกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

8.2.3 แคลเซียมซัลเฟต

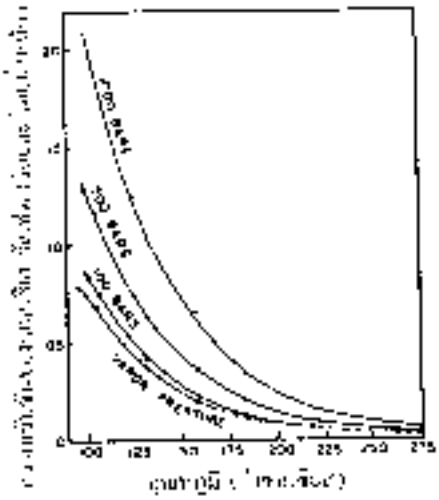
แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม มีสูตรทางเคมีเป็นสารประกอบที่มีน้ำและไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหรือสารผสม ยกเว้นแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นน้ำมีแคลเซียมและซัลเฟตอยู่ด้วยกัน ปฏิกิริยาจับตัวและตกตะกอนเป็นดังนี้

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} \longrightarrow CaSO_4$$

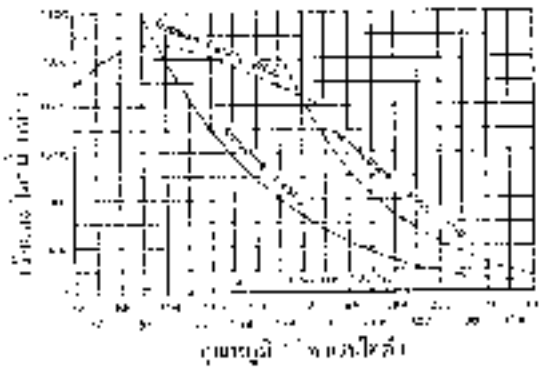
แคลเซียมซัลเฟตละลายในน้ำได้ดีที่ 0 °C กรัมต่อลิตร ที่ 35 °C ดังนั้นจะมีแคลเซียมซัลเฟตละลายในน้ำได้ประมาณ 2 กรัมต่อลิตร แต่แคลเซียมซัลเฟตจะละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แคลเซียมซัลเฟตแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ

1. Gypsum, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
2. Hemi hydrate, $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$
3. Anhydrite, $CaSO_4$

ที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปยิปซัมและแอนไฮโดรไรต์ เป็น



รูปที่ 8.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความสามารถในการละลายของแคลเซียมซัลเฟต



รูปที่ 8.8 แสดงการละลายและแคลเซียมซัลเฟตรูปต่าง ๆ และแคลเซียมคาร์บอเนตกับอุณหภูมิที่มีความดันคาร์บอนไดออกไซด์

8.2.4 แคลเซียมซัลเฟต

แคลเซียมซัลเฟตที่ละลายในน้ำได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ละลายในน้ำได้ประมาณ 0.0015 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม ที่ 25 °C จึงเป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อยที่สุด ดังนั้นถ้าต้องการให้น้ำผ่านการปฏิกิริยาทางเคมีที่ให้ตะกอนก็ปฏิกิริยาการตกตะกอนเป็นดังนี้

$$Ba^{2+} + SO_4^{2-} \rightarrow BaSO_4$$

การละลายของแคลเซียมซัลเฟตในน้ำบริสุทธิ์ที่ 25°C จะละลายได้เพียง 0.67 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงมีอัตราการละลายน้อยกว่าแคลเซียมซัลเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนต

8.2.5 เหล็ก

เหล็กในน้ำบาดาลมีได้ทั้งในรูปของสารแขวนลอย ในรูปของสารประกอบคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต เหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำจะมีสีแดงเมื่อสัมผัสกับอากาศ เหล็กที่ละลายน้ำได้มีเหล็กไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ในรูปของคอลลอยด์ และมีสีแดงของสนิมเหล็ก แต่ถ้าน้ำที่มีเหล็กไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ เหล็กจะอยู่ในรูปของเฟอรัสไบคาร์บอเนต ($Fe(HCO_3)_2$) เฟอรัสซัลไฟด์ (FeS) ในรูปของคอลลอยด์จะมีสีดำ หรือมีเหล็กที่ไม่ละลายน้ำอยู่ในรูป Kamacite (Fe_2N_{1-x}) Cementite ($Fe_{3-x}C$) และ Pyrite (FeS_2)

น้ำที่มีเหล็กออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่จะมีการกัดกร่อนสูง น้ำมีสีแดงเนื่องจากมีเฟอรัสไฮดรอกไซด์ และเฟอริกไฮดรอกไซด์ น้ำที่มีสภาพเป็นกรดจะมีการกัดกร่อนสูงขึ้น และถ้ามีแบคทีเรียเหล็กจะทำให้เกิดตะกอนสีน้ำตาลแดงของเหล็กไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ในน้ำที่มีเหล็กและคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาดังนี้ คือ เกิดเฟอรัสไบคาร์บอเนต ($Fe(HCO_3)_2$) เฟอรัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) เฟอรัสคาร์บอเนต ($FeCO_3$) เฟอรัสซัลไฟด์ (FeS) เฟอริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) และเฟอริกไฮดรอกไซด์ (Fe_2O_3)

8.2.6 ซิลิกา

ตะกอนซิลิกาเกิดจากซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำธรรมชาติ ซึ่งอาจมีได้มากถึง 100 มิลลิกรัม ซิลิกาในน้ำอยู่ในรูปของคอลลอยด์และสารแขวนลอย และอยู่ในรูปของกรดซิลิกา (Monosilicic Acid, H_4SiO_4)

8.3 การจัดแบ่งประเภทของตะกรันและตะกอน

เนื่องจากตะกรันและตะกอนที่เกิดขึ้นในน้ำนั้นมีรูปลักษณะที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับแร่ที่เกิดจากการตกผลึกของสารละลายแร่ธาตุ (Hydrothermal Minerals) ซึ่งจัดแบ่งประเภทได้ดังนี้

8.3.1 สารประกอบพื้นฐาน (Basic Compounds)

ในน้ำที่มีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ เมื่อสัมผัสกับผิวโลหะจะพบว่ามีการกัดกร่อนเกิดขึ้นเกิดเป็นคราบสีของโลหะที่ละลายน้ำและไฮดรอกไซด์ของโลหะที่ไม่ละลายน้ำ ถ้าน้ำมีไอออนของคลอไรด์จะพบ Atacamite ($\alpha CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2$) ซึ่งมีลักษณะแข็ง เม็ดสีจะเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอเนต เช่น $ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$

8.3.2 คาร์บอเนต (Carbonates)

คาร์บอเนตของโลหะหนักและ Alkaline Earth จะไม่ละลายน้ำ หรือไบคาร์บอเนตจะละลายน้ำได้มากกว่า แต่ถ้าเพิ่ม pH และความร้อนจะเปลี่ยนจากไบคาร์บอเนตเป็นคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ ในกรณีแรกเปลี่ยนความร้อน ตะกอนในหม้อไอน้ำและเครื่องทำน้ำร้อนจะพบหินปูน Aragonite ($\gamma CaCO_3$) และ Calcite ($\beta CaCO_3$) ซึ่งแคลไซต์จะมีเสถียรภาพสูงกว่าและเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง ในบางครั้งพบหินปูนโดโลไมต์ ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) ที่มีการแทนที่ด้วยส่วนของแมกนีเซียมและแมงกานีสบางส่วนที่เกิดในบริเวณน้ำความดันต่ำจะพบหินปูนในรูปอื่น ๆ เช่น Ankerite ($CaCO_3 \cdot (Fe, Mg, Mn)\ CO_3$) และ Gaylussite ($CaCO_3 \cdot Na_2CO_3 \cdot 5H_2O$) ถึงแม้ว่าเหล็กจะมีอยู่ในคาร์บอเนตจะพบตะกอนของ Siderite ($FeCO_3$) ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของคอนเดนเสทที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่

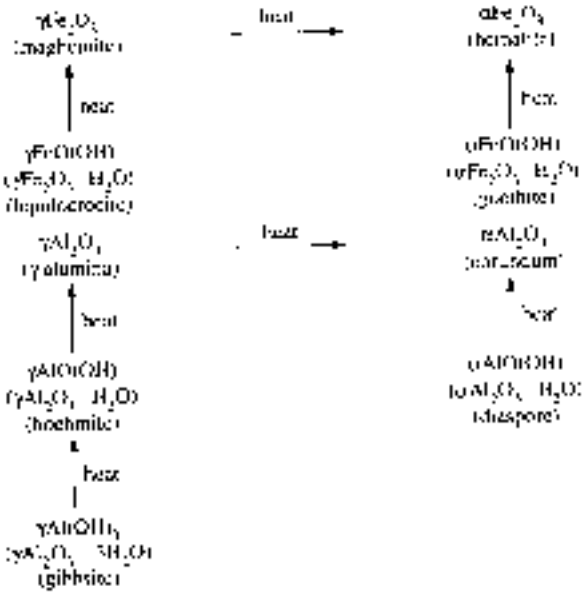
8.3.3 ออกไซด์ที่มีน้ำ (Hydrated Oxides)

โดยมากจะเป็นตะกอนที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีความเสถียรเป็นสูตรเคมีได้คือ $M_2O_3 \cdot H_2O$ แต่มีเป็นสูตรโครงสร้างจะเป็น $MO(OH)$ ซึ่งถูกต้องกว่าไฮดรอกซิลออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมนี้เมื่อได้รับความร้อนจะสูญเสียน้ำและมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กได้

8.3.4 ไฮดรอกไซด์ (Hydroxides)

ไฮดรอกไซด์ธรรมดาจะตกตะกอนได้เมื่อ pH ของสารละลายสูง บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ เช่น บริเวณไฮโดรไลซิสในปฏิกิริยาการกัดกร่อน Brucite หรือ $Mg(OH)_2$ จะตกตะกอนในหม้อไอน้ำที่ใช้อุปกรณ์อีพอกซีที่มีน้ำเพราะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จะเป็นตะกรันอยู่ในท่อเหล่านี้ได้ เนื่องจากการสลายตัวด้วยความร้อนของตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตเดิมที่มีอยู่

เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) จะพบในรูปหรือของอุมิ (Pits) ที่เกิดจากการกัดกร่อน



รูปที่ 8.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างออกไซด์ในรูปต่าง ๆ กับอุณหภูมิของเหล็กออกไซด์โดยเมื่อจะสูญเสียน้ำทำให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนไป

8.3.6 โลหะและโลหะออกไซด์ (Metal and Metallic Oxides)

โลหะที่พบในตะกอนหรือตะกรันต่าง ๆ นั้นเกิดจากผลของการรีดิวส์ในสารละลายหรือในออกไซด์ของโลหะ ในหม้อไอน้ำความดันสูงตะกอนในหม้อไอน้ำจะมีทองแดง (Deadstic Copper) อยู่มาก เนื่องจากทองแดงจะตกตะกอนในบริเวณที่มีความร้อนสูงและโลหะต่ำ ส่วนเหล็กจะพบในสภาพที่เกิดจากการกัดกร่อนในรูปการเปลี่ยนสภาพของเฟอร์รัสออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะให้ Fe_3O_4 ดังสมการ

$$4FeO \longrightarrow Fe + Fe_3O_4$$

โลหะออกไซด์มักจะเป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาการกัดกร่อน การสูญเสียน้ำของพวกไฮดรอกซ์ไซด์ การสลายตัวของคาร์บอเนตออกไซด์เหล่านี้อาจจะมีสภาพเกาะกันหลวม ๆ มีลักษณะพรุนและเหนียวตามสภาวะที่เกิด ออกซิเจนที่ทำให้เกิดออกไซด์อาจมาจากออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหรือออกซิเจนที่อยู่ในโมเลกุลของน้ำ ซึ่งในกรณีหลังนี้จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนด้วย การกัดกร่อนของเหล็กในน้ำนั้นจะพบเหล็กออกไซด์ในรูป FeO, Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 ขึ้นกับปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ การกัดกร่อนเหล็กด้วยไอน้ำจะได้ Fe_3O_4 และ FeO

ตะกอนหรือสลัดจ์ในหม้อไอน้ำ และการกัดกร่อนของทองแดง ทองเหลือง และบรอนซ์จะพบออกไซด์ของทองแดงในรูป Cuprite (Cu_2O) และ Tenorite (CuO) ถ้าน้ำมี pH สูงและมีออกซิเจนละลายอยู่มากจะพบ Tenorite เกิดได้มากกว่า ส่วน Cuprite จะเกิดในสภาพที่น้ำมี pH ต่ำกว่าและมีออกซิเจนน้อยกว่า

ในหม้อไอน้ำความดันสูงและเครื่องกังหันไอน้ำ บางครั้งจะพบ Corundum (αAl_2O_3) ซึ่งเป็นการแปรสภาพของอะลูมินัมที่ตกตะกอน

8.3.6 ฟอสเฟต (Phosphates)

ฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาของการเติมฟอสเฟตเพื่อยับยั้งการตกผลึกของแคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก ซึ่งจะเกิดเป็นฟอสเฟตในรูปที่ไม่ละลายน้ำขึ้นมาจากตัวกลางในฟอสเฟตที่ละลายน้ำ ในการป้องกันสนิมในหม้อไอน้ำมักจะนิยมเติมฟอสเฟตในรูปต่าง ๆ เพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมให้เกิดเป็นสารประกอบ Hydroxyapatite ($Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$) ซึ่งสารประกอบนี้จะมีลักษณะอ่อนและเป็นโคลน (Floc) ได้ง่ายกว่าที่จะมีโอกาสเกาะยึดกับผิวโลหะรับแข็งได้ และในกรณีของน้ำที่มีความกระด้างถาวรสูง และในบริเวณที่น้ำในหม้อไอน้ำมีความเข้มข้นของแคลเซียมสูง ตะกอนที่อาจจะเปลี่ยนสภาพเป็น Wilkeite ($Ca_5O[(Si,P,S)O_4]_3$) ส่วนตะกอน Sodium Calcium Phosphate ($NaCaPO_4$) ก็เกิดขึ้นได้ในสภาวะดังกล่าวแล้ว

ในหม้อไอน้ำที่มีน้ำป้อนเข้าไปในน้ำหม้อไอน้ำ ถ้าหากใช้สารเคมีจำพวกฟอสเฟตสำหรับตกตะกอนหรือตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟต Whitlokite ($\beta Ca_3P_2O_8$) และไฮดรอกซีแอพาไทต์ ($Ca[PO_4]_3$)

ในน้ำหม้อไอน้ำที่มีปริมาณฟอสเฟตสูงและซิลิกาต่ำจะพบ Magnesium Hydroxyphosphate ($Mg_3PO_4MgOH_2$) อยู่ในตะกอนตกผลึกในน้ำหม้อไอน้ำด้วย

8.3.7 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ละลายกับสารประกอบซิลิเกตที่อยู่ในรูปของแร่ (SiO_2) หรือ Cristobalite ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงด้วยความร้อนของซิลิกาแกลที่เป็นของแข็ง และการผสมของซิลิกาที่ละลายในน้ำกับสารประกอบซิลิเกตจะเป็นแบบที่แข็งที่สุด แต่ผลึกมีรูปร่างต่าง ดังนั้น เมื่อเกิดอยู่ในตะกรันที่ไม่ทำให้ตะกรันมีความเปราะมากเกินไปหรือเกิดการแตกได้ง่าย คุณสมบัติที่สำคัญของซิลิกาที่ละลายได้ในน้ำคุณสมบัติที่สำคัญของซิลิกาที่ละลายได้ในน้ำหม้อไอน้ำที่มีความดันสูงจะมีความสามารถในการพาซิลิกาในน้ำระเหยไปกับไอน้ำ Cristobalite เป็นผลึกซิลิกาเดี่ยวรูปที่ทำให้เกิดในหม้อไอน้ำที่มีความดันสูงและมีการพาซิลิกาในน้ำระเหยไปกับไอน้ำ ตะกรันจำพวกซิลิกาที่พบในหม้อไอน้ำจะมีส่วนประกอบของ Uncombined Silica

1. **ซิลิเกตธรรมดา (Simple Silicates)** ซิลิเกตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นซิลิเกตของแคลเซียม ซิลิเกตของแมกนีเซียมและแมงกานีสที่เกิดขึ้นจะต้องมีน้ำอยู่ในผลึกและแทบทั้งหมดจะพบได้แก่ Serpentine ($3\,MgO \cdot 2\,SiO_2 \cdot 2\,H_2O$), Talc ($3\,MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) และ Soapstone ($2\,MgO \cdot 3\,SiO_2 \cdot 2\,H_2O$) มีลักษณะเป็นเม็ดที่อ่อนนิ่มจะพบมากในตะกอนตกผลึกที่เกิดจากการที่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จับเอาพวกซิลิกาที่ละลายน้ำเข้าไปรวมกัน แคลเซียมซิลิเกตที่พบมากที่สุดจะพบ Serpentine มากที่สุด

แคลเซียมซิลิเกตที่พบมากได้แก่ Gyrolite ($2\,CaO \cdot 3\,SiO_2 \cdot H_2O$), Xonotlite ($6\,CaO \cdot 6\,SiO_2 \cdot H_2O$) และ Foshagite ($5\,CaO \cdot 3SiO_2 \cdot 3\,H_2O$) ผลึกต่างนี้มีลักษณะอ่อนนิ่ม เหนียว และเป็นผลึกเกาะรวมกันเป็นกระจุกหรือเป็นก้อน พบมากได้แก่ Xonotlite

ซิลิเกตที่ไม่มีน้ำที่พบได้แก่ Fayalite ($2\,FeO \cdot SiO_2$), Melilite ($2\,Al_2O_3 \cdot 2\,SiO_2$), Olivene ($2\,(Mg, Fe)\,O \cdot SiO_2$) และ Forsterite ($2\,MgO \cdot SiO_2$)

ในโครงสร้างผลึกของ Thenardite (Na_2SO_4) และ Glauberite ($Na_2Ca(SO_4)_2$) มีไอออนของโซเดียมและแคลเซียมอยู่ในช่องว่างระหว่างหมู่ซัลเฟตที่ต่อกันด้วยพันธะไอออนิก ซึ่งทำให้มีความแข็งแรงน้อย และมีการแตกตามแนวรอยแยกได้ง่าย โดยมีการจัดโครงสร้างแบบโมโนคลินิก

2. **ซิลิเกตเชิงซ้อน (Complex Silicates)** คือ ซิลิเกตที่มีอิเล็กตรอนประจุลบเกาะอยู่ด้วย ซึ่งอาจเป็นไอออนลบของธาตุอื่นที่ไม่ใช่ซิลิกอนและออกซิเจน เช่น ไอออนของโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูง ซึ่งมักจะเป็นโลหะที่มีขนาดใหญ่ ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม ดังนั้นซิลิเกตเชิงซ้อนจึงมีความหลากหลายของโครงสร้างมากกว่าซิลิเกตธรรมดา ซึ่งมีโครงสร้างที่ค่อนข้างแน่นอน ซิลิเกตเชิงซ้อนบางชนิดมีโครงสร้างเป็นแบบเฟลด์สปาร์ (Feldspar) ซึ่งมีสูตรทั่วไปเป็น $MAlSi_3O_8$ โดย M อาจเป็นโซเดียม โพแทสเซียม หรือแคลเซียม ตัวอย่างของซิลิเกตเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างแบบเฟลด์สปาร์ ได้แก่ Albite ($NaAlSi_3O_8$) Orthoclase ($KAlSi_3O_8$) และ Anorthite ($CaAl_2Si_2O_8$) ซึ่งมีปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซิลิเกตและแคลเซียมซิลิเกต ดังสมการ

$$NaAlSi_3O_8 + CaAl_2Si_2O_8 \rightarrow 2NaAlSiO_4 + CaSiO_3$$

ผลที่ได้จากปฏิกิริยาคือ Nepheline ($NaAlSiO_4$) และ Wollastonite ($CaSiO_3$) ซึ่งต่างก็เป็นซิลิเกตเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างแบบเฟลด์สปาร์ด้วยกันทั้งคู่ ตัวอย่างของซิลิเกตเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างแบบเฟลด์สปาร์ ได้แก่ Analcite ($NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$) Natrolite ($Na_2Al_2Si_3O_{10} \cdot 2H_2O$) และ Nosean ($4Na_2O \cdot 4AlO_3 \cdot 6SiO_2 \cdot SO_3 \cdot 2H_2O$) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสูตรของ Analcite และ Natrolite มีลักษณะคล้ายกับ Albite ส่วน Nosean มีสูตรที่ซับซ้อนกว่าเพื่อให้สามารถเขียนสมการของปฏิกิริยาได้ถูกต้องตามหลักการดุลสมการ

ในกรณีที่มีสารละลายแคลเซียมอยู่ในปริมาณสูงจะมีโอกาสเกิดซิลิเกตเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างแบบเฟลด์สปาร์ เช่น Cancrinite ($4Na_2O \cdot 4CaO \cdot 4Al_2O_3 \cdot 2CO_2 \cdot 9SiO_2 \cdot 3H_2O$) หรือ Davyne ($3Na_2O \cdot 3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot SO_3$) ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้นไปอีก ส่วนซิลิเกตเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างแบบเฟลด์สปาร์ที่มีปริมาณแคลเซียมสูงขึ้นไปอีก จะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้นไปอีก เช่น Pectolite ($Na_2O \cdot 4CaO \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$)

8.3.8 ซัลเฟต (Sulfates)

ซัลเฟตส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นแบบโมโนคลินิก ยกเว้น Anhydrite ($CaSO_4$) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธรอมบิก ซัลเฟตที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบด้วย เช่น Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) และ Epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) จะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างอ่อนแอ ทำให้เกิดการแตกตามรอยแยกได้ง่าย ซัลเฟตที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ได้แก่ ซัลเฟตของโลหะหมู่ IA และ Mg ส่วนซัลเฟตของโลหะหมู่ IIA ส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำ ยกเว้น Mg ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าโลหะหมู่ IIA ตัวอื่น ๆ

ตัวอย่างเช่น Celestite ($SrSO_4$) และ Baryte ($BaSO_4$) ที่พบตามธรรมชาติจะมีสารละลายน้ำได้น้อยมาก เนื่องจากมีขนาดของ Sr และ Ba ค่อนข้างใหญ่ ทำให้ไม่สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของน้ำได้ง่าย

ในกลุ่มโลหะอัลคาไลที่พบในน้ำทะเลก็จะมีซัลเฟตเช่นกัน ได้แก่ Thenardite (Na_2SO_4-V), Metathenardite (Na_2SO_4-I), $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ และ Burkeite ($2Na_2SO_4 \cdot Na_2CO_3$)

8.3.9 ซัลไฟด์ (Sulfides)

โลหะซัลไฟด์บางชนิดจะไม่ละลายน้ำ และไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ซัลไฟด์ที่มีความสำคัญ ได้แก่ ซัลไฟด์ของทองแดง ได้แก่ Chalcocite (Cu_2S) หรือ Covellite (CuS) ในน้ำทะเลจะพบซัลไฟด์ของเหล็กได้มาก เช่น ไพไรต์ (Pyrite) และ Troilite

8.3.10 เกลือของสารอินทรีย์ (Organic Salts)

เช่นที่พบมีเด่นคือ แคลเซียมออกซาเลตที่มีน้ำอยู่ในผลึกหนึ่งและสองโมเลกุล ($CaC_2O_4 \cdot H_2O$ และ $CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$) เพราะไม่ค่อยละลายในน้ำ

8.4 การตรวจและวิเคราะห์ตะกรันและตะกอน

หลังจากที่ได้กับตัวอย่างตะกรันหรือตะกอนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาประเภทของตะกรันหรือตะกอนต่อไป

วิธีการที่ใช้ตรวจสอบและวิเคราะห์มีดังนี้

- กล้องจุลทรรศน์ (Biological Microscope)
- Chemical Microscope
- X-ray Diffraction
- X-ray Spectroscopy

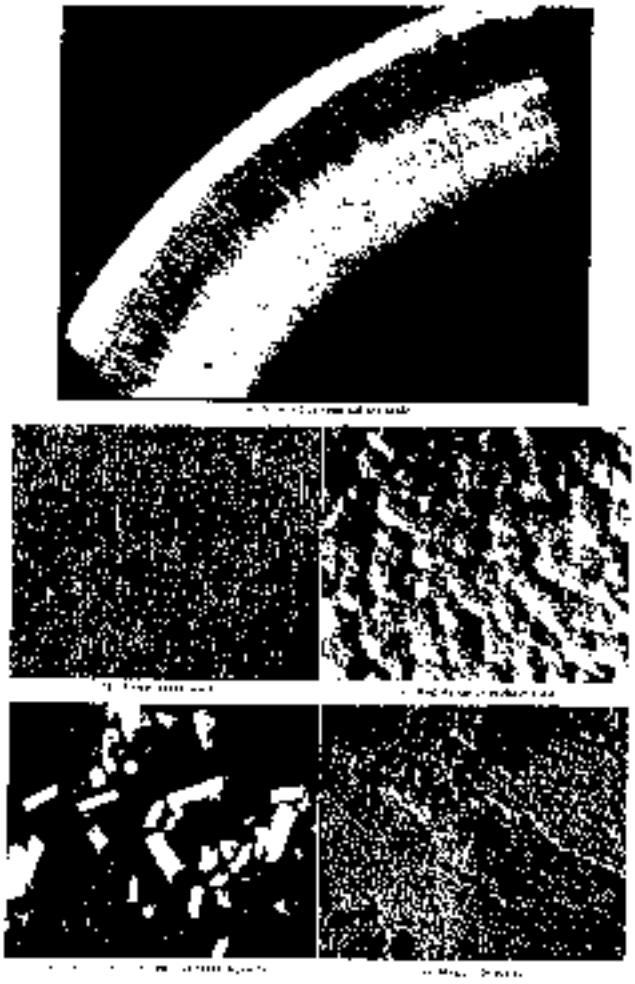
  Optical Spectroscopy
- Electron Microscope
- Molecular Absorption Spectroscopy
- Atomic Absorption Spectroscopy

ตารางที่ 8.7 การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ตะกรันและตะกอนและข้อจำกัด

อุปกรณ์	หลักการ	ข้อจำกัด
กล้องจุลทรรศน์ชีววิทยา (Biological Microscope)	ใช้ตรวจดูหาจุลชีพในน้ำ ตัวอย่างที่จะนำมาตรวจดูจะต้องย้อมสีก่อน ใช้ตรวจดูตะกรันที่มีขนาดใหญ่ ๆ ที่ยังไม่ละเอียดเป็นผงก่อนการวิเคราะห์	ตรวจดูได้ยากและไม่ชัดเจนเท่าที่ควร เพราะตะกรันมีขนาดเล็กมาก
กล้องจุลทรรศน์เคมี (Chemical Petrographic Microscope)	ใช้ดูลักษณะและรูปร่างของผลึกและวัตถุต่าง ๆ ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ใช้ตรวจดูลักษณะและโครงสร้างของวัตถุนั้น เรียกว่า Qualitative Microchemical Analysis	ใช้ดูได้เฉพาะผลึกขนาดใหญ่ ๆ ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ตัวอย่างต้องไม่ละลายในสารละลายน้ำด่าง
X-ray Diffraction	ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกอย่างละเอียด	ใช้ดูตัวอย่างที่เป็นผลึกเท่านั้น ถ้าเป็นสารที่มีลักษณะเป็นแก้ว ไม่เป็นผลึกจะดูไม่ได้ และต้องเป็นผลึกขนาดเล็กมาก ๆ ด้วย
Spectroscope	ใช้ตรวจหาธาตุต่าง ๆ ในประจุของไฟฟ้า	ดูตัวอย่างที่เป็นสารประกอบได้ยากกว่าธาตุ
Spectrograph	ใช้ตรวจหาธาตุโดยการถ่ายภาพของสารที่มีประจุของไฟฟ้า ที่มีอยู่ในปริมาณน้อย (Minor Or Trace Constituents)	เหมือนกับการใช้ Spectroscope

ตารางที่ 8.2 ผลการวิเคราะห์ตะกรันเตาหลอมด้วยวิธีการต่าง ๆ

ตัวอย่าง ก.		ตัวอย่าง ข.	
1. การวิเคราะห์ทางเคมี			
SiO_2	19.7	SiO_2	15.0
Fe_2O_3	55.6	Fe_2O_3	8.6
CaO	20.3	CaO	50.0
MgO	2.6	MgO	17.3
SO_3	0.1	SO_3	0.1
P_2O_5	1.7	CO_2	21.9
Cu	0.1	Loss on Ignition	33.5
Loss on Ignition	1.9		
2. การตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์			
พบว่าเป็นผลึกแอกไซด์ของเหล็กเป็นส่วนใหญ่ พบ Hydroxyapatite และผลึกที่มีลักษณะที่คล้ายกับผลึกของ Dendrites ของโลหะผสมอยู่ด้วยเล็กน้อย		พบว่า Highly Birefringent Calcite เป็นส่วนใหญ่ และพบแก้วซิลิเกตอยู่ด้วยเล็กน้อย และไม่พบผลึกของแอกไซด์ของเหล็ก	
3. การวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction			
ประกอบด้วย Hematite Serpentine, Hydroxyapatite และโลหะผสมของเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบรองลงมาคือ Serpentine และ Hydroxyapatite ในปริมาณเล็กน้อย		พบว่ามี Calcite และ Serpentine ในปริมาณเท่า ๆ กัน Serpentine มีผลึกในลักษณะเป็นเข็ม Calcite จะประกอบอยู่ในลักษณะ Highly Birefringent และเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าผลึกของ Serpentine ปริมาณเล็กน้อย	
4. การวิเคราะห์ด้วย Spectroscopic			
มีธาตุประกอบ ๆ เช่น Si, Fe, Ca และ Mg		มีธาตุประกอบ ๆ เช่น Si, Ca และ Mg	
มีธาตุปริมาณน้อย ๆ เช่น Cu		มีธาตุปริมาณน้อย ๆ เช่น Fe	
มีธาตุปริมาณน้อยมาก ๆ เช่น Mn และ Cr		มีธาตุปริมาณน้อยมาก ๆ เช่น Zn, Al และ Mn	
5. การวิเคราะห์ด้วย Spectrographic			
Mn	0.12	Zn	0.43
Cr	0.07	Al	0.15
Ni	0.03	Mn	0.06
Cu	0.20	Pb	0.01



รูปที่ 8.10 ภาพตะกอนชนิดต่าง ๆ ที่ติดไปกับน้ำ

รูปที่ 8.11 ภาพตัดขวางของทอน้ำในแม่น้ำโขง

ตารางที่ ๔.๒ รายชื่อสารต่าง ๆ ที่พบในตะกรันและจับที่เกิดในหม้อ-

Acmite	$Na_2O \cdot Fe_2O_3 \cdot 4SiO_2$
Ammonium bicarbonate	NH_4HCO_3
Analcite	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$
Anhydrite	$CaSO_4$
Ankerite	$2CaCO_3(Fe, Mg, Mn)CO_3$
Aragonite	$CaCO_3$
Brucite	$Ca(OH)_2 + nCa(OH)_2$
Cuprite	$nCu_2O \cdot mCu(OH)_2$
Barite	$BaSO_4$
Bayerite	$Al_2O_3 \cdot nH_2O$
Bloedite	$Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$
Boehmite	$Al_2O_3 \cdot H_2O$
Bornite	Cu_5FeS_4
Brochantite	$CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$
Brucite	$Mg(OH)_2$
Bunsenite	NiO
Burkeite	$Na_2CO_3 \cdot 2Na_2SO_4$
Calcium oxalate monohydrate	$CaC_2O_4 \cdot H_2O$
Calcium phosphate (dibasic)	$CaHPO_4$
Calcium pyrophosphate	$Ca_2P_2O_7$
Calcium sodium phosphate	$CaNaPO_4$
Calcium sulfate	$CaSO_4$
Calcite	$CaCO_3$
Calcium aluminate	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$
Carnallite	$xNa_2O \cdot yK_2O \cdot zAl_2O_3 \cdot uSiO_2 \cdot vSO_3 \cdot wH_2O$
Celestite	$SrSO_4$
Chalcocite	Cu_2S
Chalcocite	αCu_2S
Chalcocite	βCu_2S
Chalcopyrite	$CuFeS_2$
Copper	Cu
Copper aluminate	$CuAlO_2$
Corundum	αAl_2O_3
Covellite	CuS
Crednerite	$CuMnO_2$
Cuprite	Cu_2O
Delafossite	$CuO \cdot Fe_2O_3$
Dolomite	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$
Fayalite	$2FeO \cdot SiO_2$
Ferrous ammonium	$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$

ตารางที่ 8.3 ชาธิมสารต่าง ๆ พบในตะกอนเกาะจับที่ก้นในน้ำ (ต่อ)

Ferrous sulfate monohydrate	$FeSO_4 \cdot H_2O$
Ferrous sulfate quadrahydrate	$FeSO_4 \cdot 4H_2O$
δ Ferric oxide	$\delta\ Fe_2O_3$
β Ferric oxide monohydrate	$\beta\ Fe_2O_3 \cdot H_2O$
Fluorite	CaF_2
Foshagite	$5CaO \cdot 3SiO_2 \cdot 3H_2O$
Forsterite	$2MgO \cdot SiO_2$
Gaylussite	$CaCO_3 \cdot Na_2CO_3 \cdot 2H_2O$
Gehlenite	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
Gibbsite	$\gamma\ Al_2O_3 \cdot 3H_2O$
Glauconite	$K_2(MgFe)_2Al_6(Si_4O_{10})_3(OH)_{12}$
Goethite	$\alpha\ Fe_2O_3 \cdot H_2O$
Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Gyrolite	$2CaO \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$
Halite	$NaCl$
Hematite	Fe_2O_3
Hemihydrate	$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$
Hemimorphite	$Zn_4(OH)_2Si_2O_7 \cdot H_2O$
Hydromagnesite	$4MgO \cdot 3CO_2 \cdot 4H_2O$
Hydrotalcite	$MgCO_3 \cdot 3Mg(OH)_2 \cdot 2Al(OH)_3 \cdot 4H_2O$
Hydroxyapatite	$Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$
Hydrozincite	$2ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$
Iron	Fe
Lazurite	$3Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2Na_2S$
Lead	Pb
Lepidocrocite	$\gamma\ Fe_2O_3 \cdot H_2O$
Libethenite	$4CuO \cdot P_2O_5 \cdot H_2O$
Maghemite	$\gamma\ Fe_2O_3$
Magnesia	MgO
Magnesium chloride hydrate (basic)	$MgCl_2 \cdot 5Mg(OH)_2 \cdot 8H_2O$
Magnesium hydroxyphosphate	$Mg_3(PO_4)_2 \cdot Mg(OH)_2$
Magnesite	$MgCO_3$
Magnetite	Fe_3O_4
Malachite	$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$
Meta halloysite	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$
Meta thenardite	Na_2SO_4 I
Montmorillonite	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$
Mullite	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
Muscovite	$KAl_2(Si_3AlO_{10})(OH,F)_2$
Natrolite	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 2H_2O$
Nontronite	$H_4(Al,Fe)_2Si_4O_8$

ตารางที่ ๑ : ชื่อแร่และสูตรเคมีของแร่ที่พบในหินอัคนี (ต่อ)

Nosean	$3Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot Na_2SO_4$
Oldhamite	CaS
Olivine	$2(Mg,Fe)O \cdot SiO_2$
Parasepiolite	$4MgO \cdot 6SiO_2 \cdot 9H_2O$
Paratacamite	$Cu(OH)_2 \cdot CuCl_2$
Pectolite	$Na_2O \cdot 4CaO \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$
Periclase	MgO
Portlandite	$Ca(OH)_2$
Pyrrhotite	FeS
Quartz	SiO_2
Sepiolite	$4MgO \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
Sepiolite	$4MgO \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
Siderite	$FeCO_3$
Smithsonite	$ZnCO_3$
Sodium disilicate	β $Na_2Si_2O_5$
Sodium metasilicate	Na_2SiO_3
Sphalerite	β ZnS
Syngenite	$K_2SO_4 \cdot CaSO_4 \cdot H_2O$
talc	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
tenorite	CuO
Teschemacherite	NH_4HCO_3
Thenardite	$Na_2SO_4(V)$
Thermonatrite	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$
Troilite	FeS
Trona	$3Na_2O \cdot 4CO_2 \cdot 5H_2O$
Vermiculite	$(Mg,Fe)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$
Vivianite	$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$
Weddellite	$CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$
Wilkeite	$Ca_5(OH)(Si,P,S)_3O_{12}$
Willemite	Zn_2SiO_4
Witherite	$BaCO_3$
Whitlockite	β $Ca_3(PO_4)_2$
Wollastonite	β CaSiO
Wurtzite	ZnS
Xonotlite	$6CaO \cdot 6SiO_2H_2O$
Zeolite A	$Z(H) \cdot xH_2O$
B	$Z(H) \cdot yH_2O$
L	$Z(H) \cdot xH_2O$
Zincite	ZnO
Zinkosite	$ZnSO_4$

ตารางที่ 8.4 ชนิดของตะกรันและสิ่งหินในหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ที่เกี่ยวเนื่องกับระบบไอน้ำ

ธาตุหลัก	ชื่อทางเคมี	ชื่อทางธรณีวิทยา	สูตรเคมี
กลุ่ม ก. หม้อไอน้ำและซุปเปอร์ฮีทเตอร์			
Barium	Barium carbonate	Witherite	$BaCO_3$
	Barium sulfate	Barite	$BaSO_4$
Calcium	Calcium carbonate	Calcite	$CaCO_3$
	Calcium silicate	Wollastonite	$CaSiO_3$
	Calcium sulfate	Hemihydrate	$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$
	Calcium hydroxide		$Ca(OH)_2$
	Calcium phosphate	Hydroxyapatite	$Ca_5(OH)(PO_4)_3$
	Calcium phosphate	Whitlockite	$Ca_3(PO_4)_2$
Magnesium	Magnesium hydroxide	Brucite	$Mg(OH)_2$
Sodium	Sodium sulfate	Thenardite	Na_2SO_4
Silicate	Silicon oxide	Quartz	SiO_2
	Serpentine	Acmite	$NaFe(SiO_3)_2$
	Sodium aluminosilicate	Analcite	$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$
	Sodium aluminosilicate	Nosean	$Na_8Al_6Si_6O_{24}(SO_4)$
	Sodium aluminosilicate	Nepheline	$NaAlSiO_4$
	Sodium calcium silicate	Pectolite	$NaCa_2Si_3O_8(OH)$
	Calcium silicate	Wollastonite	$CaSiO_3$
	Calcium silicate	Afwillite	$Ca_3(SiO_3)_2 \cdot H_2O$
	Calcium hydrosilicate	Cleavelandite	$4NaAlSi_3O_8 \cdot CaH_2SiO_4 \cdot 2Ca(OH)_2 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$
	Magnesium silicate	Serpentine	$3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
Iron	Iron oxide	Wüstite	FeO
	Iron oxide	Hematite	Fe_2O_3
	Iron oxide	Troilite	FeS
กลุ่ม ข. คอนเดนเซอร์ ที่ความเร็วต่ำและอุปกรณ์ที่ต้องการน้ำคุณภาพสูง			
Calcium	Calcium sulfate	Anhydrite	$CaSO_4$
	Calcium sulfate	Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
	Calcium carbonate	Aragonite	$CaCO_3$
	Calcium sodium carbonate	Trona	$NaCO_3 \cdot NaHCO_3 \cdot 2H_2O$
	Calcium magnesium carbonate	Dolomite	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$
	Calcium fluoride	Fluorite	CaF_2
Copper	Copper sulfide		CuS
	Copper carbonate	Malachite	$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$
	Copper iron sulfide		$CuFeS_2$
	Copper oxide	Cuprite	Cu_2O
Magnesium	Magnesium silicate	Forsterite	Mg_2SiO_4
	Magnesium hydroxide		$Mg(OH)_2$
	Magnesium silicate	Serpentine	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
Iron	Iron oxide	Magnetite	Fe_3O_4
	Iron oxide	Hematite	Fe_2O_3
Sodium	Sodium aluminosilicate	Nosean	$Na_8Al_6Si_6O_{24}(SO_4)$
กลุ่ม ค. ระบบน้ำควบแน่นความดันต่ำ			
Ammonium	Ammonium carbonate	Teschemacherite	NH_4HCO_3
Iron	Iron carbonate	Siderite	$FeCO_3$
Sodium	Sodium nitrate		$NaNO_3$
กลุ่ม ง. อุปกรณ์ลด ฯ ในหม้อไอน้ำ			
Calcium	Calcium carbonate	Calcite	$CaCO_3$
	Calcium carbonate	Aragonite	$CaCO_3$
	Calcium aluminate		$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$
	Calcium phosphate	Phosphate	$Ca_3(PO_4)_2 \cdot H_2O$
Magnesium	Magnesium hydroxide	Brucite	$Mg(OH)_2$

ตารางที่ ๔.๑ ชนิดของตะกอนและวัตถุที่พบในหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบไอน้ำ ๔๑

ชื่อสามัญ	ชื่อทางเคมี	ชื่อทางแร่วิทยา	สูตรเคมี
กลุ่ม ๑. เครื่องกังหันไอน้ำ			
Copper	Copper metal	Native copper	Cu
Nickel	Nickel oxide	Bunsenite	NiO
Stellite	Stellite metal	Stellite	Co, Cr, W, C
Silicon	Silicon oxide	Quartz, Cristobalite	SiO_2
	Silicon oxide	Opal	$SiO_2 \cdot nH_2O$
Sodium	Sodium sulfate	Thenardite	Na_2SO_4
	Sodium carbonate-sulfate	Burkeite	$Na_2CO_3 \cdot 2Na_2SO_4$
	Sodium chloride	Halite	NaCl

ตารางที่ ๔.๑ การละลายของตะกอนที่เป็นอนุภัยกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ชื่อ	สูตร	การละลาย (g) ที่ 0°C	ที่ 100°C
แคลเซียมไบคาร์บอเนต	$Ca(HCO_3)_2$	16.2	ไม่มีข้อมูล
แคลเซียมคาร์บอเนต	$CaCO_3$	0.0013	0.0018
แคลเซียมซิลิเกต	$CaSiO_3$	0.1	
แคลเซียมซัลเฟต	$CaSO_4$	0.176	0.0661
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	$Ca(OH)_2$	0.185	0.077
แมกนีเซียมคลอไรด์	$CaCl_2$	59.5	74.5
แมกนีเซียมไนเตรต	$Ca(NO_3)_2$	102	363
แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต	$Mg(HCO_3)_2$	37.1	16.4
แมกนีเซียมคาร์บอเนต	$MgCO_3$	0.01	ไม่ละลาย
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์	$Mg(OH)_2$	0.0009	
แมกนีเซียมซัลเฟต	$MgSO_4$	17.4	71.0
แมกนีเซียมออกไซด์	MgO	0.0062	0.004
แมกนีเซียมไนเตรต	$Mg(NO_3)_2$	71.0	74.2
โซเดียมไบคาร์บอเนต	NaHCO	7.0	16.4
โซเดียมคลอไรด์	NaCl	35.7	39.8
โซเดียมซัลเฟต	Na_2SO_4	28.1	42.5
โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	42.0	347
โซเดียมไนเตรต	NaNO	73	180
โซเดียมไนเตรต	$NaNO_3$	73	180
เหล็กออกไซด์	Fe_2O	ไม่ละลาย	
อลูมินา	Al_2O_3	ไม่ละลาย	
ซิลิกา	SiO_2	ไม่ละลาย	

ที่มา (ดัดแปลง)

- ๑. แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมซิลิเกตเป็นตะกอนที่ละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้เกิดตะกอนแข็งเกาะติดผิวท่อได้ง่าย
- ๒. แคลเซียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซิลิเกตเป็นตะกอนที่ละลายน้ำได้น้อย
- ๓. ซิลิกา (SiO_2) และเหล็กออกไซด์เป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ
- ๔. แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้น้อยลงเมื่อ

ตัวอย่างที่ 5.1 ส่วนประกอบทางเคมีของหินปูนเมืองสระบุรี

สารประกอบ	หินปูนดิบ ร้อยละ	หินปูนเคลือบ ร้อยละ	หินปูนเคลือบและผึ่งลม ร้อยละ
$CaCO_3$	97.03	95.06	91.10
$Mg(OH)_2$	0.32	1.26	2.52
$CaSO_4$	0.28	0.17	0.34
SiO_2	1.02	2.31	4.60
ความชื้นและสิ่งอื่นๆ	-		0.69
$Fe_2O_3 + Al_2O_3$	1.30	1.19	0.74
น้ำหนักที่หายไปจากการเผา	0.04	0.02	0.01
รวม	99.99	100.00	98.35

ตัวอย่างที่ 5.2 ส่วนประกอบทางเคมีของสารกันเชิงซ้อนชนิดหนึ่ง

สารประกอบ	ร้อยละ
$Ba_3(PO_4)_2$	30
$CaSO_4$	13
Al_2O_3	12
$Ca_3(PO_4)_2$	8
SiO_2	8
Fe_2O_3	5
$Mg_3(PO_4)_2$	3
ZnO	1
Na_2O	1
MgO	1
Cu	1
อื่นๆ	8

ตะกันที่มีในระบบของเหลวไอออนน้ำจะทำให้ตะกอนมีขนาดเล็กลงมาก เนื่องจากตะกันจะดูดซับอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์ ทำให้เกิดแรงผลักไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคเล็กๆ ดังกล่าวเพิ่มขึ้น ตะกันจึงเป็นตัวทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพสูง ตะกันมีค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ที่ดีมาก ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลาย ยิ่งมีค่าการนำไฟฟ้าสูงมากเท่าใด ตะกันก็จะมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงขึ้นเท่านั้น

ตารางที่ 6.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตะกรันและวัสดุฉนวนของหม้อไอน้ำ

วัสดุหรือตะกรัน	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน บีทียู/ชั่วโมง ° F นิ้ว
Serpentine ($3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)	30
$Ca_3(PO_4)_2$	23
Magnetite (Fe_3O_4)	20
Iron oxide (Fe_2O_3)	19
Al_2O_3	17
$Mg_3(PO_4)_2$	15
$CaSO_4$	13
Anhydrite	8.5
$CaCO_3$	5.0
Silicate	1.9
Siliceous Scale (Porous)	0.7
Boiler Steel	360
Fire Brick	7
Insulation Brick	0.7

6.5 ผลเสียที่เกิดจากตะกรันและคราบ

การที่มีตะกรันและคราบหินปูนหรือผลึกของสารต่าง ๆ ในหม้อไอน้ำนั้นจะก่อให้เกิดผลเสียดังนี้

6.5.1 ทำให้ท่อบวมหรือระเบิดได้

โดยปกติแล้วเนื้อโลหะของหม้อไอน้ำ ท่อหม้อน้ำหรือท่อไอน้ำร้อนจะมีความหนาแน่นและมีความแข็งแรงพอที่จะรับอุณหภูมิที่สูงเท่านั้น

รูปที่ 6.11 ลักษณะท่อบวมโป่งออกเนื่องจากตะกรันและคราบภายในท่อ

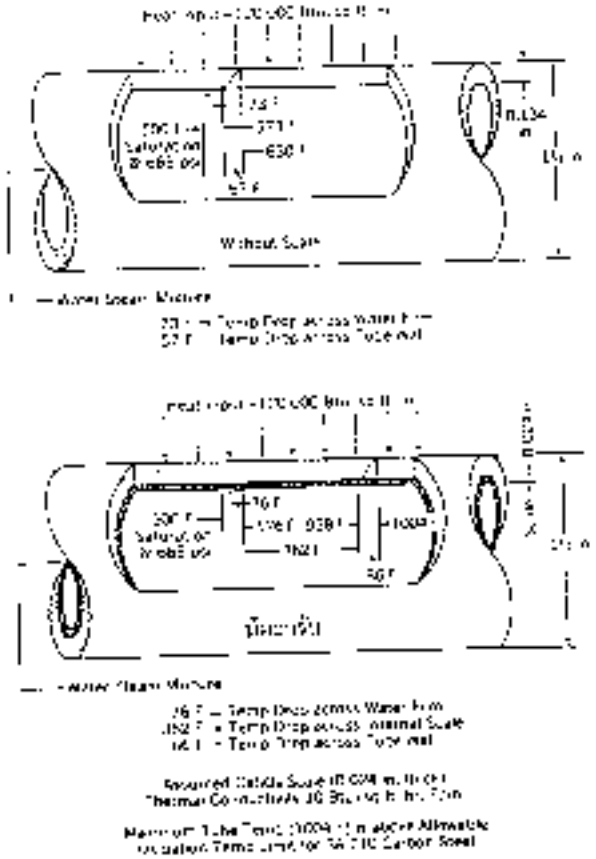
รูปที่ 8.13 ท่อเกิดปูดจากการเชื่อมจากนิคเกิลกรันเกาะภายในท่อ

ตารางที่ 8.7 ความเค้นสูงสุดของวัสดุที่อุณหภูมิต่าง ๆ เทียบความเค้น ปกนด์พลาสเรนิวา อุตสาหกรรมไทย

	ความเค้นที่กำหนด	400 °F	500 °F	600 °F	700 °F	800 °F	900 °F	1,000 °F
[illegible]	45,000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนที่ปกติ [illegible] เมื่ออุณหภูมิขณะใช้งานสูงกว่าประมาณ 800 °F ทั้งในกรณีที่เป็นการใช้งานแบบต่อเนื่องและต่อเป็นระยะตามปกติ

ในรูปที่ 8.14 แสดงการเกิดรอยร้าวที่ผิวด้านในของท่อที่ใช้งานในโรงงานแห่งหนึ่ง จากการวิเคราะห์ด้านในที่ผิวน้ำที่ไหลผ่านท่อ จากรูปนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านมีประมาณ 1,100 °F อุณหภูมิของผิวโลหะด้านในเป็น 1,200 °F และอุณหภูมิที่ผิวโลหะด้านนอกจะเป็น 1,400 °F แต่ในบริเวณที่มีสะเก็ดแคลเซียมซัลเฟตเกาะ [illegible] ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง และเป็นเหตุให้อุณหภูมิของโลหะบริเวณที่ [illegible] จึงทำให้อุณหภูมิของโลหะบริเวณที่ผิวด้านในและด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำและด้านที่สัมผัสกับสะเก็ดแคลเซียมซัลเฟตมีค่าสูงขึ้น 1,400 °F และในขณะเดียวกันความดันภายในจะมีอุณหภูมิสูงถึง 1,500 °F และอุณหภูมิที่ผิวโลหะบริเวณที่ข้างสูงถึง 1,200 °F ซึ่งอุณหภูมินี้จะสูงกว่าที่ [illegible] ที่ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนเสื่อมสภาพได้ ทำให้เกิดรอยร้าวในรูปของการแตกของผิวโลหะ เพราะมีรอยร้าวจากการเป็นด่างอยู่ด้านนอกที่ท่อรวมไปถึงการแตกนี้ด้วย

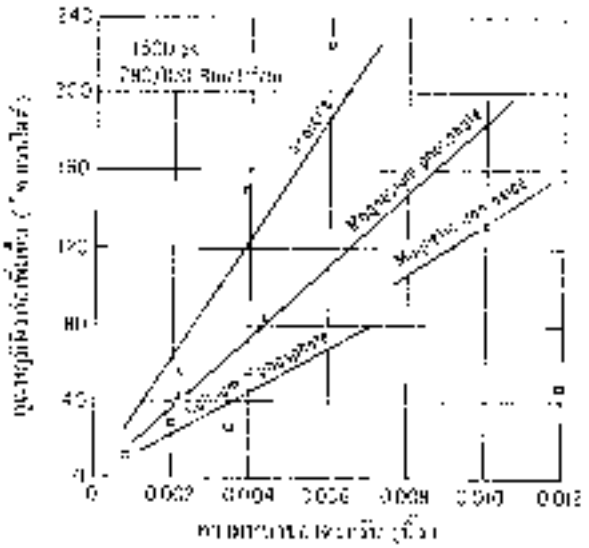


รูปที่ 8.14 ตัวอย่างการวินิจฉัยปัญหาในเตาให้ความร้อนที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผนังท่อ

Creep Rupture คือ การที่ท่อนั้นได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกินกว่าที่ให้ความร้อนสูงสุดได้ (Allowable Stress) การที่ท่อได้รับอุณหภูมิสูงนานๆ จะเกิดสิ่งผิดปกติขึ้นภายในเนื้อท่อ ทำให้ท่อนั้นมีความแข็งแรงลดลง จึงสังเกตได้ยากเพียงแค่ใช้ตาเปล่าดูไม่ได้ ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ช่วยในการตรวจสอบ ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นภายในเนื้อท่อนั้นเรียกว่า การเกิดโพรงเล็กๆ (Over Heating) ซึ่งก่อให้เกิดการแตกร้าวขึ้นตามแนวขอบเกรนของเนื้อท่อ ที่สุดท้ายจะเกิดการแตกร้าว (Intercrystalline) ขนาดของเกรนจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (Microstructure) เรียกว่าเกิดการ Spheroidization ขึ้นภายในเนื้อท่อ เนื่องจากได้รับความร้อนมากกว่า 480° C (900° F)

ตารางที่ 8.8 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผนังท่อ

	ด้านสัมผัสน้ำ °C	ด้านสัมผัสไฟ °C
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]



รูปที่ 8.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาและปริมาณของตะกรันต่าง ๆ

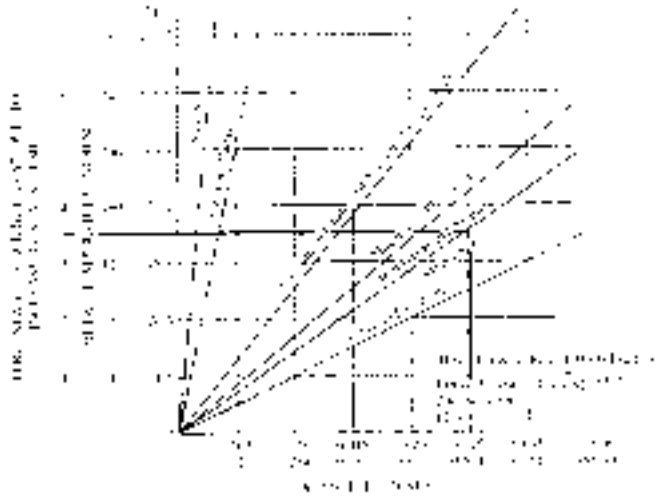
8.5.3 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลงเนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง

ตารางที่ 8.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตะกรัน และอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง

ความหนาของตะกรัน	นิ้ว	1/32	1/16	3/32	1/8
	มิลลิเมตร	0.79	1.59	2.38	3.17
การลดลงของอัตราการถ่ายเทความร้อน, ร้อยละ		9.5	20.2	31.2	42.0

จากตารางนี้ จะเห็นว่าเมื่อมีตะกรันหนา 1/8 นิ้ว จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง 42% ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้น้ำมันเตาจะถ่ายให้แก่น้ำน้อยลง ความร้อนส่วนที่ไม่ได้ถ่ายเทแก่น้ำจะติดไปกับก๊าซเสีย (Flue Gas) ทางปล่องไฟ อุณหภูมิของก๊าซเสียจะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลง

ในรูปที่ 8.16 ถ้ามีตะกรันเหล็กออกไซด์หนา 0.025 นิ้ว (0.634 มิลลิเมตร) จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซเพิ่มขึ้น 38° C ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจะลดลง 3.5 %



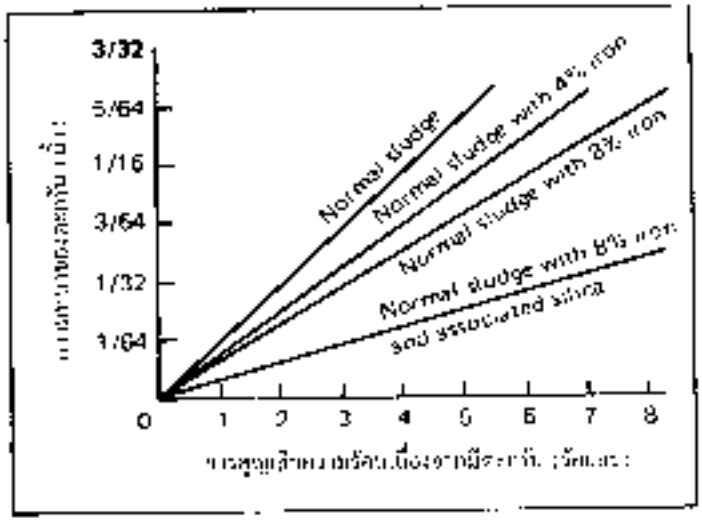
รูปที่ 8.16 ความสัมพันธ์ของตะกรันจับจากการเพิ่มขนาดฟองโฟม และการสูญเสีย
ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเนื่องจากการเพิ่มขนาดฟองโฟม

8.5.3 สิ่งปนเปื้อนเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

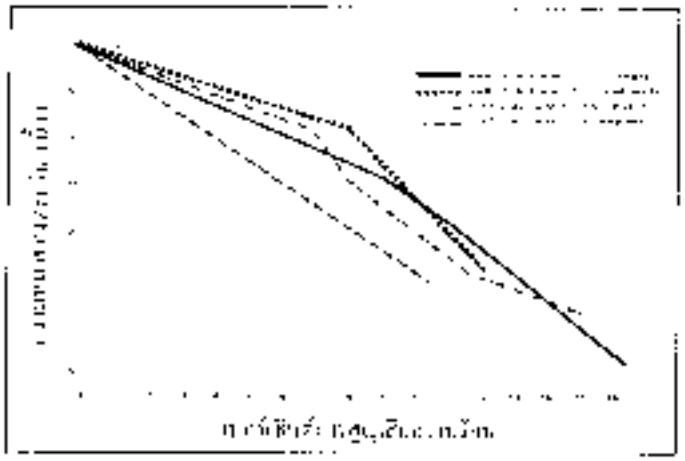
จากข้อ 8.5.2 จะเห็นได้ว่า แม้มีสะเก็ดเกาะที่ผนังท่อเพียงเล็กน้อยก็ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงได้มาก จึงผลิตไอน้ำได้น้อยลง ถ้าต้องการรักษาอัตราการผลิตไอน้ำเดิมไว้ต้องเพิ่มเชื้อเพลิงมากขึ้น จึงสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้นเท่าที่ควรจะเป็นหากไม่มีสะเก็ดเกาะ

ตารางที่ 8.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตะกรันและอัตราการสูญเสียเชื้อเพลิง

ความหนาของตะกรัน (มม.)	0.5	1	2	3	4	5	6
การสูญเสียเชื้อเพลิง (%)	1.1	2.2	4.3	6.5	8.7	10.9	13.2



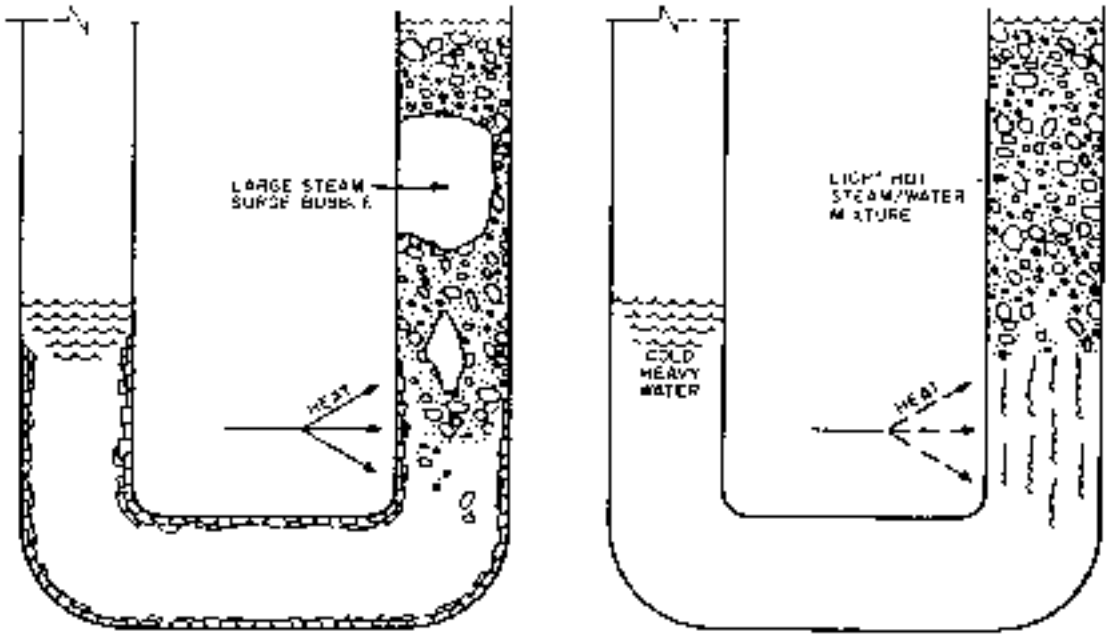
รูปที่ 8.17 การสูญเสียความร้อนในการขาดประสิทธิภาพ เนื่องจากมีตะกรันเกาะที่ความหนาต่าง ๆ



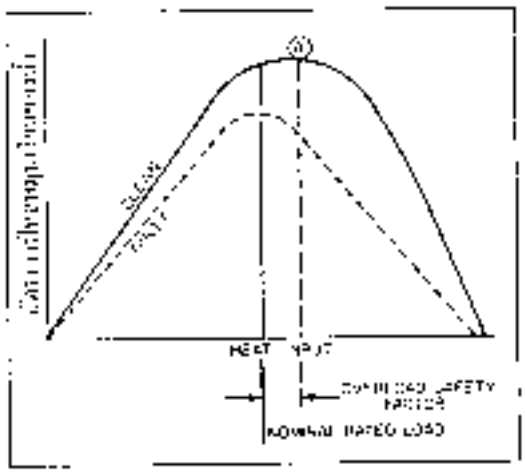
รูปที่ 8.13 การลดลงความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่ความดันต่าง ๆ

8.8 การผลิตไอน้ำในท่อที่มีตะกรัน

ตัวอย่างของการใช้งานของหม้อน้ำความร้อนสูงที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ ดังรูปที่ 8.14 น้ำที่มีคุณภาพดีจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบหม้อน้ำด้านซ้ายมือ ซึ่งเป็นหม้อน้ำแบบท่อไหลลง ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นจากการเผาไหม้ น้ำแข็งจะเริ่มเกิดขึ้นและเกาะติดกับผิวท่อ น้ำจะเริ่มมีการหมุนเวียนไหลขึ้นสู่ด้านบน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของน้ำและความร้อน ซึ่งจะทำให้น้ำมีอัตราการไหลหมุนเวียนได้



รูปที่ 8.14 แสดงการเกิดไอน้ำในท่อ (ซ้าย) ท่อมีตะกรัน (ขวา) ท่อละลายปราศจากตะกรัน



รูปที่ 8.20 ความสัมพันธ์ระหว่างผิวการไหลของหมุนเวียนและความร้อนที่ใส่ให้กับระบบหม้อไอน้ำ

บรรณานุกรม

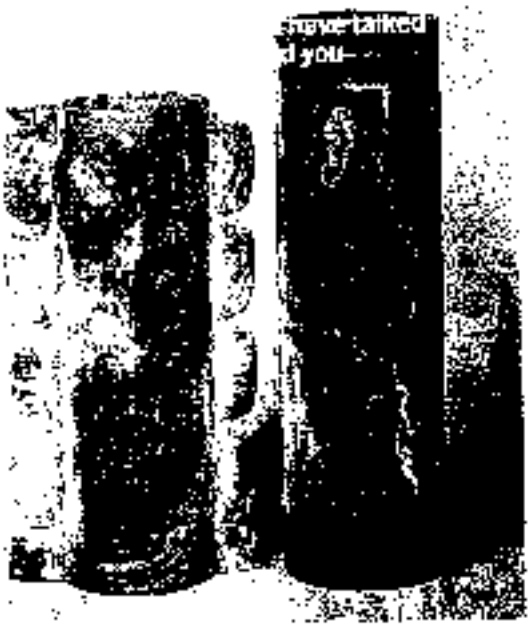
1. ฉวางค์ บุตรเสรีย. "การกัดกร่อนในหม้อน้ำ" วารสารเคมีวิศวกรรม-เทคโนโลยีทางอาหารและเชื้อเพลิง 2 ฉบับที่ 1 (มกราคม, 2528)
2. **Betz Handbook of Industrial Water Conditioning.** 8th edition Betz Laboratories, Inc.
3. **B & W Steam its Generation and Use.** The Babcock and Wilcox Co., 1978.
4. Clarke, F.E. and Hopkins, R.D. "Significance of Boiler Deposit Analysis." **Industrial and Engineering Chemistry** (May 1954).
5. Cowan, J.C. and Weintritt, D.J. **Water-Formed Scale Deposits.** Gulf Publishing, 1976.
6. Drew. **Principle of Industrial Water Treatment.** Drew Chemical, 1978.
7. Francies, W. **Boiler House and Power Station Chemistry.** London : Edward Arnold (Publishers), 1968
8. Harrison, C.B. **Manual on Water** ASTM Special Technical Publication 442A. American Society for Testing and Materials, 1978.
9. Herman, K.W. **Cause and Cures of Waterside Problems in Industrial Boiler Systems.** Drew Chemical, 1978
10. Higgings, A. and Bonka, S.M. **Boiler Room Question and Answers.** New York : McGraw-Hill Book Co., 1978.
11. HMSO. **The Efficient Use of Fuel.** London : Her Majesty's Stationary Office, 1958.
12. Jackson, C. "Deposits in Boiler." **Industrial and Engineering Chemistry** (May 1964).
13. Kramer, F.N. **The NALCO Water Handbook.** New York : McGraw-Hill Book Co., 1979
14. Powell, S.T. **Water Conditioning For Industry.** New York : McGraw-Hill Book Co., 1954.
15. Shields, C.D. **Boilers Types, Characteristics, and Functions** New York : McGraw-Hill Book Co., 1982
16. Spreg es, K.S. **Principles of Desalination.** New York : Academic Press, 1980.
17. Spurrs, H.M. **Boiler Operator's Guide.** New York : McGraw Hill Book Co., 1979.

9 การกัดกร่อนในหม้อไอน้ำและการป้องกัน

ตอนที่ 1 ด้านสันผิวไฟ (Fire Side)

ปัญหาเรื่องการกัดกร่อนในหม้อไอน้ำนั้นมีทั้งด้านสัมผัสกับน้ำ และด้านที่สัมผัสกับแก๊สร้อน การกัดกร่อนด้านหลังนี้ ปกติมักจะไม่ค่อยมีการกัดกร่อนมากนัก ซึ่งที่จริงแล้วแก๊สร้อนจะมีประกอบด้วย ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ และก๊าซเสีย (Flue Gas) มีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ และอุปกรณ์อื่น ๆ ในหม้อไอน้ำที่ใช้ เช่น เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง (Economizer) เครื่องอุ่นอากาศไหม้ (Air preheater) ฯลฯ การกัดกร่อนนี้จะทำให้มีการชำรุดของท่อ การชำรุดส่วนใหญ่จะเกิดจากความร้อนสูงเป็นบริเวณกว้าง ๆ ซึ่งสาเหตุของปัญหาการกัดกร่อนด้านไฟนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากเถ้า (Ash) และสารตกค้าง (Deposits)
2. การกัดกร่อนที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากสภาพเป็นกรดของก๊าซเสีย



รูปที่ 9.1 แสดงการกัดกร่อนและคราบสกปรกจับด้านนอกของท่อซึ่งสัมผัสกับไฟ

[illegible]

ตารางที่ 9.1 พิกัดคุณสมบัติน้ำมันเตา

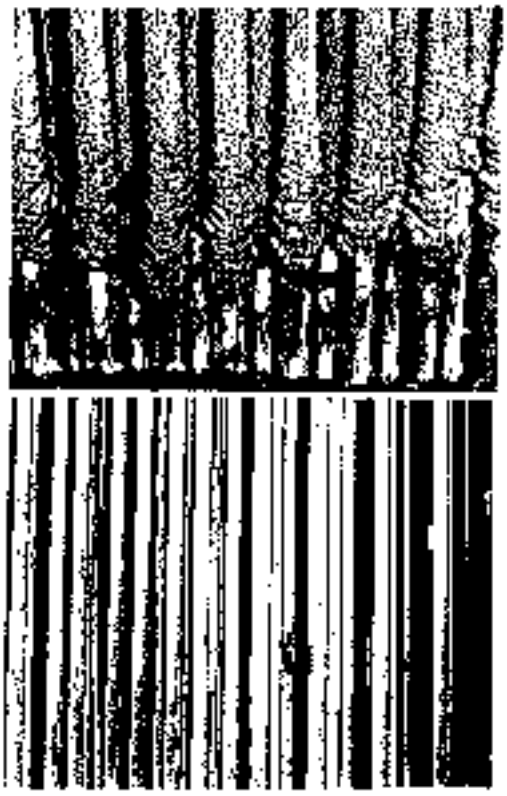
[illegible]	น้ำมันเตา A	น้ำมันเตา B	น้ำมันเตา C
Flash Point PMcc °C min.	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Neutralization Value			
Strong Acid Number mgKOH/g	Nil	Nil	Nil
Sediment by Extraction % wt max.	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Specific Gravity at [illegible] °F max.	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Sulfur Content % wt max.	[illegible]	1.5	[illegible]
Viscosity Redwood I at [illegible] °F sec.	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Water Content % vol max.	[illegible]	[illegible]	[illegible]

9.1 เถ้าในน้ำมันเตา

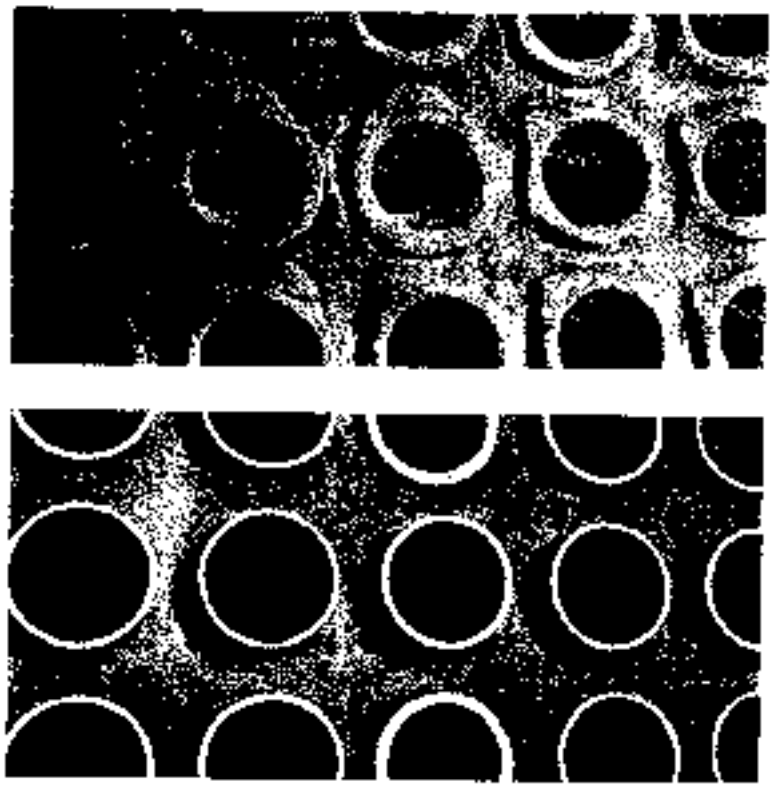
[illegible]

รูปที่ 9.2 [illegible]

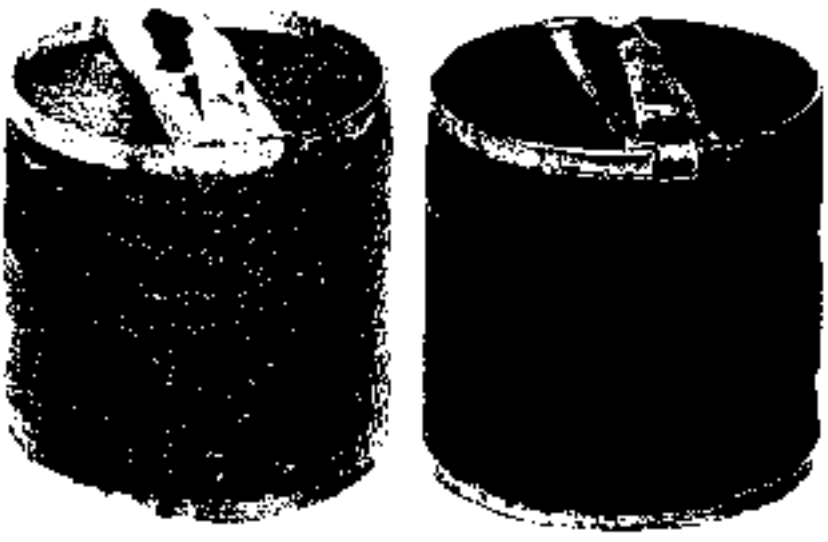
รูปที่ ๑.๑ ตะกรันเกาะจับที่เกิดในเตาหลอมสังกะสี



รูปที่ ๑.๒ เปรียบเทียบเนื้อที่ของตะกรันเกาะจับหลังจากใช้สารเคมีแล้ว
ทอละลายออกจากตะกรันเกาะจับในหม้อไอน้ำขนาดย่อม



รูปที่ 9.5 ลายในหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ (Firetube)
(ก) ใบใหม่ใช้ (ข) ใบที่ใช้แล้ว



รูปที่ 9.6 แสดงไส้กรองน้ำมัน
(ก) ไส้กรองน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้ว (ข) ไส้กรองใหม่

ตารางที่ 5.2 ตารางประกอบของเถ้าในน้ำมันเตาบางชนิด

ชนิดของน้ำมันเตา	High Vanadium	Low Vanadium
ปริมาณเถ้าทั้งหมด	0.02	0.02
ร้อยละต่อน้ำหนักของตัวอย่าง		
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

ที่มา [illegible]

โดยทั่วไปแล้วในน้ำมันดิบจะมีสารประกอบพวกโลหะ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบโลหะพอร์ไฟริน (Oil-Soluble Organo Porphyrin Complex) และในรูปของสารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ด้วย ส่วนประกอบของเถ้าในน้ำมันเตาจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของน้ำมันดิบนั้นๆ ตามปกติแล้วน้ำมันดิบจากแหล่งต่างๆ ในประเทศตะวันออกกลาง เช่น น้ำมันดิบอาหรับเบา (Arabian Light Crude) จะมีปริมาณของวานาเดียมต่ำ และในน้ำมันดิบจากแหล่งต่างๆ ในทวีปอเมริกาเหนือ เช่น น้ำมันดิบเวเนซูเอลา (Venezuela Crude) จะมีปริมาณของวานาเดียมสูง ส่วนน้ำมันดิบจากแหล่งต่างๆ ในทวีปเอเชีย เช่น น้ำมันดิบมินัส (Minas Crude) จากประเทศอินโดนีเซีย จะมีปริมาณของโซเดียมสูง

รูปที่ 5.2 แสดงเม็ดเพลอยแสดงเหล็กเกาะจับด้วยเม็ดเพลอยแสดงประกอบด้วย MgO V_2O_5-Na_2O ซึ่งจะพบว่ามี $Mg_3V_2O_8$ และ $NaVO_3$ เพราะน้ำมันเตานี้มีโซเดียม MgO ด้วย

ตารางที่ ๙.๑ ส่วนประกอบของเถ้าจากเผาน้ำมันดิบต่าง ๆ

	Venezuela	Texas	California	Middle East
Ash Analysis, %				
SiO_2				
V_2O_5				
Fe_2O_3				
CaO				
MgO				
$Na_2O + K_2O$				
V_2O_5				
Ni				

๙.๑.๒ การแก้ไขในการกัดกร่อน

น้ำมันเตาที่จะเผาในหม้อน้ำ จะต้องนำไปผ่านขั้นตอนการแยกน้ำและตะกอนออกก่อน เพื่อให้มีการเผาไหม้สมบูรณ์ หลังจากการเผาไหม้แล้วจะมีวานาดิกอยู่ การที่มีปริมาณวานาดิกสูงขึ้นเกินกว่าค่าที่กำหนดนั้น ในขณะที่มีการเผาไหม้สมบูรณ์หรือไม่ ในขณะที่มีการเผาไหม้อยู่ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของวานาดิกจะสูงขึ้น ซึ่งวานาดิกและยูเทคติกซิลิเกตที่เป็น V_2O_3, V_2O_4 และเกลือที่เป็น V_2O_5 แม้ว่าปฏิกิริยาการเกิดซิลิเกตจะเกิดขึ้นในสมบูรณ์ก็ตาม ความเสียหายส่วนใหญ่นั้นเนื่องจากการเกิดเกลือที่เป็น V_2O_5 อยู่ในรูปของเหลว ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะที่อยู่ในรูปของเกลือวานาเดตที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะนั้น ๆ ซึ่งเกลือวานาเดตที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะนั้นจะทำปฏิกิริยากับ Na_2SO_4 และความเข้มข้นของวานาดิกในน้ำมันเตาประมาณร้อยละ ๑๐ ของโซเดียมซัลเฟต ซึ่งจะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะนั้นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีวานาดิกเป็นองค์ประกอบ ดังนี้

$$Na_2SO_4 + V_2O_5 \longrightarrow 2NaVO_3 + SO_3\uparrow$$

จุดหลอมเหลว 1,625 °F 1,275 °F 1,165 °F

จากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นได้ว่าจุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด ซึ่งจุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในช่วง 1,500-1,900 °F แต่ที่จุดหลอมเหลวของโลหะที่ 1,500 °F จะถูกทำลายไปอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิของโลหะอยู่ในช่วง 1,700-1,900 °F จะค่อนข้างมีปัญหามาก แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,500 °F จะมีการเกิดของเหลวอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก และจะไม่เข้าทำลายพื้นผิวโลหะที่สัมผัสอยู่

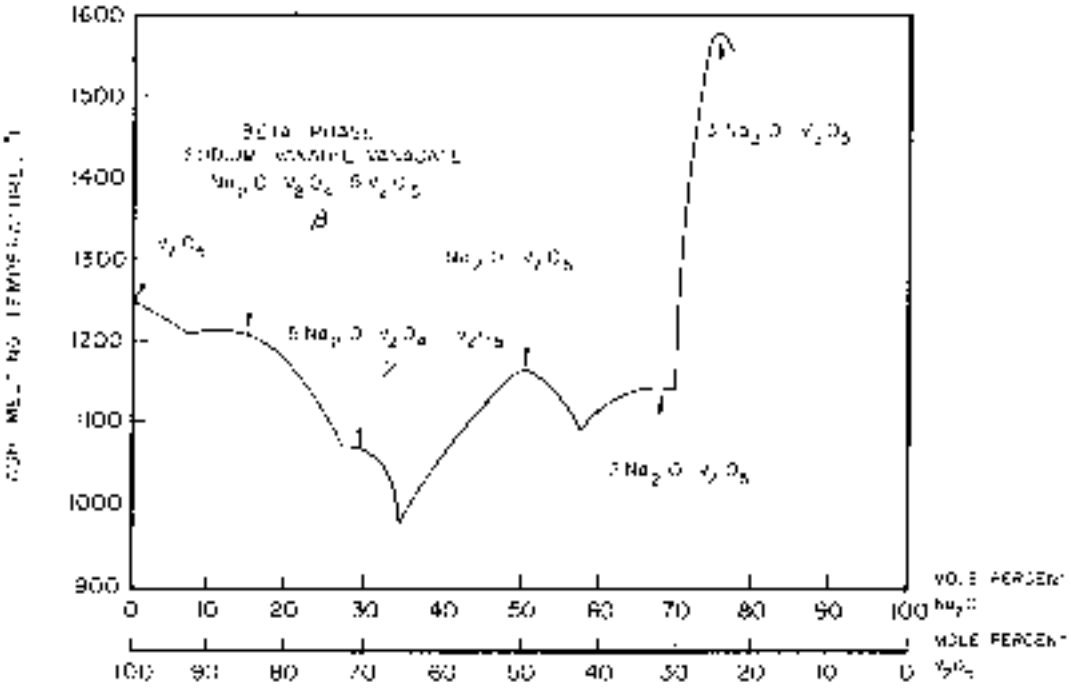
เมื่อเครื่องยนต์ทำงานด้วยน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของ Superheater Reheater ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 °F จะมีการกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อยมาก นอกจากนี้การเผาน้ำมันให้เป็นส่วนผสมสมบูรณ์จะทำให้เกิดสแลก (Slag) ในระดับต่ำ ซึ่งสแลกนี้จะมีโซเดียมและวานาดิกเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 1500-1,900 °F ที่มีลักษณะเหนียวเหนียวดังตารางที่ ๙.๒

ตารางที่ ๑.๑ จุดหลอมเหลวของสารประกอบบางชนิดที่พบในถ่านหินลิกไนต์

สารประกอบ	จุดหลอมเหลว (°C)
Aluminium oxide, Al_2O_3	2,072
Aluminium silicate, Al_2SiO_5	1,810
Calcium oxide, CaO	2,576
Calcium sulfate, $CaSO_4$	1,460
Ferric oxide, Fe_2O_3	1,565
Ferric sulfate, $Fe_2(SO_4)_3$	480
Magnesium oxide, MgO	2,852
Magnesium sulfate, $MgSO_4$	1,124
Nickel oxide, NiO	1,984
Nickel sulfate, $NiSO_4$	840
Silicon dioxide, SiO_2	1,650
Sodium sulfate, Na_2SO_4	1,884
Sodium bisulfate, $NaHSO_4$	315
Sodium pyrosulfate, $Na_2S_2O_7$	400
Vanadium monoxide, VO	1,789
Vanadium sesquioxide, V_2O_3	1,970
Vanadium pentoxide, V_2O_5	1,971
Sodium metavanadate, $NaVO_3$	630
Sodium pyrovanadate, $Na_4V_2O_7$	640
Sodium orthovanadate, Na_3VO_4	857
Nickel pyrovanadate, $Ni_2V_2O_7$	1,060
Nickel orthovanadate, $Ni_3(VO_4)_2$	1,060
Ferric metavanadate, $Fe(VO_3)_3$	1,300
Ferric vanadyl, $FeVO_4$	1,971
Sodium vanadyl vanadate, $NaVO_3 \cdot VOV_2O_5$	1,000

๑.๒ ลักษณะของตะกรันจากเตาหม้อ

ตะกรันจากเตาหม้อที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงมีลักษณะแตกต่างกันตามชนิดของถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้ ตะกรันที่เกิดจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณเถ้าต่ำ จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็กคล้ายทราย ส่วนตะกรันที่เกิดจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณเถ้าสูง จะมีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ ตะกรันที่เกิดจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณกำมะถันสูง จะมีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ และมีสีเข้มกว่าตะกรันที่เกิดจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ



รูปที่ 9.8 เฟสไดอะแกรม Na_2O V_2O_5

9.2.1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกาะยึดของตะกรัน

1. ส่วนประกอบทางเคมีมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่เป็นองค์ประกอบที่ไม่มีโมเลกุลคู่ ตัวอย่างเช่น สารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น V_2O_5 มีจุดหลอมเหลว 1275 °F (690 °C) เมื่อทำปฏิกิริยากับ Na_2SO_4 ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 1625 °F (885 °C) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ V_2O_5 ถึงแม้ว่าปริมาณของสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะมีเพียงเล็กน้อย แต่ก็สามารถทำให้เกิดการเกาะยึดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,050 °F (566 °C) ได้ และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนที่รุนแรงมากขึ้น ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

2. หน้าของผลึกและสารประกอบที่มีความสำคัญมาก ตามปกติแล้วผลึกจะมีรูปร่างหลายเหลี่ยม เช่น มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 900 °F (Superheat Temperature) หน้าผลึกนี้ก็ไม่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 900 °F ดังนั้นจึงทำให้เกิดปัญหานี้

3. ผิวของการเกิดตะกรันจะต้องไม่เปราะจนเกินไป เพื่อป้องกันการแตกหักจากความเค้นเนื่องจากความร้อน

4. ปริมาณของเหลวที่ผิวหน้า (Surface Liquid)

ถึงแม้ว่าจะมีของเหลวอยู่ก็ตาม ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเกาะยึดของตะกรันได้ ถ้าของเหลวนั้นมีปริมาณน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าของเหลวนั้นมีความหนืดสูง

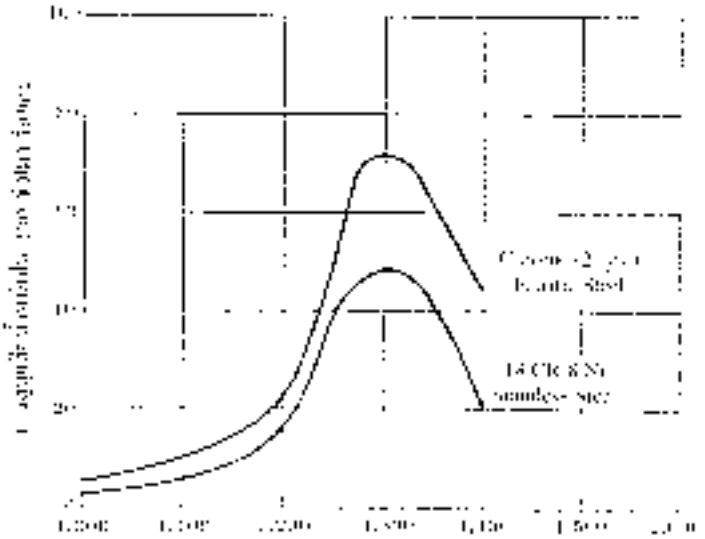
๙.๓ การจัดการส่วนผสมต่างๆของเหล็กอุณหภูมิสูง

ในการผลิตเหล็กให้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการ จำเป็นต้องมีการเติมธาตุต่างๆ ที่อุณหภูมิสูงเข้าไป ซึ่งธาตุที่อุณหภูมิสูงเข้าไปนี้ จะทำให้เกิดออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังนี้

1. FeO (wustite)
2. Fe_3O_4 (magnetite)
3. Fe_2O_3 (hematite)

ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้น ธาตุที่เกิดขึ้นจะเข้าไปแทนที่ Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeO เป็นต้น ซึ่งธาตุ ... ที่อุณหภูมิสูงนี้ ... ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะมีคุณสมบัติ ... ป้องกันการเกิดออกซิเดชันต่อไปได้ ... ในขณะที่เกิดออกไซด์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นนี้ ... ในการผลิตเหล็กให้ได้ตามต้องการ ... ในการเติมธาตุต่างๆ ... ตารางที่ ๙.๑ ตัวอย่างเนื้อเหล็กสำหรับอุณหภูมิสูง ๆ

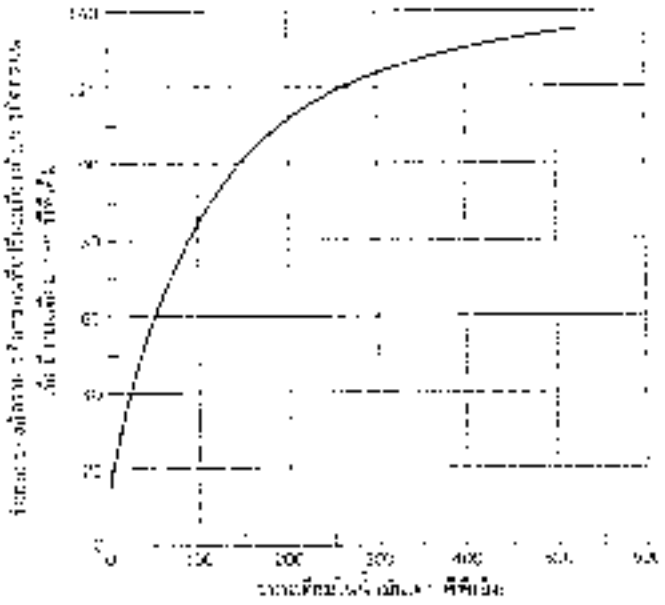
อุณหภูมิสูงสุดของการใช้งาน	C	Si	Ni	Cr	W
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...



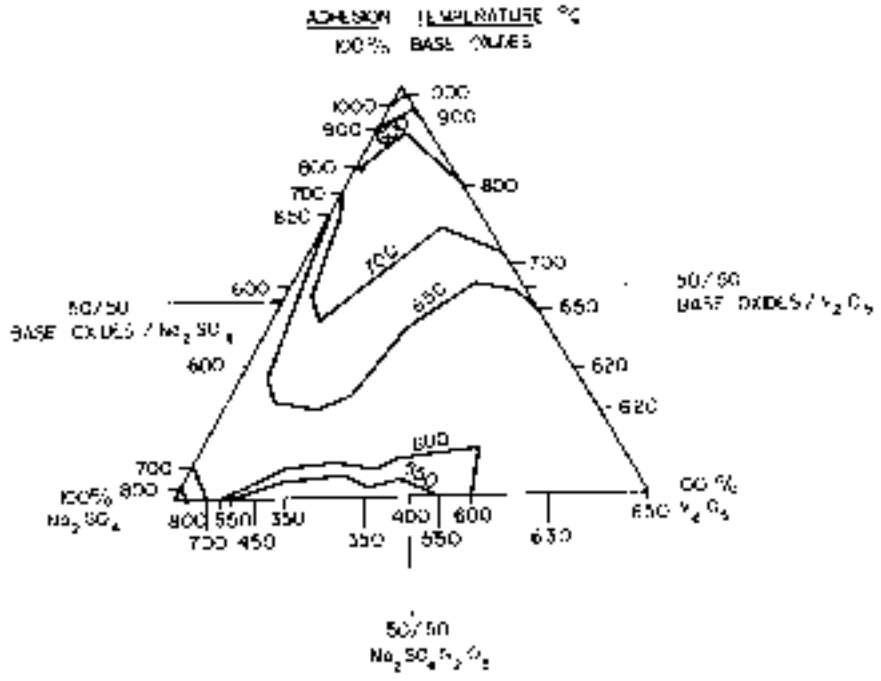
อุณหภูมิ ... องศาเซลเซียส

รูปที่ ๙.๑ ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการกัดกร่อน

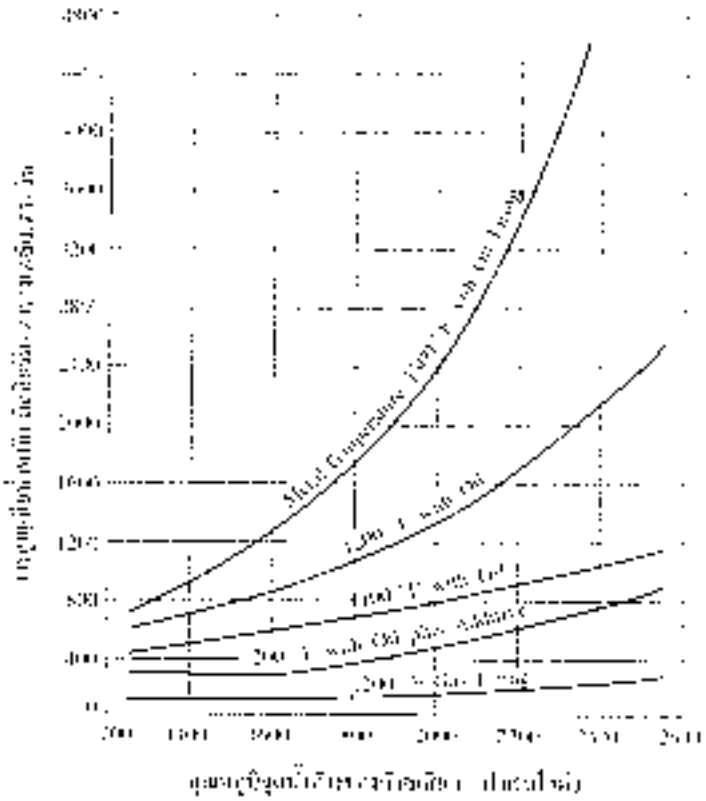
รูปที่ 9.6 การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงของหัวเทียนเครื่องยนต์ที่เกิดจากสารประกอบวานาเดียมและโซเดียม



รูปที่ 9.7 ปริมาณวานาเดียมในน้ำมันและที่มีต่ออัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 9.12 แสดง Adhesion Temp. ของเถ้าและสารเจือต่างๆของเถ้าระหว่าง V_2O_5 และ Na_2SO_4



รูปที่ 9.11 ผลของอุณหภูมิของโลหะ อุณหภูมิก๊าซเสีย และการใช้สารเคมีต่ออัตราการกัดกร่อนของโลหะรวม

9.3.2 การป้องกันการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง

วิธีที่ประหยัดและประสบผลสำเร็จที่สุด ที่จะลดการกัดกร่อนที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีโลหะผสมอยู่ในนั้น ก็คือการเติมสารเคมีที่เรียกว่า Fuel Oil Additives ลงไปในน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็น Ash Modifier เปลี่ยนโครงสร้างของเถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ให้มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น จะได้อยู่ในสภาพที่ไม่เหนียวติดกันเป็นก้อนแข็ง ซึ่งสามารถกำจัดออกได้ง่ายโดยการเป่าด้วยไอน้ำ หรือล้างด้วยน้ำ ตารางที่ 9.6 แสดงตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 9.6 อุณหภูมิหลอมเหลวของ Fuel Oil Additives ต่างชนิด

	อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า °F
Magnesium oxide, MgO	5,072
Aluminum oxide, Al_2O_3	3,700
Calcium oxide, CaO	4,662
Magnesium aluminate, $MgAl_2O_4$	3,727
Manganese oxide, MnO_2	2,500

สารยับยั้งที่นิยมใช้ได้แก่ สารประกอบของโซเดียมดังนี้

1. **ซิลิกาซีเมนต์** ได้แก่ ดินขาว (Kaolinite, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) หินฟันม้า (Diatomaceous Earth) สารประกอบ Organometallic Silicon ซึ่งสารที่ใช้ทำให้ได้ผลดีและประหยัดที่สุดคือ ดินขาว ซึ่งมีปริมาณซิลิกาสูงถึง 50%

2. **หินปูนโดโลไมต์และแมกนีเซีย (Dolomite & Magnesia)** ซึ่งมีองค์ประกอบ $CaCO_3$ ให้ความร้อนสูงถึง 1,000 °C จะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ ในกรณีที่ต้องการยับยั้งปฏิกิริยาการจับกับ SO_3 ไว้ ในการใช้งานจริงนั้นจะใช้ปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่ต้องการยับยั้งไว้ สำหรับแมกนีเซีย (MgO) ให้ผลดีกว่าปูนขาว เพราะให้ผลเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ในขณะที่ปูนขาวเมื่อทำปฏิกิริยากับ SO_3 แล้วจะได้ผลเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการสึกกร่อนได้ง่าย ดังนั้นการใช้แมกนีเซียจึงเป็นที่นิยมมากกว่าปูนขาว แมกนีเซียมีปริมาณที่เหมาะสมที่จะใช้ในการยับยั้งปฏิกิริยาของ V_2O_5 ได้ดังนี้

$$3MgO + V_2O_5 \rightarrow (MgO)_3 \cdot V_2O_5$$

และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับ SO_3 จะเกิดขึ้นระหว่าง MgO กับ $MgSO_4$ ที่เกิดขึ้น ได้ Magnesium pyrovanadate

$$3MgSO_4 + V_2O_5 \rightarrow 3MgO \cdot V_2O_5 + 3SO_3$$

ตารางที่ 1.7 จุดหลอมเหลวของสารประกอบในระบบ $MgO - V_2O_5 - SO_3$

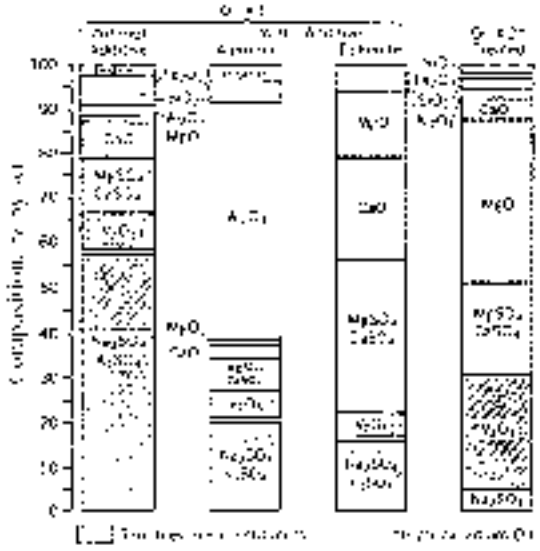
สารประกอบ	จุดหลอมเหลว (°F)
V_2O_5	1,275
$3MgO \cdot V_2O_5$	1,715
$MgSO_4$	2,185
$2MgO \cdot V_2O_5$	1,895
MgO	4,660

3. **สารยึด** หรือ Binder ซึ่งมีอยู่ในดินขาว ($Kaolin: Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ที่ผสมลงในเชื้อเพลิงเหลว

Kaolin มีประสิทธิภาพในการป้องกันได้ดีที่ 1,800 °F และที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ Kaolin จะทำปฏิกิริยากับ Sodium aluminum silicate ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ที่เป็นสารป้องกันได้ดีกว่า V_2O_5 และยังสามารถทำปฏิกิริยากับ $MgSO_4$ หรือ $CaSO_4$ อยู่ด้วย

$$MgSO_4 + V_2O_5 + Kaolin \rightarrow 3MgO \cdot V_2O_5 + Al_2O_3 \cdot SiO_2 + MgSiO_3 + MgAl_2O_4 + SO_3$$

นอกจากนี้ยังมีพวก Organo magnesium ซึ่งมีสมบัติคล้ายกับแมกนีเซีย แต่มีข้อดีกว่าตรงที่ Al_2O_3 ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาสามารถทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้นประมาณ 2,000 °F ซึ่งสามารถลดการเกิดจุดอ่อนตัวของขี้เถ้าได้ดีกว่าแมกนีเซีย ประมาณ 200 °F ทำให้สามารถใช้ในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ และยังมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ไม่ทำให้เกิดการสึกกร่อนกับท่อไอน้ำได้ด้วย



รูปที่ ๓.๓๓ ตัวอย่าง Fuel-oil additives ผลิตภัณฑ์ต่างประเทศ

คุณสมบัติและรายละเอียดดังนี้		
Particle Size Range, Microns	:	1-7
Color Variation	:	ขาว
Surface Area, ft²/lb	:	150,000
Contaminants, % :	Calcium Oxide, CaO	0.5
	Silica, SiO_2	0.3
	Iron, Fe_2O_3	0.2
Magnesia Purity	: 99.5%	
Alumina Purity	: 99.5%	

๓.๔ การกัดกร่อนที่อุณหภูมิต่ำ (Low-temperature Corrosion)

การกัดกร่อนที่อุณหภูมิต่ำ จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำป้อนต่ำกว่าจุดน้ำค้างของไอน้ำที่มีอยู่ในก๊าซไอเสีย ซึ่งมีค่าประมาณ ๑๓๐ °F หรือต่ำกว่าในกรณีที่มีซัลเฟอร์ในน้ำมันเชื้อเพลิงสูง เช่น Fuel oil, Kerosene

การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ จะทำให้เกิดการรวมตัวของกำมะถันกับออกซิเจนกลายเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และเมื่อมีไอน้ำอยู่ด้วยก็จะรวมตัวกันเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง

ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิต่ำ มีดังนี้

๑. น้ำป้อนที่มีค่าความกระด้างสูง จะทำให้เกิดการกัดกร่อนและการสะสมของตะกรันได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ

๒. เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (SO_2) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนสูงมาก ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ครีบอุ่นน้ำเดือด (Economizer) และเครื่องอุ่นอากาศ (Air Heater)

ก. เกิด SO_3 จาก SO_2 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก

ข. ซัลเฟอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ดังสมการ

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

$$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$$

ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังกล่าวข้างต้นนั้น ถ้าเชื้อเพลิงประกอบด้วยกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ก็จะมีปฏิกิริยาดังสมการข้างต้น ซึ่งปริมาณที่จะถูกออกซิไดซ์ให้เป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสม SO_2/SO_3 และความดันย่อย ๆ ของก๊าซทั้งสองนี้ ในการเผาไหม้ถ่านหินหรือน้ำมันเตาที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ปริมาณ SO_3 ที่ออกสู่บรรยากาศจะมีประมาณ 1% ของปริมาณ SO_2 ที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เชื้อเพลิงมีกำมะถันต่ำ ๆ ปริมาณ SO_3 ที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำกว่านี้ ในกรณีที่เชื้อเพลิงมีกำมะถันสูง ๆ ปริมาณ SO_3 ที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่านี้ ปริมาณ SO_3 ที่เกิดขึ้นนี้ ส่วนหนึ่งจะถูกดักจับไว้ด้วยเขม่าเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปลิวไปกับก๊าซไอเสีย ส่วนที่เหลือจะรวมตัวกับไอน้ำในอากาศกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ในรูปของไอกรด ปริมาณ SO_3 ที่เกิดขึ้นนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ ปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ ความดันย่อยของไอน้ำในก๊าซไอเสีย และอุณหภูมิของก๊าซไอเสีย ในกรณีที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก เช่น ในกรณีของการผลิตกรดซัลฟิวริกจากกำมะถันธาตุ (Sulphur) นั้น ปริมาณการเกิด SO_3 ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น Air Heater Leakage ในหน่วยผลิตกรด ปริมาณ SO_3 ที่ออกสู่บรรยากาศจากหน่วยผลิตกรดซัลฟิวริกจากกำมะถันธาตุนี้ จะมีค่าประมาณ 0.5% ของปริมาณ SO_2 ที่เกิดขึ้น

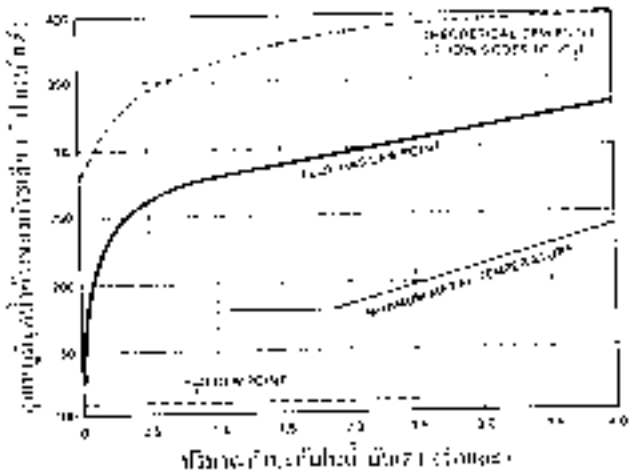
ในการเดินเครื่องหม้อไอน้ำที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงนั้น ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนของผิวโลหะในส่วนพื้นผิวที่สัมผัสกับก๊าซไอเสียที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ซึ่งเกิดจากการควบแน่นของไอน้ำนั้นได้ ถูกจำกัดให้มีขอบเขตที่แคบลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการที่ได้มีการออกแบบเครื่องอุ่นอากาศ (Steam Air Heater) ขึ้นมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น Air Heater ของหม้อไอน้ำที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ที่ได้ออกแบบให้มีอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศที่ไหลผ่านเข้าสู่ Air Heater ไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริก (Acid Dew Point) ซึ่งทำให้อุณหภูมิของผิวโลหะที่สัมผัสกับก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริกด้วย ทำให้การกัดกร่อนของผิวโลหะที่สัมผัสกับก๊าซไอเสียลดน้อยลงไปได้มาก ดังนี้

ก. ลดการเกิด SO_3 ในห้องเผาไหม้ให้เกิดน้อยที่สุด

ข. ทำการดักจับ SO_3 ในก๊าซไอเสียให้ได้มากที่สุด

ค. ทำให้อุณหภูมิของผิวโลหะที่สัมผัสกับก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริก

9.4.1 จุดน้ำค้างของกรด (Acid Dew Point)

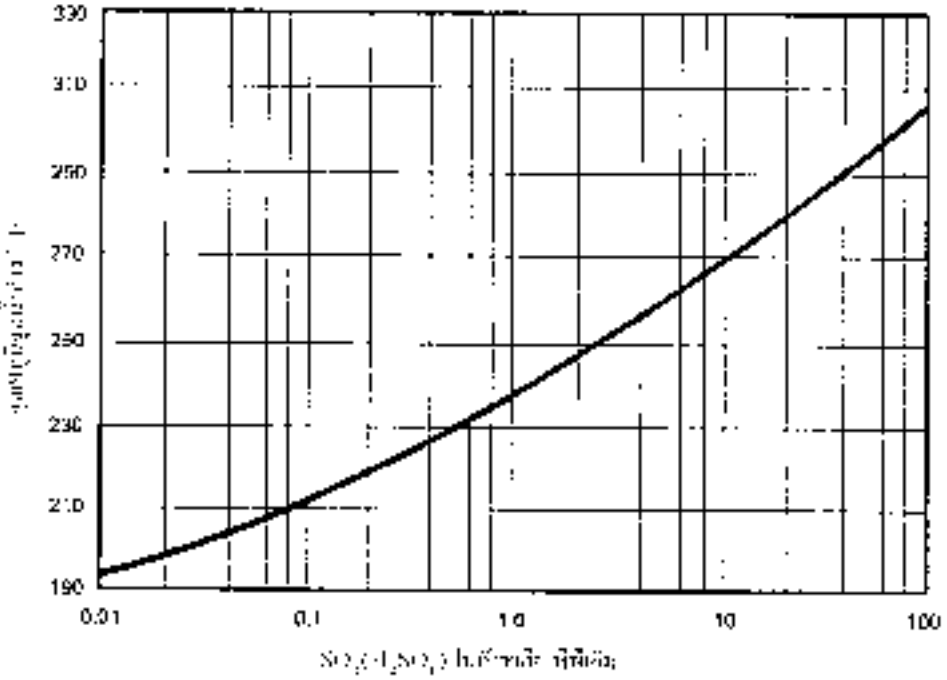


รูปที่ 9.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันในน้ำมันเตากับจุดน้ำค้างของกรดในก๊าซไอเสีย

จุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นของกรด $H_2SO_4 + H_2O$ ในก๊าซไอเสีย ขึ้นกับความเข้มข้นของ $H_2SO_4 + H_2O$ ในกรดและความดันย่อยของไอน้ำ ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิของก๊าซไอเสียและปริมาณของ SO_3 ที่ผสมอยู่ในก๊าซไอเสีย SO_3 จะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นกรดซัลฟิวริก

$$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$$

จุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริกจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณของไอน้ำในก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ หรือการใช้น้ำในกระบวนการต่างๆ เช่น การใช้น้ำในหอดูดซึมก๊าซ SO_2 ในกระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก เป็นต้น ดังนั้นจุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริกจึงขึ้นกับปริมาณของไอน้ำในก๊าซไอเสียด้วย ดังแสดงในรูปที่ 9.16



รูปที่ 9.16 กราฟของ Muller แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ SO_3 ในก๊าซไอเสียกับจุดน้ำค้างของกรด

นอกจากนี้ จุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริกจะลดลงเมื่อปริมาณ SO_3 ในก๊าซเสียลดลง ในกระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริกนั้น ปริมาณของ SO_3 จะน้อยลงได้ ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 9.3.2 การวัดจุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริกในกระบวนการปฏิบัติงานจริง จะทำให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากขึ้น การวัดปริมาณ SO_3 ทำได้ยากกว่า จะเห็นว่าแก๊สที่มี SO_3 เพิ่มขึ้น จุดน้ำค้างของกรดจะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 9.15 และ 9.16 พอจะสรุปได้ว่า อัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อปริมาณของไอน้ำลดลง ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Excess Air) ปริมาณของออกซิเจน ซึ่งจะทำให้มีการเกิด SO_3 เพิ่มขึ้น ทำให้จุดน้ำค้างของกรดสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ ๖.๑ ปริมาณ SO_2 และ SO_3 ที่ตกค้างของเครื่องอุณหภูมิเย็นของหม้อไอน้ำ

หมายเลขน้ำ	CO_2	SO_2, ppm	SO_3, ppm
๑	๑	๑	๐.๐๐๐
๒	๑.๗	๑	๐.๐๐๐
๓	๑.๖	๑	๐.๐๐๐
๔	๑	๑	๐.๐๐๐
๕	๑.๗	๑	๐.๐๐๐
๖	๑	๑	๐.๐๐๐
๗	๑.๘	๑	๐.๐๐๐
๘	๑.๖	๑	๐.๐๐๐

[illegible] SO_2 [illegible] H_2SO_3 [illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

9.4.2 การป้องกันและการแก้ไขการกัดกร่อนที่อุณหภูมิต่ำ มีหลายวิธี คือ

1. ผิวแร่ที่มีกำมะถันและโซเดียมต่ำ
2. ปรับปรุงวิธีการใช้งานหม้อไอน้ำ
3. การใช้สารเคมี

1. **การเลือกใช้น้ำมันเตาหรือน้ำมันชนิดดีขึ้น เพื่อให้มีกำมะถันน้อยที่สุด** ซึ่งมีวิธีการที่ทำได้ง่าย ๆ คือ ผสมน้ำมันเตาที่มีกำมะถันสูงกับน้ำมันเตาที่มีกำมะถันต่ำ

2. **การปรับปรุงวิธีการใช้งานหม้อไอน้ำ**

(1) หลีกเลี่ยงการทำงานที่ผิวของโลหะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้างของกรดที่อุณหภูมิประมาณ 121 - 149 °C ซึ่งต้องออกแบบให้มีการผสมและสัมผัสกันของแก๊สร้อนกับอากาศที่อุณหภูมิสูงขึ้น

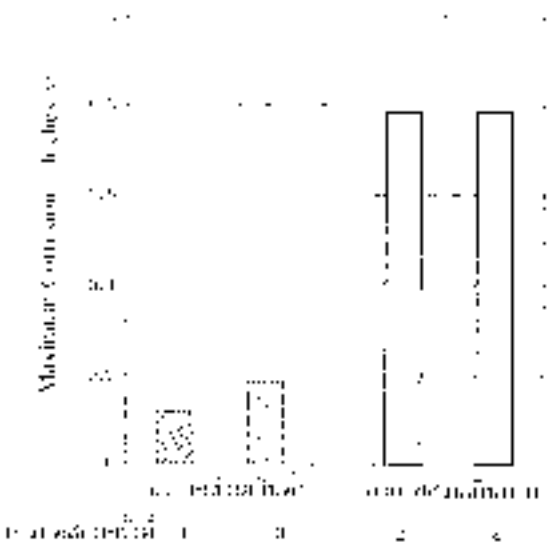
(2) ในการเดินเครื่องยามเริ่มเดินเครื่อง (Smoke) ให้มีการปรับ ค่าอัตราส่วนอากาศ SO$_2$ ต่อ SO$_3$ โดยการใช้สารประกอบวานาเดียม V$_2$O$_5$ ช่วย

(3) หลีกเลี่ยงการใช้โลหะเจือผสมที่ทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาออกซิไดซ์ SO$_2$ เป็น SO$_3$

(4) ใช้ Steam Atomization ในการฉีดพ่นน้ำมันเตาเพื่อลดปริมาณ SO$_3$ ให้น้อย

(5) ใช้การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ก่อนปล่องควัน เพื่อลดอุณหภูมิแก๊สร้อนให้ต่ำกว่าจุดน้ำค้างของกรดกำมะถันเล็กน้อย ทั้งนี้อาจลดอุณหภูมิแก๊สร้อนลงมาประมาณ 121 °C ก็ได้ ดังรูปที่ 9.11 ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ปล่องควันและท่อแก๊สร้อนลดลงมาก

(6) ใช้การผสมอากาศส่วนเกินต่ำในการเผาไหม้ ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในแก๊สร้อน ให้มีปริมาณน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ปริมาณการเกิด SO$_3$ ลดลงด้วย แต่ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วย ไม่ให้เกิดควันดำ และเขม่าเกาะที่ผิวท่อ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง

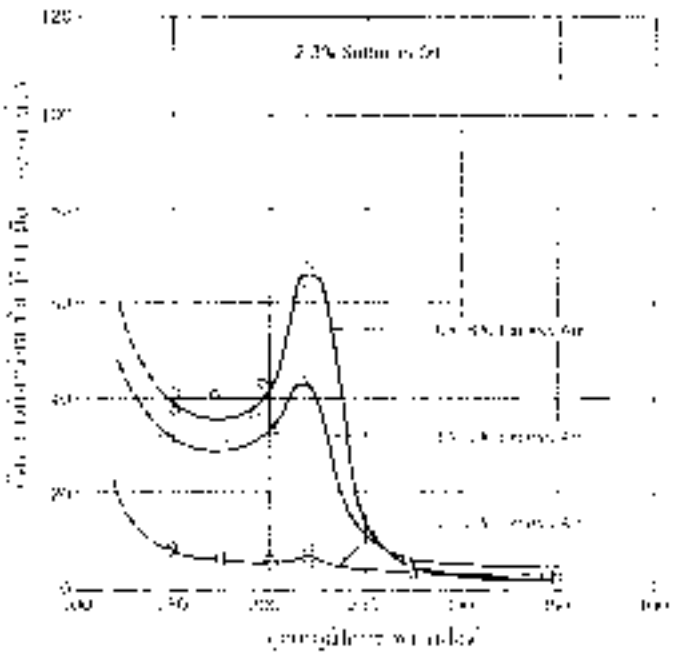


รูปที่ 9.11 ผลของการใช้อากาศส่วนเกินต่ำในการเผาไหม้ต่ออัตราการกัดกร่อน

ในรูปที่ 9.17 เป็นการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่อุณหภูมิห้อง 25°C ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นของเกลือ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความใกล้เคียงกับน้ำทะเล ที่ความดันต่างๆ กัน ตั้งแต่ความดันบรรยากาศ ถึง 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (69 บาร์) เห็นได้ว่าอัตราการกัดกร่อนจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความดันสูงขึ้นจากความดันบรรยากาศ ถึงประมาณ 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (14 บาร์) ซึ่งเป็นช่วงที่ละลายออกซิเจนได้มาก หลังจากนั้นอัตราการกัดกร่อนจะค่อยๆ ลดลง เมื่อความดันสูงขึ้น เนื่องจากการละลายของออกซิเจนลดลง

ตารางที่ 9.9 การลดอัตราการกัดกร่อนโดยการเติม SO_2 และจุดน้ำค้างของกรดที่ความดันต่างๆ ของก๊าซหินปูน

หม้อไอน้ำ	ออกซิเจนในก๊าซเสีย ร้อยละ	SO_2 ppm	จุดน้ำค้างของกรด °F
1	3.0	2.0	270 - 275
	4	4.0	290 - 300
2	1.0	1.0	250
	1.0	3	280
3	1.0		270
	1.0		280
4	1.0	1.0	
	1.0	2	



รูปที่ 9.16 ผลของปริมาณออกซิเจนในไอเสียส่วนเกิน ที่มีต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่อุณหภูมิต่ำ

จะเกิดได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ และมีความดันสูง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนกับอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านเข้าไปในหอดูดซึมจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซึม และเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้จะเกิดการตกผลึกของน้ำแข็งขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการอุดตันและไม่ให้ผ่านต่อไป

3. **การใช้สารเคมี** สารเคมีที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซ SO_2 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้ดูดซึม ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

(1) **ของแข็ง** ที่นำมาใช้ในการดูดซึมก๊าซ SO_2 ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต ปูนขาว ปูนขาวดับน้ำ และโซดาแอช ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1.1) Magnesium oxide (MgO) ทำปฏิกิริยากับ SO_2 ได้ผลิตภัณฑ์คือ $MgSO_3$ ซึ่งเป็น $MgSO_4$

(1.2) Magnesium carbonate หรือเรียก Magnesite ใช้งานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 120-150°C ซึ่งเกิดผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับแมกนีเซียมออกไซด์ ทำงานเช่นเดียวกับ SO_2 ในการดูดซึมได้ดีกว่าแมกนีเซียมออกไซด์

(1.3) ปูนขาวหรือหินปูน ปูนขาวหรือหินปูนมีข้อดีและข้อจำกัดในการใช้งานแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน ในกรณีการดูดซึมก๊าซ SO_2 ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ปูนขาวมีราคาถูกกว่าหินปูน แต่ต้องนำมาผ่านกระบวนการเผาและดับน้ำก่อน ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ส่วนหินปูนมีราคาถูกกว่าปูนขาว แต่ต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อนใช้งาน ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบดหินปูนให้ละเอียดด้วย

(1.4) ปูนขาวดับน้ำ ใช้ดูดซึมก๊าซ SO_2 ได้ดีกว่าหินปูน และมีราคาถูกกว่าโซดาแอช

(1.5) วานาเดียม-อะลูมินา ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมนี้ จะใช้ทำปฏิกิริยากับ V_2O_5 และ K_2O ทำให้การดูดซึมสามารถเกิดขึ้นได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดน้ำค้างของกรดซัลฟิวริก SO_3 ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนกับท่อ และเป็นการลดมลพิษของกรดซัลฟิวริกที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศได้ด้วย

(1.6) ซิงค์ออกไซด์ โดยการดูดซึมด้วยซิงค์ออกไซด์นั้นจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างซิงค์ออกไซด์กับก๊าซ SO_2 ได้ผลิตภัณฑ์ซิงค์ซัลไฟต์ (Zinc oxide Smoke) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนกับสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ SO_2 ที่มีความเข้มข้นสูง และได้ซิงค์ออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการดูดซึมก๊าซ SO_2 ได้อีกครั้ง

(1.7) $MgSO_3$ หรือแมกนีเซียมซัลไฟต์ (CaO) ในกระบวนการนี้จะใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการดูดซึมก๊าซ SO_2 ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแมกนีเซียมซัลไฟต์ ($MgSO_3$) ซึ่งสามารถนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อให้ได้ก๊าซ SO_2 ที่มีความเข้มข้นสูง และได้แมกนีเซียมออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ได้

(2) **ของเหลว** ได้แก่ Tertiary amine, Teramonium Pyridine ซึ่งเป็นผลผลิตได้จาก Coal Tar ที่ผ่านกระบวนการกลั่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 170°F (77°C) ซึ่งจะมีน้ำมันดินส่วนหนึ่งที่ยังคงอยู่ ซึ่งใช้ได้ดีกับก๊าซร้อน และสิ่งสกปรกที่เป็นของเหลว โดยการใช้เป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 170°F (77°C) ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของท่อ ทำให้ Tertiary amine จะมีประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซ SO_2 ได้ดีกว่า Pyridine ถึงแม้ว่าจะมีราคาแพงกว่าก็ตาม

(3) **ถ่านหิน** ที่นิยมใช้ในการดูดซึมก๊าซ SO_2 ในกระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก ถ่านหินที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซ SO_2 ได้ดีที่สุดจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 100 mesh ซึ่งใช้ได้ดีกับก๊าซร้อน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 170°F (77°C) จึงจะใช้ได้ดีที่สุด

$$SO_3 + NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4HSO_4$$

$$NH_4HSO_4 + NH_3 \longrightarrow (NH_4)_2SO_4$$

พบว่าปฏิกิริยาระหว่าง NH_3 กับ SO_3 จะเกิดได้ดีที่สุด เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 300-400 °F (148-205 °C) โดยเติมแอมโมเนียให้มีปริมาตรเป็นสองเท่าของ SO_3 หรือคิดเป็นกรัมต่อไฮโดรเจน 0.05-0.25% ต่อน้ำหนักของน้ำมันเตา ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณ SO_3 ที่มีอยู่ในก๊าซไอเสีย ถ้าหากปฏิกิริยาเกิดที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ NH_3 อาจจะทำปฏิกิริยากับ SO_3 ได้ และถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปปฏิกิริยาของ NH_3 ก็จะเกิดเป็นแอมโมเนียมไบซัลเฟต (NH_4HSO_4) ซึ่งมีความเป็นกรดสูง มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนและสึกหรอได้ดีกว่าความสกปรก โดยจะทำลายคอล Air Heater ทำให้ต้องทำความสะอาดทุก ๆ 10 วัน

จากการทดลองโดยทำการฉีดแอมโมเนียเข้าไปในก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิ 600 °F (316 °C) และมีอุณหภูมิของพื้นผิวโลหะ 450 °F (232 °C) พบว่าการลดลงของอุณหภูมิจาก 350 °F เป็น 300 °F ได้ นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดควันของเขม่าได้ดีระดับ 70-80

9.5 Fuel Oil Additives ในเชื้อเพลิง

ในน้ำมันเตาปัจจุบัน มีหลายบริษัทที่ผลิตสารเคมีให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ กันดังนี้

ก. มีคุณประสงค์สองประการหรือหลายประการ สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดจากน้ำมันเตาที่ใช้งานและสิ่งแวดล้อมได้

ข. มีคุณประสงค์เดียวสำหรับแก้ไขปัญหาน้ำมันเตาในการเผาไหม้

ดังนั้น Fuel Oil Additive ที่สามารถแก้ไขปัญหาได้หลายอย่างนั้น จะมีส่วนผสมของสารต่าง ๆ ดังนี้คือ

1. **Aromatic Carrier หรือ Solvent Carrier** จะต้องมีความสามารถในการละลายน้ำมันเตาทุกชนิดได้ ส่วนมากจะใช้สารประกอบพวก Aromatic Solvent ที่มีคุณสมบัติละลายน้ำมันที่จะมีคุณสมบัติในการดักจับความชื้นนี้ สามารถไม่ทำให้เกิดการ Polymerization จากโมเลกุลของน้ำมันซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสารตกค้างหรือสลัดจ์ (Sludge) ได้

2. **Emulsifier or Emulsion Breakers** ในกรณีที่มีน้ำมันน้ำมันผสมกันเป็นอิมัลชัน และไม่สามารถในการแยกน้ำจากกันได้ง่าย ก็จะเติมสารจำพวก Emulsifier ลงในน้ำมันเตา ซึ่งจะทำให้น้ำแตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่วในน้ำมันเตา ในไม่ช้าเม็ดน้ำนี้จะมารวมตัวกันใหญ่ขึ้น และตกตะกอนลงสู่ก้นถังเก็บ ซึ่งจะถ่ายออกได้ ในกรณีที่น้ำมันเตาผสมกันเป็นอิมัลชันอยู่แล้ว ก็จะเติม Emulsion Breaker ลงไป น้ำจะแตกตัวออกจากกันและตกตะกอนลงสู่ก้นถังเก็บ ซึ่งจะถ่ายออกได้

3. **Dispersants** สารพวกนี้จะช่วยให้ Fuel Oil Additive ที่เติมลงในน้ำมันเตาสามารถแตกตัวกระจายได้ทั่วทั้งน้ำมันเตา

4. **Anti-oxidants** น้ำมันเตามีแนวโน้มที่จะจับออกซิเจนในอากาศ เมื่อมีไฟในห้องเผาไหม้ ซึ่งจะเป็นเหตุทำให้เกิดสลัดจ์ สารจำพวก Aromatic amine และพวก Phenolic จะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ของน้ำมันเตาได้ จึงป้องกันมิให้เกิดสลัดจ์ขึ้น

5. **Anti-corrosive Agents** เช่นพวก Emulsion Breaker โดยมากจะเป็นพวก Amine ซึ่งจะไปเกาะอยู่บนผิวโลหะที่บอบบางและจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำ เข้าผิวโลหะได้ นอกจากนี้ยังมีการเติมสารที่มีสภาพเป็นด่างเข้าไปเพื่อเพิ่ม pH ซึ่งจะลดการเกิดกรดของกลุ่มไอน้ำมันได้

6. **Combustion Catalyst** สารโลหะบางอย่างจะช่วยให้การเผาไหม้ของน้ำมันดีขึ้น สารเหล่านี้ได้แก่ Organic Manganese, Organic Iron และ Organic Lead สารเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ขึ้น

7. **SO_3 Inhibitors** สารจำพวกนี้จะผสมปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ SO_2 ให้เป็น SO_3 ส่วนมากนี้จะไปรวมตัวกับแคลเซียม หรือป้องกันมิให้ SO_2 ทำปฏิกิริยากับ O_2 กลายเป็น SO_3 หรือเป็นตัวขัดขวางมิให้สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น V_2O_5, Fe_2O_3 ทำหน้าที่การปฏิกิริยากลายเป็น SO_3 ได้

8. **Ash Modifiers** โลหะการโลหะบางอย่าง ซึ่งส่วนมากจะเป็นโลหะ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม และแบเรียม จะไปเปลี่ยนแปลงสภาพของเถ้าหรือไปเปลี่ยนโครงสร้างของเถ้าทำให้มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น ปัญหาของกรดกัดกร่อนก็จะลดน้อยลงไปด้วย

9. **Smoke Suppressants** สารประกอบของโลหะต่าง ๆ เช่น แบเรียม แคลเซียม และแมกนีเซียม จะไปลดอุณหภูมิการเผาไหม้ของเขม่าให้ต่ำลง ทำให้เขม่าสามารถเผาไหม้ได้ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ทำให้เขม่าไหม้ได้สมบูรณ์

ตัวอย่าง Fuel Oil Additive ที่ทำหน้าที่ต่างกันอย่าง

โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ใช้ผสมกับน้ำในห้องหม้อไอน้ำ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับเขม่าและขี้เถ้าที่เกาะอยู่ตามพื้นที่ผิวต่าง ๆ ทำให้เขม่าและขี้เถ้าเหล่านี้เป็นเนื้อเดียวกันไม่จับตัวแข็งกระด้าง ซึ่งสามารถทำให้ล้างออกได้ง่าย นอกจากนี้ยังป้องกันการกัดกร่อนของผิวโลหะที่เกิดจากไอน้ำมันที่ร้อนและกรดซัลฟิวริก

การกำจัดการจับของ Unburnt Carbon ในการเผาไหม้น้ำมันเตาในเครื่องยนต์นั้น จะมีการเผาไหม้ไม่หมดเกิดขึ้นเสมอ ๆ ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนไปกับคาร์บอน

จะเห็นได้จากมีผงถ่านคาร์บอนหลายชนิด เมื่อนำมาผสมกับน้ำมันจะทำให้ผิวของผงถ่านมีความชอบน้ำมันมากขึ้น ดังสมการปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

$$2\,KNO_3 + 2C \longrightarrow 2\,KNO_2 + 2CO$$

$$2\,KNO_2 + C \longrightarrow K_2O + 2NO + CO$$

จะกำจัดการจับของผงถ่านคาร์บอนนี้ได้โดยการผสมน้ำมันเตากับน้ำ เมื่อไปเกาะอยู่ที่ผิวของผงถ่านคาร์บอนด้วยความร้อนต่ำ ๆ ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำดีขึ้น ส่วนโซเดียมไนเตรต KNO_3 จะไปละลายน้ำในหม้อไอน้ำและกำจัดออกทางน้ำระบายทิ้ง (Sweet-blowing) ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำต่าง ๆ ที่ปะปนอยู่ในละอองน้ำ เช่น เกลือคลอไรด์ จะหลุดออกมาได้ในรูปของไอน้ำที่ออกมาด้วย

9.6 การกัดกร่อนเนื่องจากกรดกำมะถัน

ในน้ำมันเตาที่มีกำมะถันอยู่ เมื่อมีการเผาไหม้จะเกิดก๊าซไอเสียที่ประกอบด้วยไฟฟ้าในรูปของ SO_2 เป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่จะถูกออกซิไดซ์เป็น SO_3 เมื่อ SO_3 สัมผัสกับไอน้ำหรือละอองน้ำจะรวมตัวกันกลายเป็นไอกรดกำมะถัน ซึ่งมีจุดควบแน่นสูงมาก ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดกำมะถัน คือมีช่วงอุณหภูมิ 120-160 °C หรือมากกว่านี้ กรดกำมะถันที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดการกัดกร่อนในท่อเหล็กเรียบอุ่นน้ำเลี้ยง เหนือจุดควบแน่นไอน้ำ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การที่เกิดการกัดกร่อนของกรดกำมะถันนี้ เนื่องจากอุณหภูมิของผิวโลหะต่ำกว่าจุดน้ำค้างของกรดนั่นเอง (เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ไหลผ่านผิวถ่ายเทความร้อน (Heat Exchange Surface) สำหรับอุ่นน้ำป้อนจะลดต่ำลง ในกรณีที่มีโซเดียมหรือโพแทสเซียมอยู่ด้วย จะเกิดการกัดกร่อนขึ้นเช่นกัน เช่น KNO_3 จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดได้ดังนี้

$$2\,KNO_3 + H_2SO_4 \longrightarrow K_2SO_4 + 2\,HNO_3$$

กรดกำมะถันจะทำปฏิกิริยากลายเป็นกรดดินประสิวหรือกรดไนตริก (HNO_3) ที่มีจุดน้ำค้างของกรดต่ำกว่า 60 °C ซึ่งในการกัดกร่อนจะไม่มีผลกระทบที่มีอุณหภูมิต่ำขนาดนี้ จึงไม่มีปัญหาการกัดกร่อนจากการนี้ นอกจากนี้ยังมีโซเดียมประสิวยังทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและซิลิกาได้ดังนี้

$$4\,HNO_3 \longrightarrow O_2 + 4\,NO_2 + 2\,H_2O$$

$$2\,NO_2 + 2\,C \longrightarrow 4\,CO + N_2$$

$$2\,CO + O_2 \longrightarrow 2\,CO_2$$

โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่กล่าวมาแล้วนั้น เป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน มี pH = 7 ซึ่งเป็นกลาง ไม่ละลายน้ำ และไม่มีปัญหาในเรื่องนี้

9.7 การกัดกร่อนเนื่องจากวานาเดียม

วานาเดียมในน้ำมันเตาเมื่อเกิดไหม้จะถูกออกซิไดซ์เป็นวานาเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 650 °C เมื่อมีโซเดียมหรือโพแทสเซียมเข้าไปเกี่ยวข้องในกระบวนการเผาไหม้ด้วย จะเกิดสารประกอบโซเดียมวานาเดตขึ้น ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำลงมาก ประมาณ 535 °C ซึ่งจะเกิดการหลอมเหลวและไหลไปตามผิวโลหะที่มีอุณหภูมิสูงกว่านี้ ในขณะที่ยังมีก๊าซผสมอยู่ด้วย ทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการกระทำร่วมกันของการหลอมเหลวและการกัดกร่อนด้วยก๊าซร้อน ซึ่งเรียกว่าการกัดกร่อนแบบวานาเดต ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงมาก ในกรณีที่มีโซเดียมซัลเฟตอยู่ด้วย จะทำปฏิกิริยากับ V_2O_5 ได้โซเดียมวานาเดต ซึ่งให้ผลในการกัดกร่อนและมีจุดหลอมเหลวต่ำลงมาก ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ (ปฏิกิริยาที่ 1 และ 2)

$$2\,KNO_3 + V_2O_5 \longrightarrow 2\,KVO_3 + N_2O_5$$

$$6\,KNO_3 + V_2O_5 \longrightarrow 2\,K_3VO_4 + 3\,N_2O_5$$

$$12\,KNO_3 + 2\,V_2O_5 \longrightarrow 4\,K_3VO_4 + 12\,NO_2 + 3\,O_2$$

ส่วนไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกคาร์บอนที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ต่อไป

$$2\,NO_2 + 2\,C \longrightarrow 2\,CO + N_2$$

$$2\,CO + O_2 \longrightarrow 2\,CO_2$$

นอกจากนี้ การมี V_2O_5 ยังลดพลังงานของปฏิกิริยาการเปลี่ยน SO_2 เป็น SO_3 ด้วย เพราะในปฏิกิริยาการเกิด SO_3 จาก SO_2 นี้ V_2O_5 จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น

$$2\,SO_2 + O_2 \xrightarrow{V_2O_5} SO_3$$

ดังนั้น เมื่อ V_2O_5 เกิดน้อยลง SO_3 จึงเกิดน้อยลงด้วย ซึ่งจะเป็นผลให้มีกรดซัลฟิวริกเกิดน้อยลงเช่นกัน

บรรณานุกรม

1. **พิกัดคุณสมบัติของน้ำมันเตา.** บริษัท เชลล์แห่งประเทศไทย จำกัด
2. Andrade, R.C. and Galesa, L.R. "Need for Fuel Oil Additives Grows." **Power Engineering** (February 1977).
3. Andrade, R.C. and Oschell, F.L. "Cold End Treatment Programs." **Combustion** (December 1978).
4. Babcock & Wilcox. **Steam/Its Generation and Use.** New York : The Babcock and Wilcox Co., 1978
5. Central Electricity Generating Board. **Modern Power Station Practice.** Vol.5. Oxford : Pergamon Press, 1971.
6. **Chemical Product Bulletin.** 10 92b U.S.A : Calgon Corporation.
7. Dolezal, R. **Large Boiler Furnace - Theory, Construction and Control.** Amsterdam : Elsevier Publishing Co., 1967
8. Francis, W. **Fuel and Fuel Technology.** Vol. 2. : Pergamon Press, London, 1966.
9. **Fuel-Oil Additives, Technical Information.** Tokyo : Taiho Industries Co.
10. Goldberg, H.J. and Bennett, R.P. "The Control of Cold End Acidic Corrosion in Oil-Fired Utility Boilers." **Combustion** (December 1970).
11. Heuvel, H.M.J.v.d. **Lecture on Ingredients and Working of Fuel Oil Additives.** New York : The Petrolin Co.
12. Kubaschewski, O. and Hopkins, B.E. **Oxidation of Metals and Alloys.** London : Butterworths, 1967.
13. Lees, R. "Magnesium Based Additives Reduce High Temperature Problems in Large Oil-Fired Boiler in Europe." **ASME publication** (November 1972).
14. Lewis, D.C. and Goldberg, H.J. "Prescription for a Successful Fuel Treatment Program." **Combustion.** (December 1976).
15. N. Birks "High-Temperature Corrosion in Complex Atmospheres." in **Chemical Metallurgy of Iron and Steel.** London : The Iron and Steel Institute 1973.
16. Palmer, H.B. and Beer, J.M. **Combustion Technology : Some Modern Developments.** New York : Academic Press, 1974
17. Puryajiva, P. **Low Temperature Fireside Corrosion in Oil-Fired Boiler-A Research Study.** Bangkok : South East Asia Treaty Organization, 1965.

19. Reed, R.D. **Furnace Operation**. Texas : Gulf Publishing Corp., 1971.

19. Reid, W.T. **External Corrosion and Deposits-Boiler and Gas Turbines**. New York : American Elsevier Publishing Co., 1971.

20. Reese, J.T., Junkin, J. and Carnovale, V.Z. **Prevention of Residual Oil Combustion Problems by Use of Low Excess Air and Magnesium Additives**. Combustion Engineering, Inc.

21. Shell, **Residual Fuel Oil and Their Use**. New York : Shell Oil Co., 1965.

22. Tallman, C.P. "Problems of Burning Residual Oil and Effects of Additives Treatment." Paper presented at Federal Electricity Commission of Mexico, Mexico City, (October 22, 1979).

23. **Technical Information**. London : Polychem Limited.

24. **Technical Information**. U.S.A. : Magnetic Marietta Chemicals, Maryland.

25. **Technical Information on Combustion Aid**. New York : The Petrolin Co.

ตอนที่ 2 ด้านสัมผัสน้ำ

ก่อนที่จะกล่าวถึงการกัดกร่อนในหม้อน้ำโดยตรง จะต้องกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นของโลหะจากที่ได้เรียนมาแล้ว โลหะที่อยู่ในบรรยากาศจะไม่คงสภาพเดิมตลอดเวลา แต่จะมีปฏิกิริยาสมดุลกับสารต่างๆ ที่อยู่ในบรรยากาศ ทำให้เกิดเป็นออกไซด์หรือคาร์บอเนต ปฏิกิริยานี้มีการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนด้วย เรียกว่า Electrochemical Reaction การที่โลหะนั้นสูญเสียอิเล็กตรอนออกไปได้ง่ายเพียงใดขึ้นอยู่กับโลหะนั้นเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย การจะดูว่าโลหะนั้นเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายแค่ไหน ให้ดูจากปฏิกิริยาของโลหะนั้นกับกรด

ตารางที่ 9.10 ปฏิกิริยาของโลหะกับกรด

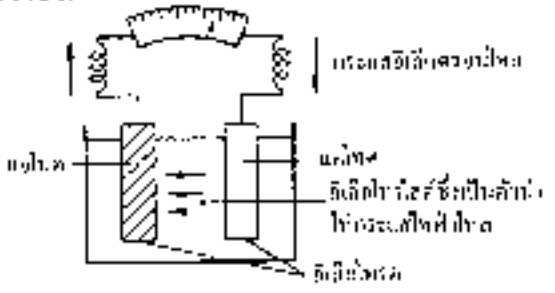
	ไฮโดรเจน	อัลคาไล	ทองแดง	เงินหรือทอง
น้ำ	มี	มี	ไม่มี	ไม่มี
กรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจาง	มี	มี	ไม่มี	ไม่มี
กรดเกลือหรือกรดกำมะถันเข้มข้น	มี	มี	มี	ไม่มี

ในที่นี้ถือว่า น้ำเป็นกรดอ่อนชนิดหนึ่ง จากตารางนี้จะเห็นผลว่าโลหะโซเดียมเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายที่สุด อัลคาไลจะทำปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอนออกมาเท่ากัน ส่วนเงินหรือทองนั้นไม่ทำปฏิกิริยาเลย

9.8 หลักการกัดกร่อน

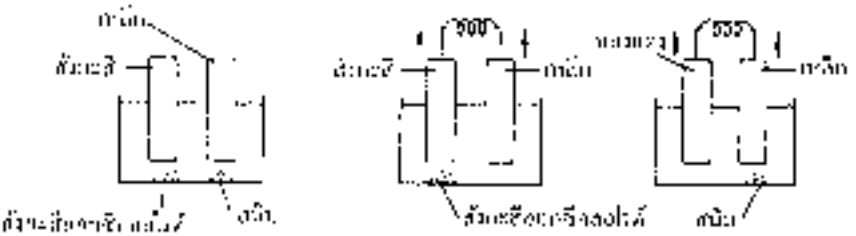
การกัดกร่อน (Corrosion) หมายถึงว่าเป็นการสูญเสียอิเล็กตรอนของโลหะไปสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งโลหะเกิดสนิมเหล็ก ได้แก่ น้ำและออกซิเจน และเกิดผลของการกัดกร่อนอันได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ ซึ่งถ้าเป็นเหล็กก็เรียกสนิมเหล็ก ในโลหะบางประเภท เช่น อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ถ้ามีการกัดกร่อนเกิดขึ้น ออกไซด์ที่เป็นผลของการกัดกร่อนนี้มักไม่ละลายน้ำและเกิดเป็นชั้นคุ้มครองโลหะไว้ ทำให้กัดกร่อนเกิดช้าลงแต่ถ้าเป็นเหล็กหนึ่งแล้ว ผลการกัดกร่อนจะเป็นสนิมเหล็กที่หลุดร่วงไปเรื่อยๆ ทำให้เกิดการกัดกร่อนต่อไปได้เรื่อยๆ

การกัดกร่อนของโลหะสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องแช่อยู่ในกรดเสมอไป เช่น ถ้ามีโลหะสองชนิดจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และต่อโลหะทั้งสองให้สัมผัสกันด้วย จะพบว่ามีกระแสอิเล็กตรอนวิ่งจากโลหะอันหนึ่งไปสู่โลหะอีกอันหนึ่งที่มีปฏิกิริยาต่างกันมากกว่า โลหะทั้งสองจะเรียกว่า อิเล็กโทรด อันที่สูญเสียอิเล็กตรอนเรียกว่า แอโนด (Anode) หรือขั้วลบ ส่วนอันที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathod) หรือขั้วบวก



รูปที่ 9.19 ขั้วกัลวานิก (Galvanic Cell)

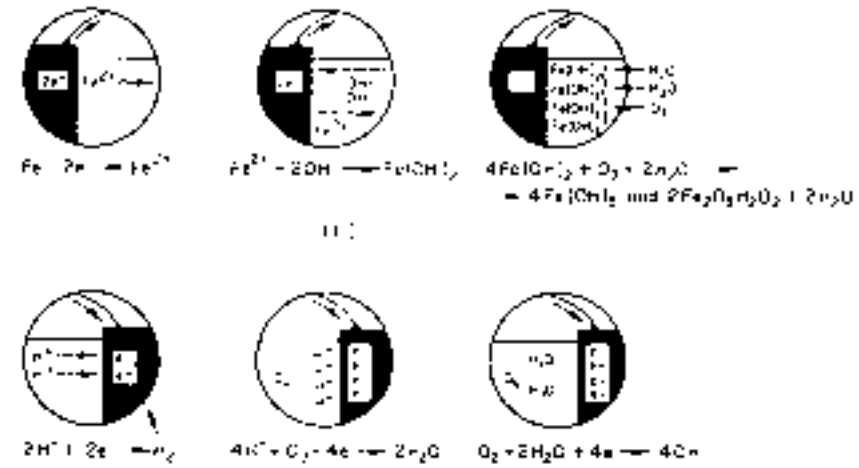
ไอออนบวกและลบที่มีกระแสอิเล็กตรอนวิ่งจากโลหะชนิดหนึ่งไปสู่โลหะอีกชนิดหนึ่งนั้น จะทำให้โลหะที่เป็นขั้วลบนั้นถูกกัดกร่อนเกิดเป็นสนิมได้ง่าย ดังสูตรสมการข้างล่างนี้ และโลหะที่เป็นขั้วบวกจะไม่ถูกกัดกร่อน



รูปที่ 9.20 (ซ้าย) กัดกร่อนเกิดแก๊สมากกว่าที่ขั้วโลหะเหล็ก

(กลาง) เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านจากขั้วลบสังกะสีไปยังขั้วบวกเหล็ก ทำให้สังกะสีถูกกัดกร่อน

(ขวา) ถ้าหยดน้ำเกลือลงบนเหล็ก จะเกิดสนิมเหล็กขึ้นมาก ๆ ตรงขอบหยดน้ำเกลือ



(ก)

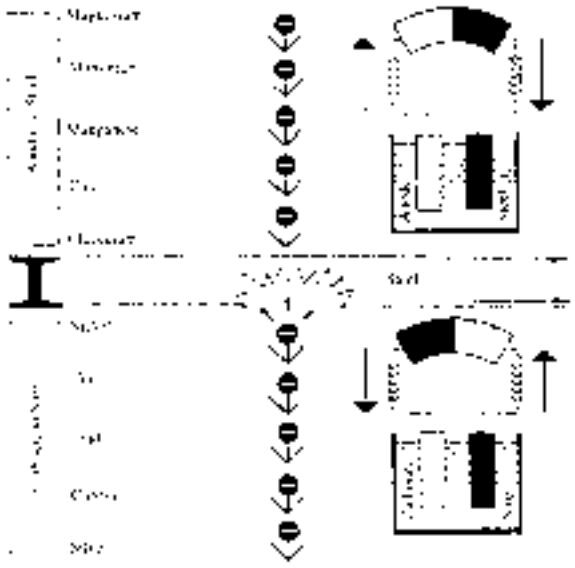
(ข)

Corrosion Processes : (a) Anodic Reaction- Oxidation (Corrosion) Reactions at Anode
(b) Cathodic Reaction-Reduction (Protective) Reactions at Cathode

รูปที่ 9.21 กลไกการเกิดการกัดกร่อนของเหล็ก

ในรูปที่ 9.21 นี้ ถ้าแสดงเป็นขั้วลบ ซึ่งจะจ่ายอิเล็กตรอนออกไป ที่ผิวโลหะนี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนที่ขั้วบวก ทำให้เกิดไฮดรอกซิลอิออน ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสอิออนที่เกิดที่ขั้วลบ เกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์นี้จะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนกลายเป็นสนิมเหล็ก

ความเป็นจริงแล้ว การเกิดการกัดกร่อนของโลหะ ไม่จำเป็นต้องต่อกับโลหะอื่นตามหลักที่กล่าวมาแล้ว เพราะในเนื้อโลหะแห่งเดียวกันก็เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้นได้ เนื่องจากเนื้อเหล็กนี้ไม่ได้ประกอบเป็นเนื้อเดียวกันตลอดแต่จะมีความต่างศักย์ในตัวเองระหว่างขอบผลึก (Crystal Boundaries) ของเหล็ก จึงบริเวณบางแห่งจะทำตัวเสมือนเป็นขั้วลบ บางแห่งเป็นขั้วบวก จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนในบริเวณที่ทำตัวเป็นขั้วบวกได้

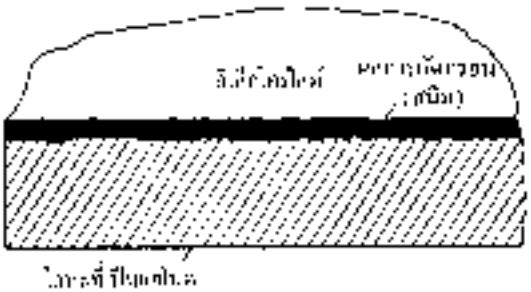


รูปที่ 9.22 ความต่างศักย์ระหว่างผลึกโลหะ

ในรูปที่ 9.22 แสดงให้เห็นถึงผลึกของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยที่ขอบของผลึกเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารต่างกัน เช่น ในโลหะที่มีส่วนผสมของคาร์บอนสูง เมื่อนำไปผสมกับเหล็กกล้าแล้ว โลหะนั้นจะมีสภาพเป็นขั้วบวก เหล็กกล้าจะมีสภาพเป็นขั้วลบซึ่งจะถูกกัดกร่อน แต่ถ้าโลหะใดมีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำกว่าเหล็กกล้า เช่น อลูมิเนียม โลหะนั้นจะมีสภาพเป็นขั้วลบซึ่งจะถูกกัดกร่อน ส่วนเหล็กกล้าเป็นขั้วบวกจะไม่ถูกกัดกร่อน

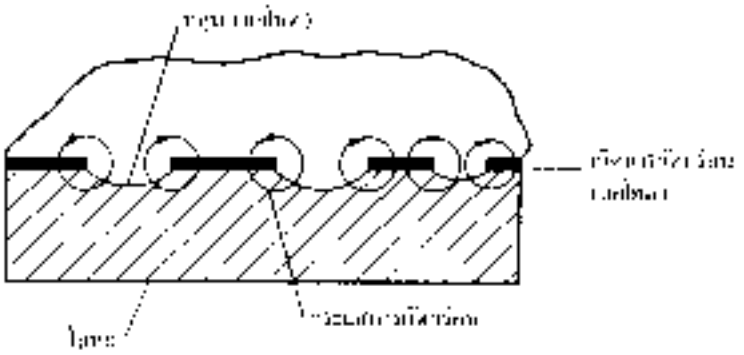
9.8.1 การกัดกร่อนของโลหะแบบต่าง ๆ

1. **การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ (Uniform or General Corrosion)** เป็นแบบการกัดกร่อนที่พบมากที่สุด การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งผิวหน้าของโลหะโดยประมาณเท่ากัน ไม่ได้เกิดเฉพาะจุดใดจุดหนึ่ง ในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ในสามารถระบุได้แน่นอนว่า บริเวณใดจะเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากการสัมผัสกับสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง



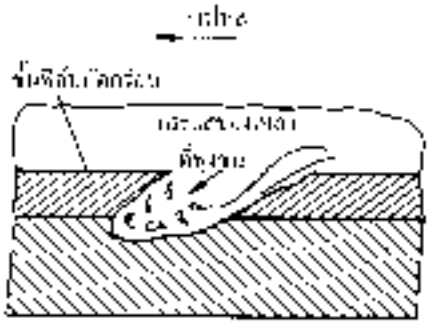
รูปที่ 9.23 การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ

2. การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในโลหะบางชนิดเป็นหลุมหรือรูเล็กๆ เกิดเนื่องจากฟิล์มป้องกันการกัดกร่อน (Protective Layer) บนผิวโลหะเสื่อมสลายไป ทำให้เกิดการกัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ บริเวณใดที่ชั้นป้องกันแตกและหลุดออก จะมีสภาพเป็นขั้วบวก บริเวณที่ชั้นป้องกันยังมีสภาพดีจะเป็นขั้วบวก ดังนั้น ในบริเวณที่เป็นขั้วบวกจึงจะเกิดการกัดกร่อน ดูดกัดลึกลงไปเรื่อยๆ ซึ่งการกัดกร่อนแบบนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายในสารละลายที่มีไอออนคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล และปกติผิวหน้าโลหะจะมีฟิล์มที่ทำการกัดกร่อนแล้วหลุดเป็นๆ หรืออาจจะเป็นออกไซด์ของโลหะที่เกิดขึ้นเองตามผิวหน้าไว้



รูปที่ 5.24 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม

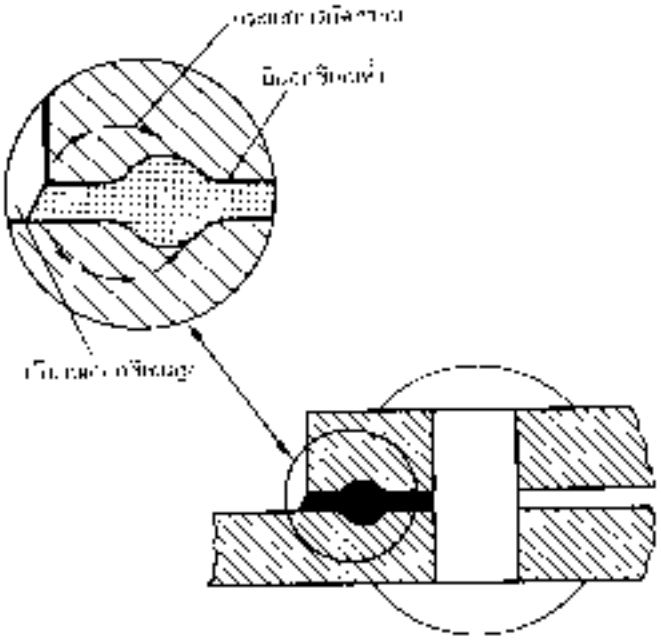
3. การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Corrosion-Erosion) เป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายที่มีความเร็วสูงพัดพาเอาฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะออกไป ทำให้เกิดการกัดเซาะเข้าไปในเนื้อโลหะที่อยู่ด้านใน ในบางครั้งเกิดการกัดเซาะเนื่องจากมีฟองอากาศในสารละลาย การกัดกร่อนแบบนี้จะเกิดขึ้นได้มากบนผิวโลหะที่มีความหยาบหรือรูพรุนอยู่บนผิวหน้า



รูปที่ 5.25 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ

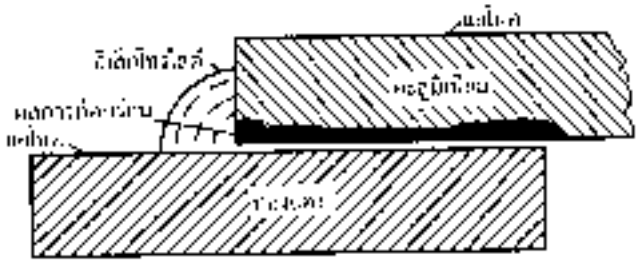
4. การกัดกร่อนเนื่องจากความเข้มข้นสารละลาย (Concentration Cells) เป็นกรณีที่โลหะชนิดเดียวกันมีความต่างศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า เนื่องจากความแตกต่างกันของความเข้มข้นของสารละลายบริเวณที่มีสารละลายไอออนไฟฟ้าไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ เกิดลักษณะขั้วบวกขั้วลบขึ้นจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ การกัดกร่อนแบบนี้มักพบในรอยแยกบริเวณรอยต่อ หรือโลหะที่มีรอยต่อกับวัสดุ

รู้จักที่เกิดสนิมได้ง่ายที่สุด เช่น ที่มี Oxygen Concentration Cell เกิดในรอยแยกแคบๆ ซึ่งทำให้มีการสัมผัสกับอากาศ สารละลายที่อยู่ในรอยแยกหรือรอยแตกจะมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าส่วนอื่นๆ บริเวณใดที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำจะเกิดเป็นขั้วลบ ซึ่งจะเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่นี่ บริเวณใดที่มีออกซิเจนมากจะเป็นขั้วบวก ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้น



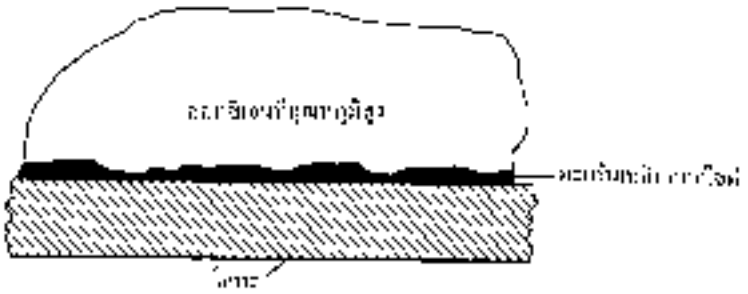
รูปที่ 9.26 การกัดกร่อนเนื่องจากความเข้มข้นสารละลาย

5. **การกัดกร่อนแบบกัลวานิก** (Galvanic Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดเนื่องจากโลหะสองชนิดที่จุ่มอยู่ใกล้กันและอยู่ในสารละลายเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 9.27 ถ้าโลหะสองชนิดนี้มีค่าศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันมากอยู่ใกล้กันในสารละลาย เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โลหะชนิดที่อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าในซีรีย์กัลวานิกจะถูกกัดกร่อนได้ เช่น มีอะลูมิเนียมกับเหล็กกล้าแล้ว ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อะลูมิเนียมจะมีแนวโน้มที่จะเป็นขั้วลบ หรือแอโนด ดังนั้น อะลูมิเนียมจะถูกกัดกร่อน



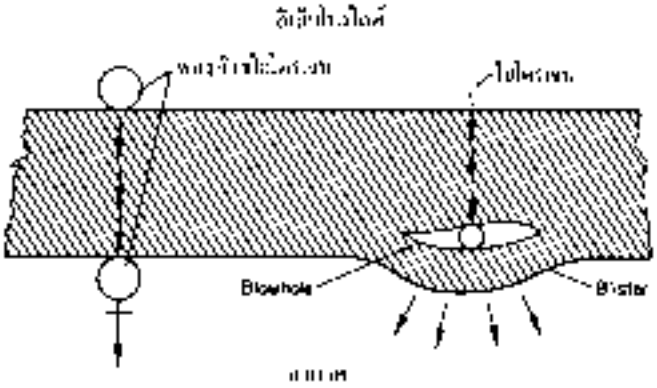
รูปที่ 9.27 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก

6. **การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง** (High Temperature Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเมื่อผิวโลหะนั้นสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ไอน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับไอน้ำ โดยที่ผิวสัมผัสที่ไม่มีน้ำ



รูปที่ 9.28 การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง

7. **การกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน** (Hydrogen Damage) การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากการที่ก๊าซไฮโดรเจนแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อผิวของโลหะ ทำให้เกิดโพรงหรือรอยแตกขึ้นภายในเนื้อโลหะ เกิด Decarburization โดยไฮโดรเจนไปรวมตัวกับคาร์บอนอะตอมของเหล็กคาร์ไบด์ในเนื้อเหล็กกล้าเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ขึ้น

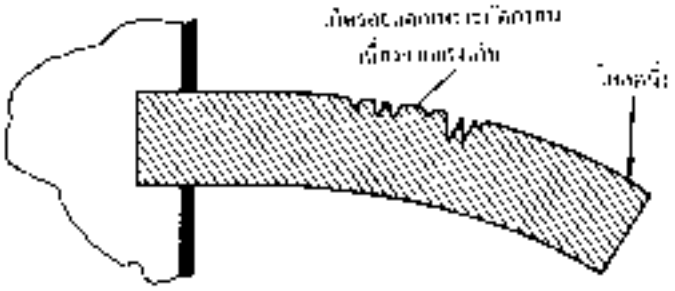


รูปที่ 9.29 การกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน

8. **การกัดกร่อนระหว่างเกรน** (Intergrystalline Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตามแนวขอบผลึกของโลหะ (Grain Boundaries)

รูปที่ 9.30 การกัดกร่อนระหว่างเกรน

9. **การกัดกร่อนเนื่องจากแรงเค้น** (Stress Corrosion Cracking) เป็นการกัดกร่อนของโลหะในบริเวณที่มีแรงเค้นสะสมอยู่มากในเนื้อโลหะ มากกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งบริเวณนี้จะถูกกัดกร่อนได้ง่ายที่สุด เพราะภายในเนื้อโลหะมีสภาพสืบเนื่องมาจากแรงเค้นที่ได้รับอยู่เป็นประจำ อิออนบางชนิด เช่น คลอไรด์ ทำให้เกิดการกัดกร่อนชนิดนี้ได้



รูปที่ 9.31 การกัดกร่อนเนื่องจากแรงเค้น

10. **การกัดกร่อนบริเวณอับ** (Crevice Corrosion) มักเกิดการกัดกร่อนขึ้นในบริเวณที่สัมผัสกับน้ำหรือของเหลว เช่น บริเวณรอยต่อ รอยเชื่อม บริเวณหน้าแปลนยึดท่อ และบริเวณก้นหุบน้ำ การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนอยู่ในปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้

11. **การกัดกร่อนเนื่องจากได้รับความร้อนไม่เท่ากัน** (Thermogalvanic Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากโลหะได้รับความร้อนแตกต่างกันมาก เช่น ขั้นโลหะที่ปลายข้างหนึ่งสัมผัสกับความร้อนแตกต่างอีกข้างหนึ่งอุณหภูมิต่ำหรือเย็น ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น ปลายข้างที่ร้อนกว่าจะมีสภาพเป็นขั้วบวก ปลายข้างที่เย็นจะมีสภาพเป็นขั้วลบ ดังนั้น การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นที่ปลายที่ร้อน

รูปที่ 9.32 การกัดกร่อนเนื่องจากมีอุณหภูมิแตกต่างกัน

9.9 การกัดกร่อนของเหล็ก

การกัดกร่อนของเหล็กในน้ำเกิดได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ เมื่อเหล็กสัมผัสกับน้ำ เนื้อเหล็กในรูปเฟอร์รัสอิออน (Fe^{++}) จะละลายอยู่ในน้ำดังสมการ

$$Fe \longrightarrow Fe^{++} + 2e \qquad (1)$$

อิเล็กตรอนสองตัวจะอยู่ในเนื้อเหล็ก น้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$H_2O \longrightarrow H^+ + OH^- \qquad (2)$$

เฟอร์รัสไอออน จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์

$$Fe^{++} + 2\,OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2 \qquad (3)$$

ไฮโดรเจนอะตอมจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุล เป็นก๊าซไฮโดรเจนปุดออกมาจากน้ำ

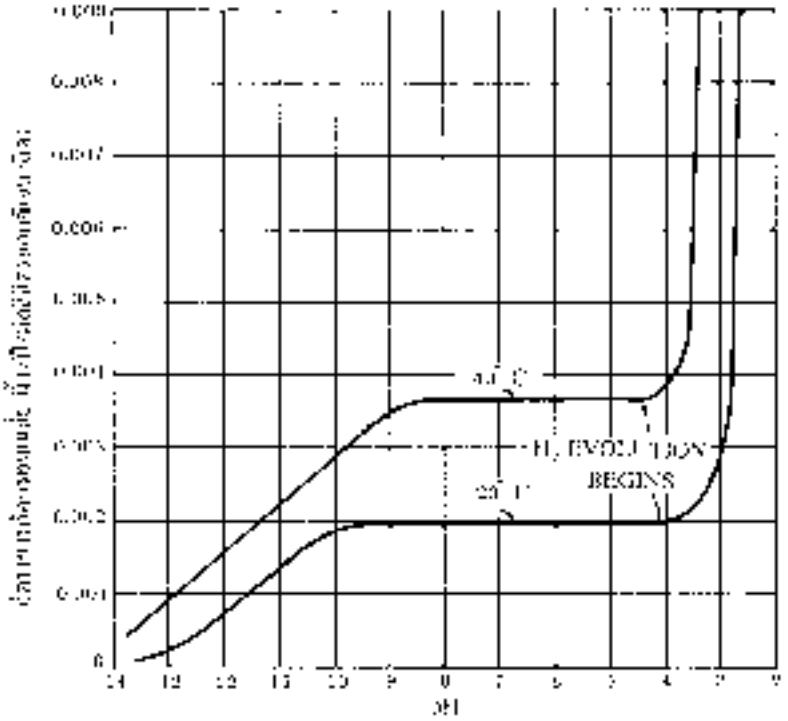
$$2\,H^+ + 2e \longrightarrow H_2\uparrow \qquad (4)$$

รวมสมการ (3) กับ (4) จะได้ปฏิกิริยาแบบนี้

$$Fe + 2\,H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + H_2\uparrow \qquad (5)$$

ถ้าน้ำที่ผิวโลหะสัมผัสอยู่เป็นน้ำบริสุทธิ์ ไม่มีสารอื่นปนอยู่เลย เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเคลือบผิวโลหะไว้เป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ ทำหน้าที่เป็นเยื่อบางชนิดหนึ่งขวางกั้นไม่ให้น้ำสัมผัสกับโลหะได้ ปฏิกิริยาการผุกร่อนของโลหะจากสมการที่ 5 ก็จะหยุดชะงักไปเองโดยอัตโนมัติ แต่ถ้าน้ำนั้นมีสภาพเป็นกรดจะมีค่า pH น้อยกว่า 7 เช่นที่น้ำฝนตกใหม่ ๆ เป็นกรดอ่อน ๆ หรือน้ำจะมีไฮโดรเจนไอออน (H^+) มากกว่าไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ปฏิกิริยาที่เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เคลือบอยู่ที่ผิวโลหะจะถูกทำลายลงได้ง่าย ๆ ดังสมการ

$$Fe(OH)_2 + 2\,H^+ \longrightarrow Fe^{++} + 2\,H_2O \qquad (6)$$



รูปที่ 9.11 การผุกร่อนของเหล็กที่ pH ต่าง ๆ

ในสมการที่ (6) เมื่อ $Fe(OH)_2$ ถูกทำปฏิกิริยาจนหมดไปแล้ว สมการจะไม่สมดุล ปฏิกิริยาการผุกร่อนก็จะเริ่มขึ้นอีก นั่นคือน้ำจะทำปฏิกิริยากับการอนเหล็กเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ เพื่อชดเชยส่วนที่สูญหายไป ดังนั้น ปฏิกิริยาการผุกร่อนของเหล็กในน้ำที่มีสภาพเป็นกรดก็จะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา และให้ก๊าซไฮโดรเจนปุดออกมา

ในรูปที่ ๖.๑๑ แสดงการกัดกร่อนของเหล็กในน้ำที่ค่า pH ต่าง ๆ การปรับให้น้ำเป็นด่างใช้โซดาไฟ ปรับเป็นกรดใช้กรดกำมะถัน จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อน้ำมี pH สูงกว่า ๑ อัตราการกัดกร่อนจะลดลงในช่วง pH ๔-๑๐ อัตราการกัดกร่อนจะต่ำที่ pH ๑๐ เมื่อมีก๊าซไฮโดรเจนปุดออกมาแสดงว่าเริ่มเกิดหินปูนแล้ว ถ้า pH ต่ำกว่า ๔ การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาของเหล็กในน้ำที่มีสภาวะเป็นด่างหรือเป็นกลางเป็นดังนี้

$$2\,Fe + 2\,H_2O + O_2 \longrightarrow 2\,Fe(OH)_2 \qquad (7)$$

ถ้า pH ของน้ำเป็นด่าง ชั้นฟิล์มของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่ละลายเล็กน้อยจะไม่ละลายออกไป ค่า pH ของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่อิ่มตัวจะมีค่า ๙.๕ ดังนั้นที่เหล็กที่มีชั้นฟิล์มนี้คลุมอยู่ในน้ำที่มีช่วง pH ๔-๑๐ จะมีสภาพเป็นด่างอยู่เสมอ ดังนั้นการกัดกร่อนจึงเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อ pH ของน้ำลดลงต่ำ ๔ ชั้นฟิล์มของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์จะเปลี่ยนสภาพเป็นชั้นที่มีรูพรุนให้ก๊าซออกซิเจนในน้ำแพร่เข้าไปได้ และจะเกิดปฏิกิริยากับ $Fe(OH)_2$ ดังนี้

$$4\,Fe(OH)_2 + O_2 + H_2O \longrightarrow 4\,Fe(OH)_3 \qquad (8)$$

$$2\,H_2 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O \qquad (9)$$

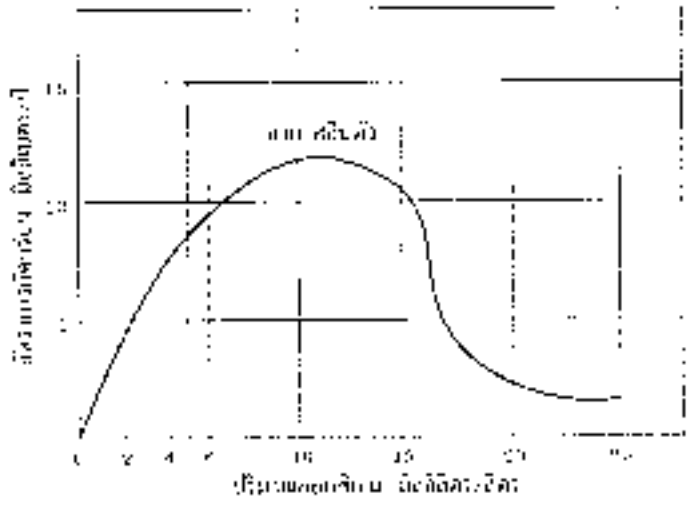
$Fe(OH)_3$ คือ เฟอริกไฮดรอกไซด์ หรือ Hydrous ferric oxide ซึ่งก็คือ สนิมแหล่นั่นเอง

จากรูปที่ ๖.๑๑ นี้จะเห็นผลของอุณหภูมิต่อการกัดกร่อน ที่อุณหภูมิ ๘๐°C อัตราการกัดกร่อนจะมากกว่าที่ ๒๕°C

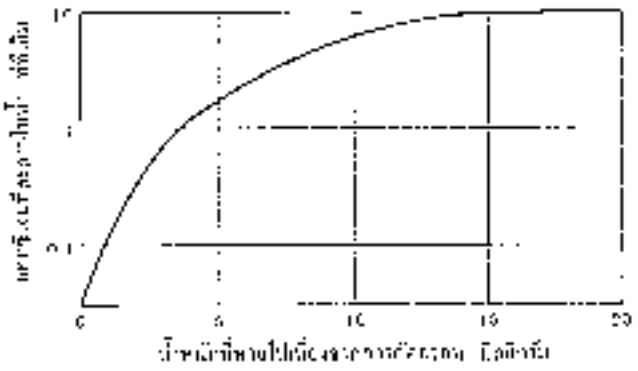
ถ้าในน้ำมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งเป็นกรดอ่อน จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$Fe + 2\,H_2CO_3 \longrightarrow Fe(HCO_3)_2 + H_2 \qquad (10)$$

๑. **การกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซ** น้ำไม่มีก๊าซออกซิเจนจะสามารถอยู่ได้นาน อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในน้ำจะมีน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ ในน้ำที่มีอากาศละลายอยู่จนอิ่มตัว จะมีอัตราการกัดกร่อนสูงถึง ๒๕ มิลลิกรัม (๑ มิล = ๐.๐๑ นิ้ว)

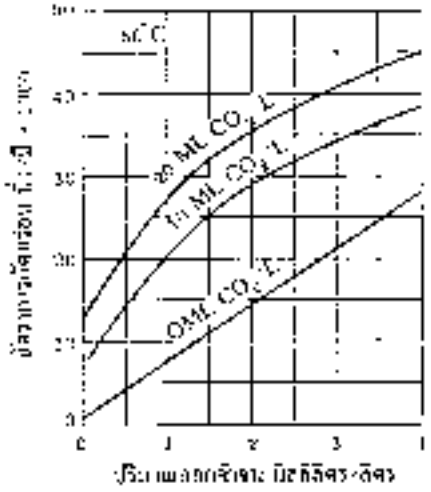


รูปที่ ๖.๑๑ การกัดกร่อนของเหล็กเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน

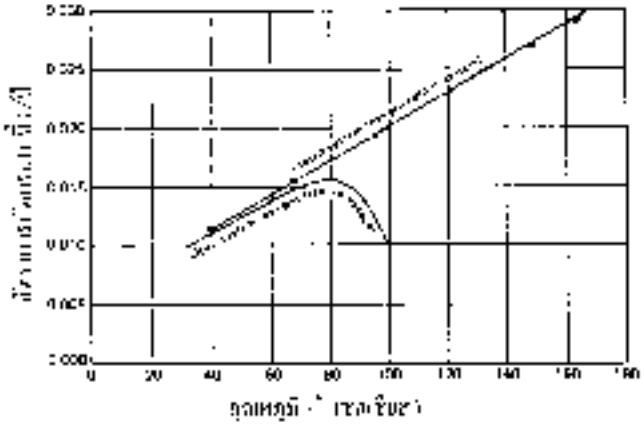


รูปที่ 9.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนของเหล็กและปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

2. **การกัดกร่อนเนื่องจากอุณหภูมิสูง** เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การแพร่ของออกซิเจนเร็วขึ้นด้วย นำทำให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น กล่าวโดยสรุปแล้วอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 15 ถึง 80 °C จะทำให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นราว 3 ถึง 4 เท่า



รูปที่ 9.36 การกัดกร่อนของเหล็กเทียบที่อุณหภูมิ 80 °C แปรผันตามความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (หน่วยมิลลิโมลต่อลิตร)

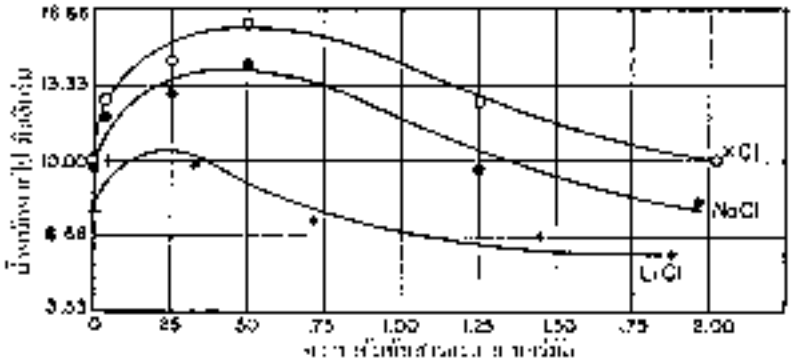


รูปที่ 9.37 ผลการกัดกร่อนของเหล็กที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในสภาวะแวดล้อมต่างกัน

จากรูปที่ 9.37 จะเห็นได้ว่าในคูน้ำที่เปิดสู่บรรยากาศ อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิจนถึง 80 °C เท่านั้น ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิขึ้นสูงกว่านี้ การละลายของออกซิเจนในน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วในระบบที่ปิดไม่สัมผัสกับบรรยากาศ ก๊าซออกซิเจนถูกขังไว้ อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจนกระทั่งก๊าซออกซิเจนถูกใช้หมดไป

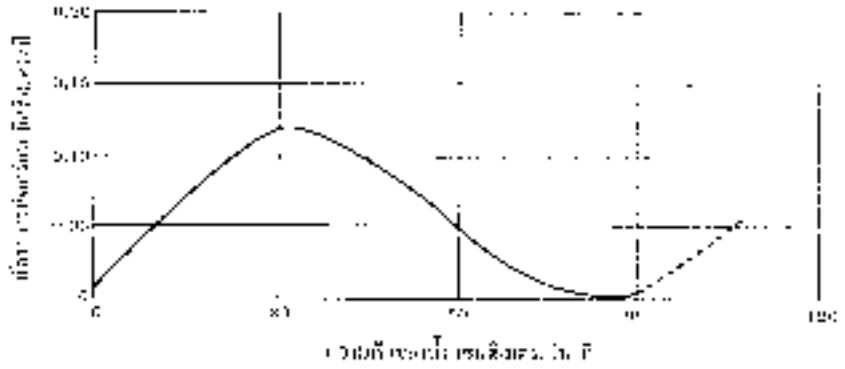
3. **การกัดกร่อนเนื่องจากสารที่ละลายอยู่ในน้ำ** ถ้าในน้ำมีเกลือแกง (NaCl) ละลายอยู่ อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ความเข้มข้นของเกลือ 3% โดยน้ำหนัก ถ้ามีเกลือละลายมากกว่านี้ อัตรา

การกัดกร่อนจะลดลง ส่วนน้ำที่มีความกระด้าง หรือมีเกลือของแคลเซียมและแมกนีเซียมอยู่ จะมีการตกตะกอนเกิดขึ้นบนผิวน้ำเหล็กที่ปราศจากความกระด้าง ทั้งนี้การตกตะกอนเกลือของแคลเซียมจะไปอุดตันบริเวณที่เป็นขั้วบวกของเซลล์กัลวานิก ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้การออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ จึงมีผลทำให้ปัญหาการกัดกร่อน

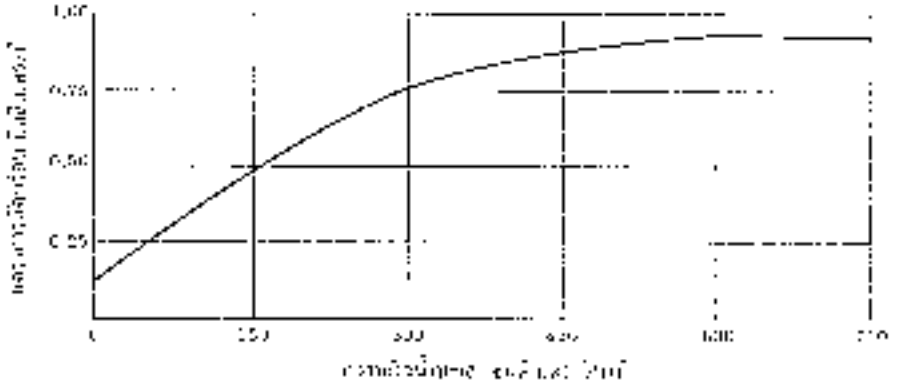


รูปที่ 9.38 อิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กที่อุณหภูมิ 35 °C

4. การกัดกร่อนเนื่องจากความเร็วในการไหลของน้ำ โดยทั่วไปแล้ว ถ้าอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำที่มีความกระด้างอยู่



รูปที่ 9.39 การกัดกร่อนของเหล็กในน้ำที่ไหลด้วยความเร็วต่าง ๆ



รูปที่ 9.40 การกัดกร่อนของเหล็กในน้ำกระด้างที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

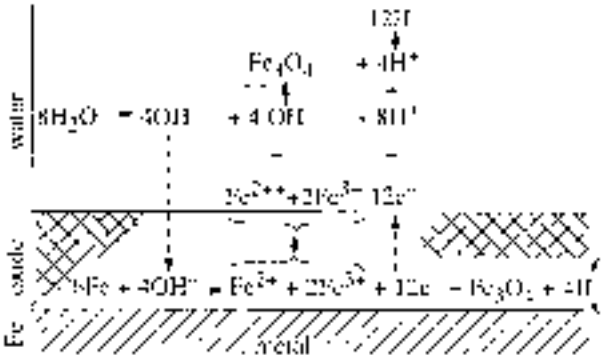
9.9.1 การกัดกร่อนของเหล็กที่อุณหภูมิสูง

ถ้าเหล็กสัมผัสกับน้ำที่มีอุณหภูมิสูง $Fe(OH)_2$ ที่เกิดในสมการ (10) จะเกิดปฏิกิริยาแยกตัวดังนี้

$$3\,Fe(OH)_2 \longrightarrow Fe_3O_4 + 2\,H_2O + H_2 \qquad (11)$$

รวมสมการที่ (9) และ (11) เข้าด้วยกันจะได้

$$3\,Fe + 4\,H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + 4\,H_2 \qquad (12)$$



รูปที่ 9.4 กลไกของการเกิดชั้นฟิล์มบัดกรีและแมกเนไทต์

Fe_3O_4 มีลักษณะสีดำ ไม่ละลายน้ำ มีจุดเสมอกลิ่นล้ายแม่เหล็ก เรียกว่า แมกเนไทต์ (Magnetite) แมกเนไทต์นี้จะไปเคลือบผิวหน้าเหล็กไว้ทำหน้าที่ป้องกันมิให้เกิดการกัดกร่อนได้ ถ้าหากในน้ำไม่มีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ และน้ำมีค่า pH 10-12 แล้ว ชั้นฟิล์มของแมกเนไทต์ที่สามารถคงสภาพไว้ได้ตลอดไป เว้นแต่จะมีแรงกลมากระทำให้ชั้นฟิล์มป้องกันนี้เกิดแตกร้าวขึ้น การกัดกร่อนแบบนี้สามารถตรวจพบได้โดยใช้เครื่องวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในไอน้ำ เพราะจากสมการที่ (12) จะเห็นว่ามีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น แต่การตรวจพบก๊าซไฮโดรเจนในไอน้ำมากกว่าปกตินั้นมิได้เกิดจากการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงเพียงอย่างเดียว เพราะอาจเกิดจากมีสารบางชนิดที่สามารถสลายตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนปะปนเข้าไปกับน้ำเลี้ยงเข้าหม้อไอน้ำ

9.10 การกัดกร่อนของหม้อไอน้ำ

การกัดกร่อนของหม้อไอน้ำแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

1. ช่วงก่อนเข้าเครื่องของหม้อไอน้ำ (Preboiler) เป็นช่วงส่งน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (Feed Water)
2. ช่วงในเครื่องและภายในหม้อไอน้ำ (Boiler)
3. ช่วงหลังจากเครื่องหม้อไอน้ำ (Post Boiler) ได้แก่ บริเวณชุดเบ่งอีโคโนไมเซอร์และระบบคอนเดนเสทของหม้อไอน้ำ

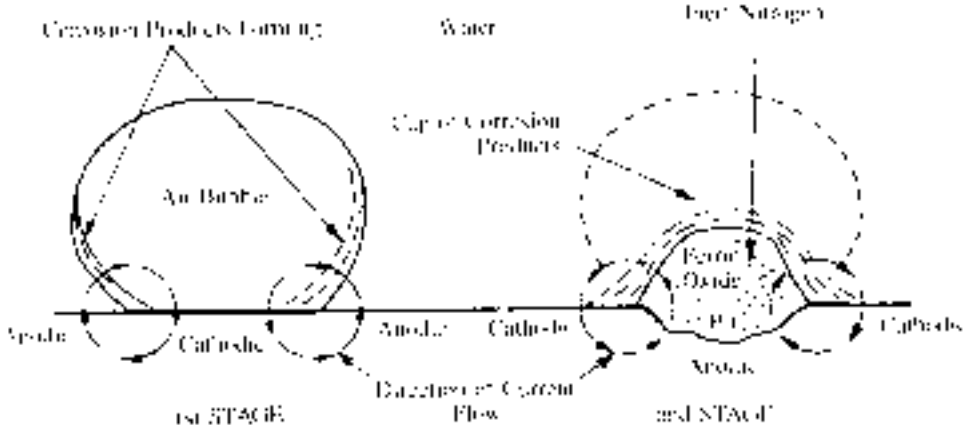
9.10.1 การกัดกร่อนในระบบน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำและภายในหม้อไอน้ำ

ระบบน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ นับรวมตั้งแต่เป็นช่วงน้ำเลี้ยงผ่านท่อและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อเข้าสู่เครื่องของหม้อไอน้ำ รวมทั้งเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงด้วย ในบางครั้งก็รวมเอาอุปกรณ์ในการปรับสภาพน้ำเข้าไปด้วย เช่น

เครื่องทำน้ำอ่อน การกัดกร่อนมักเกิดในแบบ General Corrosion, Pitting, Intergranular Corrosion, Cavitation Erosion การกัดกร่อนทั่วระดับนี้มักเกิดขึ้นเมื่อ ค่าของความเป็นกรดของน้ำ ต่ำ pH ต่ำ มีออกซิเจนละลายน้ำ มีการไหลของน้ำ มีการขัดสีของผิวโลหะ เนื่องจากการไหลของน้ำ หรือการขัดสีของผิวโลหะ เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่ไหลมากับน้ำ ทำให้ผิวโลหะเสียหาย ไม่สม่ำเสมอ (Defect) ไม่สมบูรณ์ และมีการสะสมของผิวหน้าไว้ที่ตำแหน่งนั้นๆ ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเป็นหลุมหรือหลุม (Pitting) ได้ ทั้งนี้เนื่องจากชั้นฟิล์มแมกนีไทต์เกิดเสียหาย เนื่องจากสาเหตุใดก็ตามจะเกิดสภาพ Concentration Cell ขึ้น ระหว่างผิวหน้าที่ไม่เสียหาย ซึ่งเป็นชั้นฟิล์มป้องกันเนื้อโลหะที่ยังมีสภาพเป็นขั้วแคโทดและอาจจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$Fe \longrightarrow Fe^{++} + 2e$$

รูปที่ 9.42 ภาพที่เกิดจากการกัดกร่อน

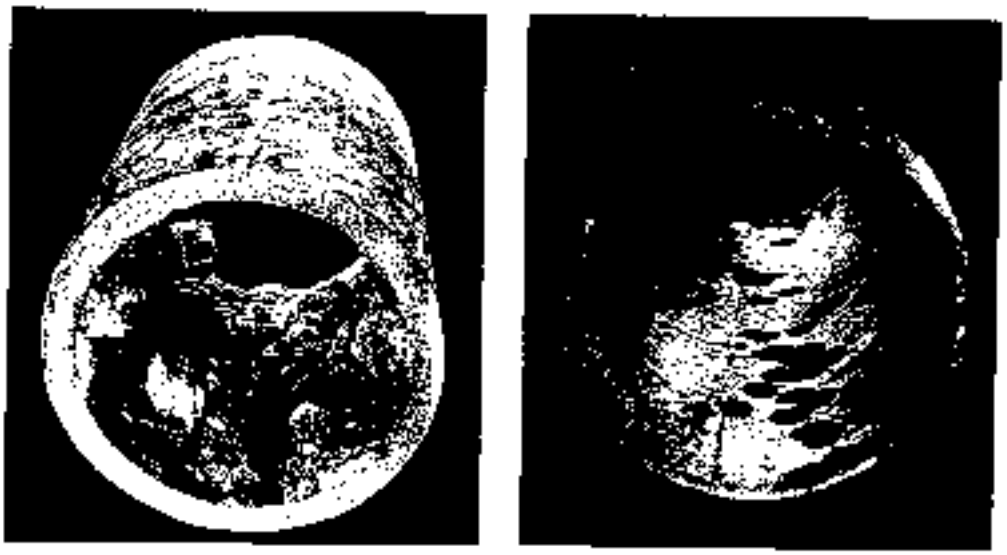


รูปที่ 9.43 การเกิดหลุมที่เกิดจากการกัดกร่อนของออกซิเจน

Fe^{++} จะทำปฏิกิริยากับ OH เป็นเฟอรัสไฮดรอกไซด์

$$Fe^{++} + 2\,OH \longrightarrow Fe(OH)_2$$

เฟอรัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe_2O_3 ได้ตะกอนสีแดงที่ 110 และก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มป้องกันในบริเวณที่เป็นขั้วแคโทด ถ้าไม่มีชั้นฟิล์มแมกนีไทต์ยังคงอยู่นั้น การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุต่างๆ ดังนี้ ค่า pH ของน้ำสูงหรือต่ำเกินไป ความเข้มข้นของน้ำอยู่ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ ๙.๔๔ การตัดตกร่อนของตลิ่งจาก
(ซ้าย) การกระทำของคลื่นที่ระดับน้ำต่าง
(ขวา) ตลิ่งถูกกัดเซาะจากการกระทำของคลื่นลม

รูปที่ ๙.๔๕ การกัดกร่อนแบบเป็นหลุมเนื่องจากออกซิเจนในน้ำแตกต่าง

ในการแก้ไขปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจาก [illegible] ในสภาวะน้ำนิ่ง เช่น ภายในท่อ [illegible] ในเรื่องของการดูแลรักษาท่อ

๙.๑๐.๒ การกัดกร่อนเนื่องจากในทรัพย์ใต้น้ำ

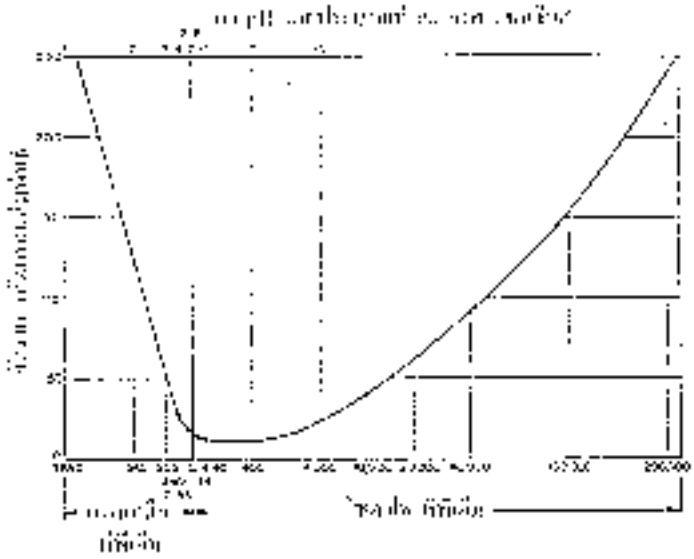
[illegible] ที่มีการกัดกร่อนเนื่องจาก [illegible] ในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่างกัน [illegible] ที่มีการกัดกร่อนมากกว่าบริเวณที่ [illegible]

๑. **การกัดกร่อนเนื่องจากความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่อุณหภูมิสูง** เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในน้ำที่มีความเป็นกรดอ่อน จะเกิดการกัดกร่อนไปอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ ๙.๑๑ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า pH ของน้ำควรมีค่าดังนี้

ก) pH < ๙.๓ จะมีการสูญเสียเหล็กเนื่องจากการกัดกร่อนในน้ำในรูป Fe^{2+}

ข) pH ๙.๓ ถึง ๑๒.๑ จะเกิดชั้นฟิล์มบางๆ ของ Fe_3O_4 ขึ้นที่ผิวโลหะ

ค) pH > ๑๒.๑ จะเกิดสารประกอบไอออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ของ $HFeO_2^-$ ขึ้นมา



รูปที่ ๙.๑๑ การกัดกร่อนของเหล็กที่อุณหภูมิ ๒๐๐°C ในน้ำที่มีความเป็นกรด-ด่างที่ค่า pH ต่างๆ

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กที่อุณหภูมิ ๒๐๐°C ในน้ำที่มีค่า pH ระหว่าง ๙.๓ ถึง ๑๒.๑ จะมีค่าน้อยมาก เนื่องจากมีชั้นฟิล์มบางๆ ของ Fe_3O_4 ป้องกันการกัดกร่อนอยู่ ในน้ำที่มีค่า pH ต่ำกว่า ๙.๓ จะมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไม่มีชั้นฟิล์มบางๆ ของ Fe_3O_4 ป้องกันการกัดกร่อน ในน้ำที่มีค่า pH สูงกว่า ๑๒.๑ จะมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากชั้นฟิล์มบางๆ ของ Fe_3O_4 ถูกทำลายและเกิดสารประกอบไอออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ของ $HFeO_2^-$ ขึ้นมา ดังนั้นค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับน้ำหล่อเย็นที่ใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิสูงจึงควรมีค่าอยู่ในช่วง ๙.๓ ถึง ๑๒.๑

๒. **การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายมีความเข้มข้นสูง** น้ำในหม้อไอน้ำที่ใช้งานอยู่จะมีสารต่างๆ ที่ละลายน้ำได้ปนอยู่ด้วยเสมอ ทั้งที่อยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและอยู่ในรูปของสารละลายไอออนต่างๆ ซึ่งมีทั้งสารที่มีความสามารถในการกัดกร่อนได้ และที่ไม่มีความสามารถในการกัดกร่อนเลย ปกติแล้วสารที่ผสมอยู่ในน้ำจะมีการละลายเป็นไอออนต่างๆ ในน้ำ ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เพราะในการใช้น้ำจะมีการระเหยของน้ำออกไปในรูปของไอน้ำ ทำให้ความเข้มข้นของสารต่างๆ ในน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำมีความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ สูงขึ้นเรื่อยๆ ก็จะมีการตกตะกอนของสารต่างๆ ออกมาด้วย ทั้งนี้เพื่อให้ความเข้มข้นของสารต่างๆ ในน้ำมีค่าคงที่ ซึ่งเรียกว่า จุดอิ่มตัว (saturation point) ของสารนั้นๆ ในน้ำ ตัวอย่างเช่น ในน้ำที่มีความกระด้างสูง เมื่อมีการระเหยของน้ำออกไปจนถึงจุดอิ่มตัว ก็จะมีการตกตะกอนของ $CaCO_3$ และ $CaSO_4$ ออกมาด้วย ทั้งนี้เพราะในการใช้น้ำจะมีการเติมน้ำเข้าไปในหม้อไอน้ำตลอดเวลา ทำให้ความเข้มข้นของสารต่างๆ ในน้ำมีค่าไม่ถึงจุดอิ่มตัว ดังนั้นจึงไม่มีการตกตะกอนของสารต่างๆ ออกมา

รอยเชื่อมสูงกว่าผิวท่อ เมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นแล้ว ผิวโลหะที่ถูกกัดกร่อนแล้วจะไม่เรียบ แต่จะมีลักษณะขรุขระ น้ำในบริเวณนั้นจะมีสภาพเดือดแบบ Wick Boiling เพราะน้ำจะซึมเข้าไปในผิวโลหะที่ขรุขระได้แทนที่เหมือนกับน้ำมันซึมขึ้นตามไส้ตะเกียง เมื่อไอน้ำระเหยออกไปก็จะเหลือสารต่าง ๆ ที่ไม่ระเหยอยู่ในน้ำเดือดข้างในทำให้มีความเข้มข้นของสารนั้นสูงขึ้น และปรากฏการณ์แบบเดียวกันนี้จะเกิดได้ในการเดือดแบบนิวเคลียทิ ซึ่งในนิวเคลียสนั้นมีจุดเกิด เช่น บริเวณรอยเพื่อมที่ไม่เรียบ บริเวณรอยต่อระหว่างท่อที่เกิดจากเชื่อมต่อกันเป็นต้น เป็นจุดอับที่มีการระเหยน้ำมากกว่า โดยที่สารละลายจะเข้มข้นสูงได้ นอกจากนี้ยังอาจเกิดการกัดกร่อนแบบนี้ขึ้นจากสภาพ Steam Blanket ในบริเวณที่มีฟองไอมาเกาะกันหนาแน่น เช่น ในท่อที่อยู่ในแนวเดียวหรือแนวราบ โดยมีความร้อนส่งจากด้านบน ถ้าหากผิวที่แห้งในท่อนั้นสัมผัสกับน้ำที่ในครั้งหนึ่งและแห้งต่อเนื่องกันเรื่อย ๆ ก็จะเกิดสภาพสารละลายเข้มข้นได้

3. **การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายมีสภาพเป็นกรด** การเกิดสภาพการละลายเป็นกรดนั้นเกิดได้ 2 แบบ คือ

(1) มีสิ่งเจือปนที่มีสภาพเป็นกรดละลายเข้าไปในหม้อไอน้ำ ทำให้น้ำในหม้อไอน้ำมี pH ต่ำลง และจะมีสภาพเป็นกรดอย่างรุนแรงเมื่อถูกความร้อนระเหยให้แห้ง

(2) น้ำในหม้อไอน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง แต่มีสารละลายที่เป็นกรดสัมผัสเนื่องจากปฏิกิริยาของแมกนีเซียมและคลอไรด์ ซึ่งที่ทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ได้ง่ายก็คือ น้ำทะเล หรือน้ำจากน้ำที่มีสภาพกร่อย หรือน้ำแมกนีเซียมคลอไรด์ หรือเฟอร์ริคลอไรด์ที่ทำน้ำ เกิดเป็นไฮโดรเจนคลอไรด์และอาจตกตะกอน

$$MgCl_2 + 2\,H_2O \longrightarrow Mg(OH)_2 + 2HCl$$

จากนั้นกรดนี้จะทำปฏิกิริยากับเหล็กที่ผิวโลหะกัดกร่อนผิวเหล็กต่อไปได้ดังนี้

$$Fe + 2\,HCl \longrightarrow FeCl_2 + H_2$$

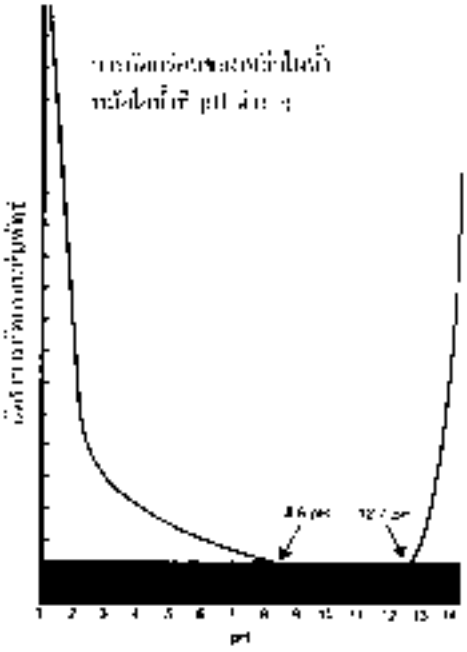
$FeCl_2$ จะทำปฏิกิริยากับ $Mg(OH)_2$ เกิดเป็นแมกนีเซียมคลอไรด์อีก ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$Mg(OH)_2 + FeCl_2 \longrightarrow MgCl_2 + Fe(OH)_2$$

ความเข้มข้นของกรดที่เกิดขึ้นในสภาพเช่นนี้จะมีค่าสูงกว่าสารละลายกรดธรรมดาที่ให้มีการกัดกร่อนที่รุนแรงได้ ในบางครั้งถ้าหากน้ำในหม้อไอน้ำมีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่และมีคลอไรด์ปนเปื้อน โดยที่น้ำจะมีไอน้ำมีสภาพเป็นกลางหรือเป็นด่างแล้ว ชั้นฟิล์มของเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวเหล็กอยู่จะแตกร้าวถูกทำลายได้ ถ้าบริเวณนั้นขาดออกซิเจน เช่นในบริเวณนั้นจะมีสภาพเป็นขั้วลบเทียบกับในบริเวณอื่น ๆ ทำให้เหล็กตรงที่มีสภาพเป็นขั้วลบนั้นมีการละลายเนื่องจากไปเกิดเป็นเฟอร์ริคลอไรด์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสเป็นกรดได้ ดังสมการดังได้กล่าวมาแล้ว ถ้าบริเวณนั้นมีอุณหภูมิไม่สูงก็จะเกิดการกัดกร่อนที่ไม่รุนแรงและมีสนิมแข็งปกคลุม แต่ถ้ามีอุณหภูมิสูงจะเกิดเป็นชั้นของแมกนีไลท์ที่ร่วนเป็นชั้น ๆ อยู่ภายในสนิมแข็งชั้นนอก เรียกว่า Laminated Magnetic การกัดกร่อนแบบนี้เป็นแบบรุนแรง เนื่องจากออกซิเจนและไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในบริเวณที่ไม่มีการต้มเดือดด้วยความร้อน เช่น ส่วนบนของท่อไอร้อน

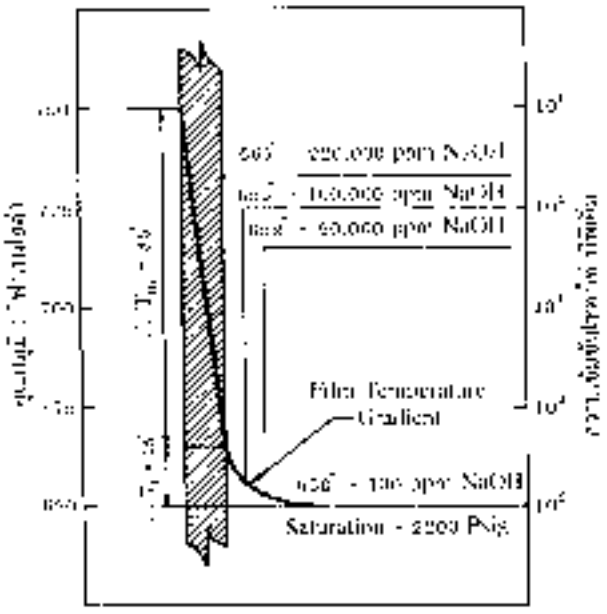
4. **การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายมีสภาพเป็นด่าง** ปกติจะมีการปรับสภาพน้ำในหม้อไอน้ำให้มีค่าเป็นด่างอยู่เสมอ ทั้งนี้เนื่องจากผู้ผลิตหม้อไอน้ำจะจำกัดไว้เช่นนั้น ดังนั้น จึงไม่ค่อยจะมีปัญหาเกี่ยวกับน้ำที่มีสภาพเป็นด่างนั้นจะสามารถกัดกร่อนหม้อได้รุนแรงเหมือนกับน้ำที่มีสภาพเป็นกรดเช่นกัน การกัดกร่อนแบบ

เหล็ก เนื่องจากน้ำที่มีสภาพเป็นด่างมีขึ้นไม่เพราะด่างนั้นจะไปทำปฏิกิริยา [illegible] เข้ากับไขมันและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ป้องกันผิวเหล็กเสียหาย ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ ดังนั้นค่า pH ของน้ำในหม้อน้ำควรให้มีค่าอยู่ระหว่าง 11.5-12.5 ซึ่งเป็นช่วงที่จะป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด



รูปที่ 9.47 ค่า pH ของน้ำในหม้อไอน้ำที่จะเกิดการกัดกร่อนมาก

ภายในหม้อไอน้ำบางจุดจะมีความร้อน (Heat Flux) ไหลผ่านถึง 50,000 บีทียู/ตร.ฟุต/ชั่วโมง ทุกๆ ชั่วโมง บริเวณนั้นก็จะมีไอน้ำเกิดขึ้นมากกว่าปกติ ดังนั้น จึงมีน้ำไหลลงสู่บริเวณนี้น้อยลง อุณหภูมิของเหล็กจะไม่คงที่เหมือนเดิม ฟิล์มที่ผิวในบริเวณนั้นจะมีอุณหภูมิขึ้นสูงขึ้น ในกรณีที่เกิด Steam Blanketing หรือการแยกตัวระหว่างน้ำกับไอน้ำ ในหม้อน้ำที่ความดัน 1,400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และในน้ำมีด่างในรูปโซดาไฟอยู่ 200 พีพีเอ็ม หรือมิลลิอิควิวาเลนท์ 5 ฟิล์มหน้าของเหล็กซึ่งมีความร้อนไหลผ่านประมาณ 1 จะมีด่างโซดาไฟอยู่ถึง 10,000-100,000 พีพีเอ็มได้ ซึ่งจัดว่ามีสภาพที่ด่างจัดมาก



รูปที่ 9.48 แสดงชั้นฟิล์มบาง ๆ ของด่างโซดาไฟเข้มข้นบนผิวท่อ

ในการปรับสภาพน้ำในหม้อไอน้ำให้เป็นด่างนั้น บางครั้งก็ใส่โซดาไฟ (NaOH) ลงไปโดยตรง หรือใส่สารจำพวกฟอสเฟต ซึ่งมีจุดประสงค์ตามระบบการนี้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนของกรด ซึ่งจะเกิดขึ้นในระหว่างการเดินหม้อไอน้ำ และทำให้ผิวเหล็กเป็นสภาพที่ไม่ถูกกัดกร่อนได้ง่าย แต่ในบางกรณีก็อาจเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ เช่น ผิวเหล็กของหม้อไอน้ำบริเวณที่มีความร้อนสูง ซึ่งโซดาไฟจะเข้มข้นขึ้น ในกรณีที่เกิดขึ้นจริง ค่า pH จะสูงกว่า 12 หรือมากกว่า เมื่อมีสภาพเช่นนี้ขึ้น $Fe(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นตามสมการ (5) ก็จะทำปฏิกิริยากับด่างโซดาไฟดังนี้

$$Fe(OH)_2 + 2\,NaOH \longrightarrow Na_2FeO_2 + 2\,H_2O \qquad (13)$$

นำสมการที่ (5) และ (13) เข้ารวมกันจะได้

$$Fe + 2\,NaOH \longrightarrow Na_2FeO_2 + H_2 \qquad (14)$$

Na_2FeO_2 คือ โซเดียมเฟอร์ไรท์ (Sodium ferrite) นอกจากนี้ ด่างโซดาไฟยังทำปฏิกิริยากับแมกนีไตท์ได้

$$Fe_3O_4 + 4\,NaOH \longrightarrow 2\,NaFeO_2 + Na_2FeO_2 + 2\,H_2O \qquad (15)$$

Na_2FeO_2 ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำในหม้อไอน้ำเกิดเป็นแมกนีไตท์ชนิดที่ไม่ป้องกันการกัดกร่อน

$$3\,Na_2FeO_2 + 4\,H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + 6\,NaOH + H_2 \qquad (16)$$

หรือถ้าในน้ำมีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่

$$6\,Na_2FeO_2 + 6\,H_2O + O_2 \longrightarrow 2\,Fe_3O_4 + 12\,NaOH \qquad (17)$$

การที่ชั้นฟิล์มของแมกนีไตท์ ตามสมการที่ (16) และ (17) ไม่ป้องกันการกัดกร่อนนั้น ก็เพราะว่าเป็นชั้นที่หลุดร่อนได้ง่าย ดังนั้นการกัดกร่อนเนื่องจากด่างโซดาไฟจึงเกิดขึ้นได้ในบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง เช่น ผนังท่อของหม้อไอน้ำ ซึ่งมีไอน้ำเกิดขึ้นตลอดเวลา น้ำที่อยู่รอบ ๆ มีโอกาสจะเข้มข้นสูง ซึ่งจะทำลายชั้นแมกนีไตท์และเกิดขึ้นอีกหลายกรณีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวแล้ว สำหรับหม้อไอน้ำที่มีความดันสูงมีโอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากด่างโซดาไฟได้มากยิ่งขึ้น เพราะ

(1) น้ำที่ใช้เติมหม้อไอน้ำมักจะเป็นน้ำบริสุทธิ์ (Demineralized) จึงมีคุณสมบัติต่อต้านการเปลี่ยนแปลง ไม่สามารถยับยั้งการกัดกร่อนเนื่องจากด่างโซดาไฟได้

(2) เคมีที่ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ คือ ด่างโซดาไฟ

(3) มีระดับความร้อนไหลในผิวที่สูงมาก

(4) อุณหภูมิอิ่มตัว (Saturation Temperature) จะสูงกว่า และความเข้มข้นที่ต้องการจะต่ำกว่า จึงเกิดสารละลายเข้มข้นขึ้นได้ง่ายกว่า

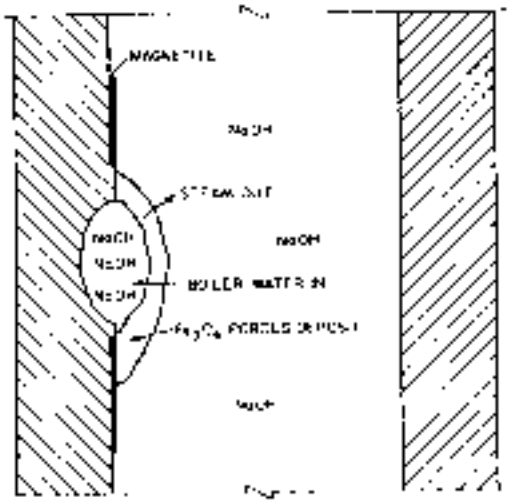
โซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในน้ำจะสลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูง เมื่อเข้าสู่หม้อไอน้ำซึ่งมีอุณหภูมิสูง โซเดียมไบคาร์บอเนตจะสลายตัวเป็นโซเดียมคาร์บอเนต ดังสมการ

$$2\,NaHCO_3 \xrightarrow{\text{ความร้อน}} Na_2CO_3 + H_2O + CO_2$$

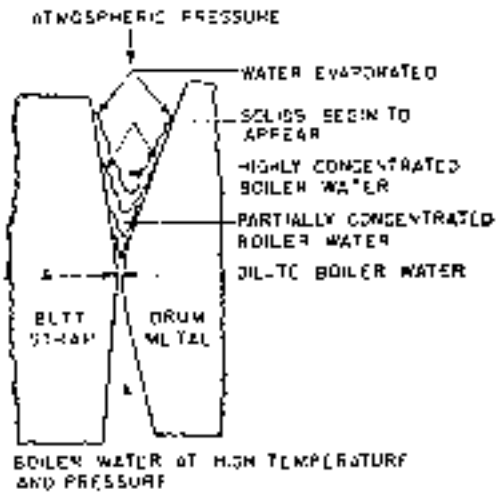
และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่อยู่ในหม้อไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับน้ำในหม้อไอน้ำ ได้ดังนี้

$$Na_2CO_3 + H_2O \xrightarrow{\text{ความร้อน}} 2\,NaOH + CO_2$$

ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนในระบบท่อไอน้ำของระบบคอนเดนเสทด้วย เนื่องจากโซดาไฟมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนเนื้อโลหะ ซึ่งเรียกว่า (Caustic Embrittlement) ซึ่งจะเกิดกับหม้อไอน้ำแบบแรงดันสูงที่ใช้โซดาไฟในการกัดกร่อนภายในหม้อไอน้ำ ซึ่งจะมีสภาพเป็นด่างสูงจนทำให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเนื้อโลหะ (Grain Boundaries) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแตกตามขอบผลึก (Intergranular Cracking) ซึ่งมักจะเกิดที่บริเวณที่ใช้หมุดย้ำและบริเวณที่เป็นรอยต่อหรือรอยสัมผัสกันระหว่างเนื้อโลหะ ทั้งนี้มีปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนภายในหม้อไอน้ำ ดังนี้

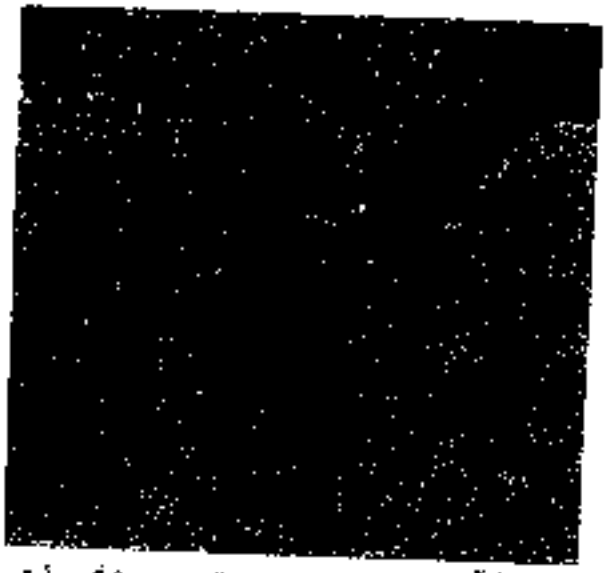


รูปที่ 5.49 การเกิดการกัดกร่อนด่างโซดาไฟเข้มข้นบริเวณโลหะรอยต่อ



รูปที่ 5.50 ภาพแสดงการเกิดการกัดกร่อนบริเวณที่มีการรวมตัวของสารละลายด่างเข้มข้น

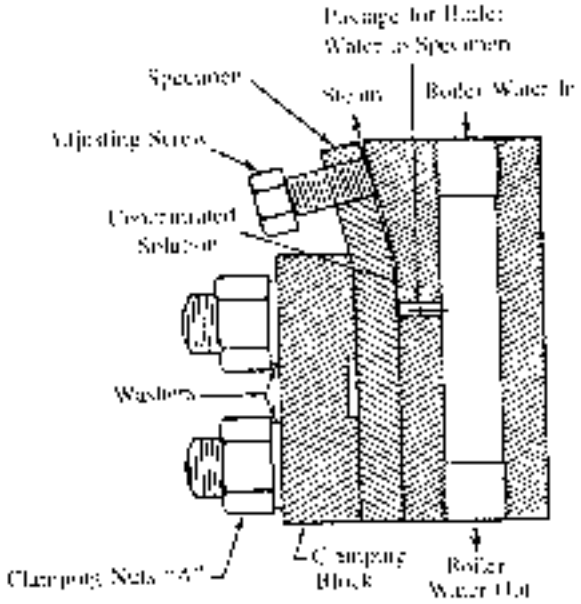
ในรูปที่ 5.49 เป็นการแสดงการกัดกร่อนของเนื้อโลหะบริเวณที่ใกล้กับผิวน้ำในหม้อไอน้ำ ซึ่งจะมีการสะสมของเกลือแร่ต่างๆ เนื่องจากน้ำในหม้อไอน้ำมีการระเหยตัวไป ทำให้เกิดการสะสมของเกลือแร่ต่างๆ ในหม้อไอน้ำมากขึ้น ความร้อนในบริเวณที่ผิวน้ำจะทำให้เกิดการระเหยตัวของน้ำเป็นไอน้ำมากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของเกลือแร่ต่างๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) และโซเดียมคลอไรด์ ตามบริเวณที่ผิวน้ำ และในบริเวณนี้โลหะจะมีการกัดกร่อนมากกว่าบริเวณอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.50



รูปที่ 9.51 ภาพแสดงผิวโลหะที่เกิดการแตกร้าวตามแนวขอบเขตระหว่างเม็ดของเนื้อโลหะและสิ่ง Decarburization

รูปที่ 9.52 ตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อนแบบแตกร้าว

รูปที่ 9.53 ภาพแสดงการแปรสัณฐานของเนื้อโลหะอันเนื่องจากการกัดกร่อนของสาร

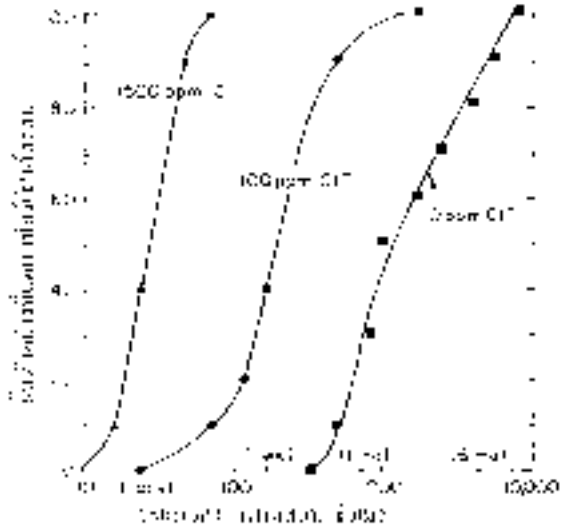


รูปที่ 9.14 เครื่องตรวจน้ำที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบแตกร้าว

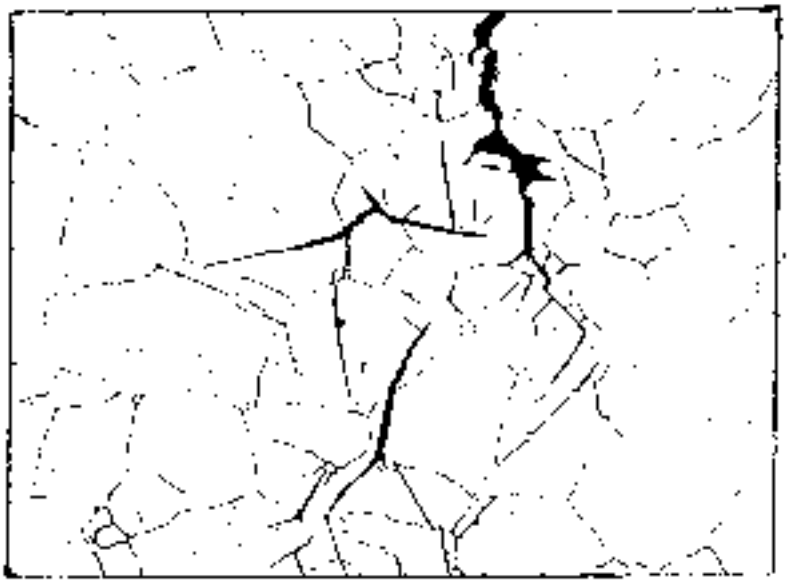
ได้มีผู้ประดิษฐ์เครื่องมือที่จะใช้เป็นตัวบอกว่า น้ำในหม้อไอน้ำนั้น ๆ มีสภาวะที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบแตกร้าวหรือไม่ โดยทำเป็นเครื่องตรวจการแตกร้าว ซึ่งมีหลักการอยู่ว่า จะนำน้ำตัวอย่างที่มีแรงดันและอุณหภูมิเหมือนในหม้อน้ำมาไหลหมุนเวียนผ่านตลอดเวลา เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 วัน ถ้าหากในตัวอย่างนี้มีสภาวะของการแตกร้าวแล้ว ก็จะแสดงว่าน้ำในหม้อไอน้ำในขณะนั้นมีสภาวะหมุนเวียนนั้นจะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบแตกร้าวได้ และจากที่เครื่องมือตรวจการแตกร้าวเกิดการแตกร้าวของแผ่นโลหะ จะทำให้เกิดการแตกร้าวของน้ำหนักในน้ำด้วย ดังนี้เพราะว่าจะต้องมีการเคลื่อนไหวของน้ำจน ถึง ของเหลวหรือของแข็งก็มีการรั่วซึมของน้ำได้ น้ำในหม้อไอน้ำนั้นจะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะนั้น และต้องมีของแข็งเกิดในหม้อไอน้ำ ซึ่งปัจจัยทั้งสามประการนี้อาจจะไม่เกิดพร้อม ๆ กันก็ได้ ดังนั้นการกัดกร่อนจริงอาจจะไม่เกิดดังที่เกิดในอุปกรณ์ทดสอบก็ได้ เครื่องมือการแตกร้าวนี้ เหมาะที่จะใช้ติดตั้งกับหม้อไอน้ำ เพื่อจะทราบได้ว่าน้ำในหม้อน้ำบริเวณใดที่มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้ และใช้เป็นเครื่องมือในการใช้สารเคมีเพื่อป้องกันปัญหานี้

5. **การกัดกร่อนเนื่องจากแรงเค้น** การกัดกร่อนแบบแตกร้าวเนื่องจากน้ำด่างในเหล็กแบบนี้จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากแรงเค้น การกัดกร่อนแบบนี้มีหลายการกัดกร่อนหลักด้วย หรือแม้กระทั่งไร้สนิมเพื่องจากเหล็กโดยเฉพาะเหล็กกล้า ถ้าเป็น Austenitic Stainless Steel นั้นจะถูกกัดกร่อนได้ง่ายเป็นพิเศษ อย่างรวดเร็ว ถ้าในน้ำมีสิ่งปนเปื้อนอยู่ในรูปของแมงกานีสคลอไรด์หรือโซเดียมคลอไรด์ ดังนั้น ถ้าในหม้อไอน้ำมีชิ้นส่วนโลหะนี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมก็ต้องระมัดระวัง

การกัดกร่อนแบบนี้ ในเครื่องยังพบว่าน้ำมีอ ก็จะเกิดการกัดกร่อนที่ในหัวต่อของเครื่องยังพบน้ำขุ่นของน้ำด่างด้วย เพราะได้สังเกตพบในโรงงานเป็นการหรือไอน้ำต่ำลง ในขณะที่เครื่องยังพบน้ำต่ำลงอยู่แล้ว ดังนั้น ถ้าเกิดการกัดกร่อนแบบนี้ขึ้นจะทำให้ไหม้ผิวหน้าของโลหะจนกระทั่งเหล็กเสียหายได้

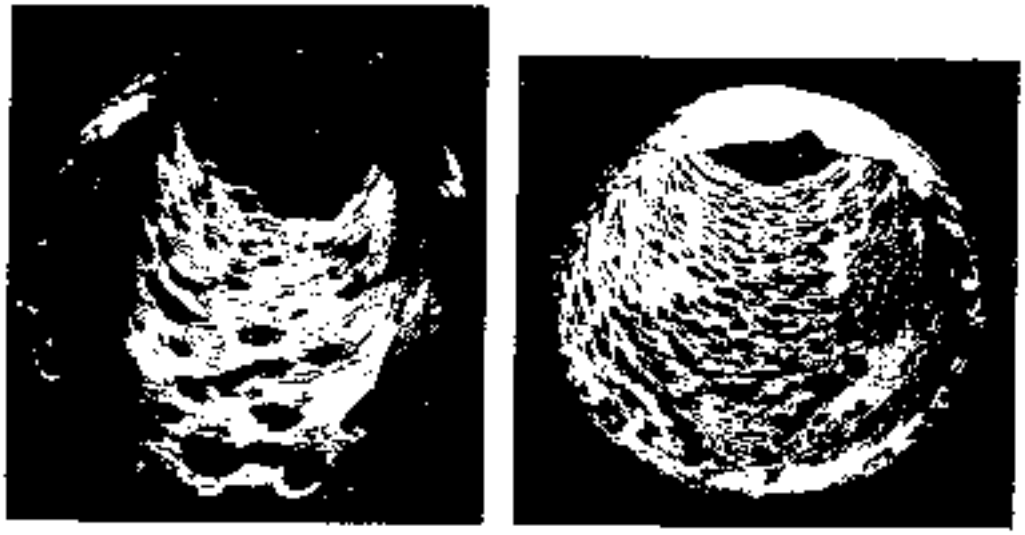


รูปที่ 3.55 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ความเข้มข้นคลอไรด์ต่างๆ

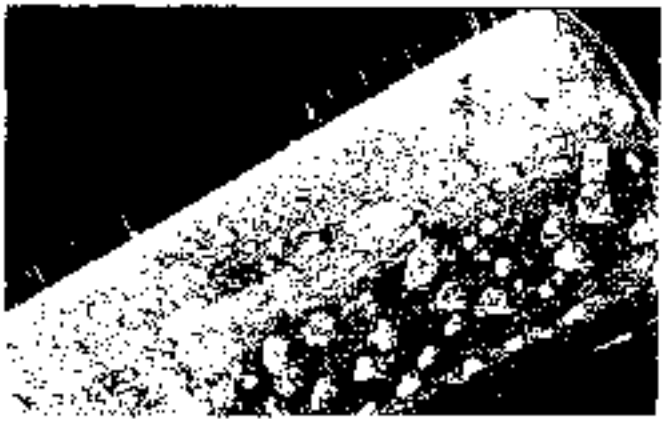


รูปที่ 3.56 การกัดกร่อนเนื่องจากแรงดันในสภาพที่มีคลอไรด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม

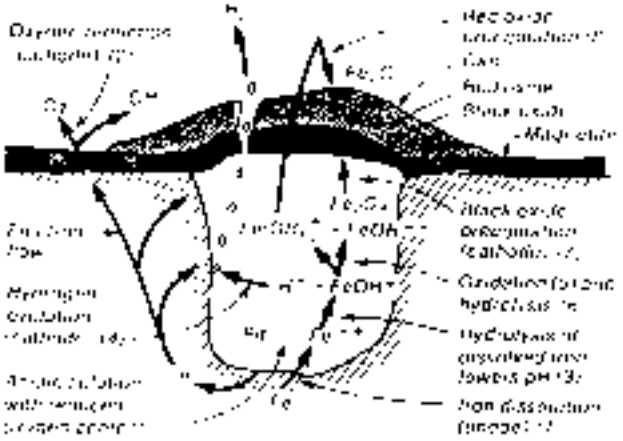
6. **การกัดกร่อนแบบเป็นหลุมเนื่องจากออกซิเจน** มีโลหะต่างๆ มากมายที่ทนต่อการกัดกร่อนของเหล็ก น้ำจะทำปฏิกิริยากับเหล็กเป็นสนิมเหล็กได้ ถ้าในน้ำมีออกซิเจนละลายอยู่ด้วย ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีเหล็กไฮดรอกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นวุ้นสีน้ำตาลแดง ถ้าน้ำมีออกซิเจนละลายอยู่ ถึงแม้ว่าจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นแล้ว ปฏิกิริยาก็จะหยุดลงเมื่อผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมีไลท์ (Chemical) ซึ่งไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสกับโลหะ ดังนั้น การกัดกร่อนของเหล็กจะเกิดขึ้นเฉพาะในบริเวณที่ขาดออกซิเจนเท่านั้น ผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนจะอยู่ที่



รูปที่ ๗.๑๐ การกัดกร่อนแบบเป็นหลุมในท่อเนื่องจากก๊าซออกซิเจน



การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting) เนื่องจากก๊าซออกซิเจน



รูปที่ ๗.๑๑ ภูมิหลังการกัดกร่อนเป็นหลุมของเหล็ก

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนเนื่องจากออกซิเจนนี้เป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ซับซ้อนมาก เมื่อเกิดการกัดกร่อนจนกระทั่งเกิดหลุมขึ้นแล้ว จะพบว่าปากหลุมมีชั้นเหล็กออกไซด์จับตัวแข็งที่มีลักษณะพรุนปิดคลุมอยู่ ภายในหลุมนั้นจะเกิดปฏิกิริยาแบบขั้วลบขึ้นและส่งจ่ายอิเล็กตรอนแก่ปฏิกิริยาแบบขั้วบวกที่ผิวรอบ ๆ ซึ่งทำให้เนื้อเหล็กถูกกัดกร่อนจนเป็นหลุมได้

$$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e \quad \text{(ขั้วลบ)}$$

ปฏิกิริยาแบบขั้วบวกจะเกิดการรีดิวซ์ออกซิเจนที่ผิวโลหะ ทำให้เกิดสภาวะ pH สูงเฉพาะบริเวณ

$$O_2 + 2H_2O + 4e \longrightarrow 4OH^- \quad \text{(ขั้วบวก)}$$

ปฏิกิริยาทั้งสองนี้จะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 0.25 โวลต์ เนื้อเหล็กที่ถูกกัดกร่อนไปนั้นจะเกิดไฮโดรไลส์ และเกิดไฮโดรเจนอิออน ซึ่งจะทำให้น้ำที่ขังอยู่ในหลุมมีค่า pH ต่ำลงไปอีก

$$Fe^{2+} + H_2O \longrightarrow FeOH^+ + H^+$$

นอกจากนี้ยังจะเกิดปฏิกิริยาแบบขั้วบวกในหลุม คือมีการไฮโดรเจนเกิดจากพื้นที่หลุมและระหว่างชั้นเหล็กออกไซด์ที่ปกคลุมอยู่ปากหลุม หลังจากนั้นก็จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิส ซึ่งทำให้เหล็กออกไซด์ที่ปิดปากหลุมเกิดตกตะกอนได้

$$(1) \quad 2FeOH^+ + \tfrac{1}{2}O_2 + 2H^+ \longrightarrow FeOH^{2+} + H_2O \quad \text{(เป็นกรด)}$$

$$(2) \quad FeOH^{2+} + H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2^+ \quad \text{(เป็นด่าง)}$$

ปฏิกิริยา (1) จะเกิดได้ดีเมื่อมีสภาวะเป็นกรด ซึ่งจะทำให้เหล็กออกไซด์สีดำ หรือแมกนีไทต์ตกตะกอนอยู่ภายในหลุมได้ ปฏิกิริยาที่เกิดตกตะกอนนี้จะทำให้ลดค่า pH

$$FeOH^{2+} + Fe^{2+} + 2H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + 6H^+$$

ที่ผิวด้านนอกของชั้นเหล็กออกไซด์สีแดงที่ปิดปากหลุมอยู่ ซึ่งจะสัมผัสกับน้ำในหม้อไอน้ำที่มีสภาพเป็นด่าง จึงเกิดปฏิกิริยา (2) ได้ดี ดังนั้น จะเกิดปฏิกิริยาเห็นได้ของเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ (Fe_3O_4)

$$2Fe(OH)_2^+ + 2OH^- \longrightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O$$

ถ้าหากมีน้ำเลี้ยงป้อนเข้าหม้อไอน้ำมีออกซิเจนละลายอยู่ จะเกิดการกัดกร่อนได้ที่ตำแหน่งแรก ๆ ของเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง ดังนั้นจึงควรมีการตรวจสอบท่อทางเข้าของเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงว่าเกิดการกัดกร่อนหรือไม่เป็นประจำ

2. **การกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน** ในหม้อไอน้ำความดันสูงหรือมีอุณหภูมิสูง จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กที่อุณหภูมิสูงได้ ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นนั้นถ้าเป็นอะตอมเล็ก ๆ ก็จะแพร่ซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อเหล็กได้ เมื่อเข้าไปในเนื้อเหล็กก็จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กเกิดเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้จะมีแรงดันทำให้เนื้อเหล็กแตกร้าว เรียกว่าเกิดการเปราะร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน และยังเกิด Decarburization ซึ่งทำให้เนื้อเหล็กไม่เหนียว การกัดกร่อนที่เกิดจากไฮโดรเจนในท่อต่าง ๆ มากในหม้อไอน้ำนั้นมักเกิดจากสารที่ทำให้เกิดสภาพเป็นกรด เช่น แมกนีเซียมคลอไรด์ หรือการควบคุมค่า pH ของน้ำในหม้อไอน้ำไม่ถูกต้อง และที่พบมากที่สุด เกิดใต้ตะกรันหรือสิ่งสกปรกเกาะติดที่ผิวด้านในของท่อ

3. **การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ** มักเกิดในท่อต่าง ๆ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของน้ำในท่ออย่างฉับพลัน ตัวอย่างเช่น เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ในท่อทองเหลืองในรีฮีทเตอร์ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณปากและปลายท่อซึ่งมีความเร็วสูงมากในท่อ นอกจากนี้ ถ้าหากเกิดความร้อนสะสมอยู่ในบริเวณใดมาก ๆ ก็จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มแมกนีไทต์เสียหายได้

9.11 การกัดกร่อนของซูเปอร์ฮีทเตอร์และระบบคอนเดนเสต

การกัดกร่อนของซูเปอร์ฮีทเตอร์เกิดจากสาเหตุ 3 ประการดังนี้

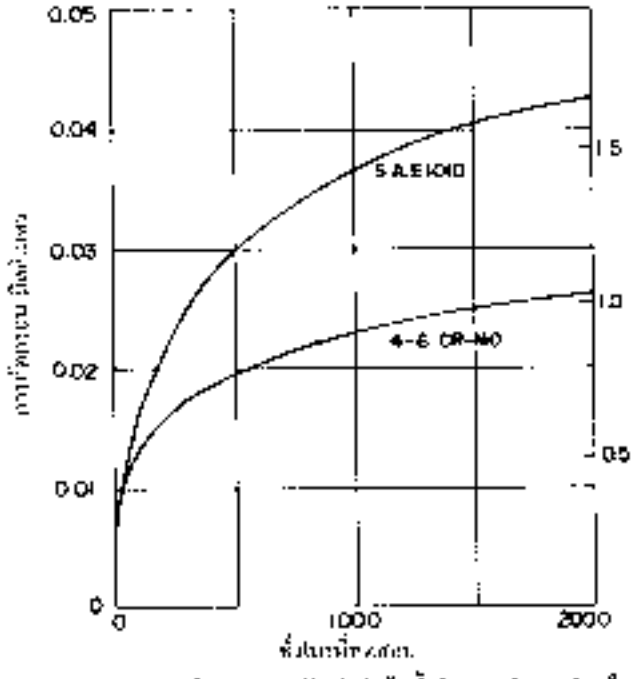
1. การกัดกร่อนจากไอน้ำที่อุณหภูมิสูง
2. การพาสารไปกับไอน้ำ (Carry over) ซึ่งจะไปสะสมตัวและทำให้เกิดการกัดกร่อน
3. มีของแข็งปนมากับไอน้ำจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นและการล้า

การกัดกร่อนของไอน้ำมักจะเกิดขึ้นกับท่อไอน้ำที่มีการออกแบบผิดพลาด ทำงานผิดพลาด หรือการกัดกร่อนของไอน้ำขึ้นกับอุณหภูมิ ความดันและความเร็ว ดังนั้น จะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับไอน้ำที่ใช้งานถึงอุณหภูมิ 455°C (850°F) แต่หลักการดังกล่าวนี้ยังสามารถนำมาใช้กับไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น

ตารางที่ 9.11 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานเหล็กผสมต่ำชนิดต่าง ๆ โดยมีการกัดกร่อนไม่เกิน 0.025 นิ้วต่อปี

ชนิดเหล็ก	°C	°F
เหล็กคาร์บอน	425	800
C-0.5 Mo	455	850
0.5 Cr-0.5 Mo	510	950
1 Cr-0.5 Mo	540	1000
2¼ Cr-1 Mo	565	1050
5 Cr-0.5 Mo	595	1100
9 Cr-1 Mo	650	1200

ไอน้ำที่อุณหภูมิสูงยังสามารถพัดพาไอโลหะผสมต่างๆ ที่ระเหยได้ง่ายไปด้วย ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนได้



รูปที่ 9.59 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าสองชนิดที่สัมผัสกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 540°C ในระยะเวลาต่าง ๆ

ระดับนี้ เมื่อสูบจ่ายน้ำออกไปใช้งานในหม้อไอน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 100°C - 480°C (212°F - 896°F) ขึ้นไป ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวของโลหะที่สัมผัสกับน้ำในหม้อน้ำได้รับความร้อนสูงขึ้นมากในทันที และจะมีการรับความร้อนจากเปลวไฟโดยตรงด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของโลหะอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ผิวของโลหะด้านที่ไม่ได้สัมผัสกับน้ำในหม้อน้ำยังคงมีอุณหภูมิต่ำอยู่ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นภายในเนื้อโลหะอย่างมหาศาล ความเครียดนี้เรียกว่า Steam Side Burning และถ้าความเครียดนี้มีมากเกินกว่าที่โลหะจะรับได้ ก็จะทำให้โลหะนั้นแตกร้าวได้ในที่สุด

ตะกรันหรือสิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่จะลอยอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำ และไม่สามารถจับสะสมอยู่บนพื้นผิวโลหะส่วนล่าง ๆ ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงขึ้นเป็นพิเศษ ตามปกติในน้ำของบอยเลอร์ทั่วไปจะมีโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสิ่งสกปรกอยู่ เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำที่ 440°C ก็จะเป็น NaOH ได้ ซึ่งจะถูก NaCl คัดไว้ ทำให้ไม่กระจายตัวไป NaCl ทำปฏิกิริยาอย่างไรกับเหล็กก็ตาม แต่ที่ทราบแน่ก็คือ NaOH ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงบริเวณใต้ตะกรันโดยเฉพาะ นำมาซึ่งความเสียหายต่อหม้อน้ำมากกว่าอุบัติเหตุใดๆ ในหม้อน้ำ ในกรณีนี้ถ้าปริมาณของตะกรันมีมากพอที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงในเวลาอันรวดเร็วมาก ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อหม้อน้ำได้ในเวลาอันสั้น ตะกรันหรือสิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่ลอยอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบของแคลเซียม ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของไบคาร์บอเนต ได้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และน้ำ ส่วนแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) จะตกตะกอนเป็น $Ca(OH)_2$ ได้โดยตรงในน้ำ ปฏิกิริยาการสลายตัวนี้จะเกิดขึ้นทันทีที่มีอุณหภูมิประมาณ 100°C ขึ้นไป ตะกรันอีกชนิดหนึ่งที่พบว่าเกิดขึ้นได้ง่าย ได้แก่ ตะกรันซิลิกา เช่น ตะกรันซิลิเกต ตะกรันเหล่านี้มักจะผสมกันอยู่กับตะกรันชนิดอื่น ๆ ด้วย ตะกรันซิลิกาที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ ซิลิเกตของแคลเซียม และแมกนีเซียม

การกัดกร่อนเนื่องจากน้ำที่มีความเป็นกรดและด่างมากเกินไปนั้น จะเป็นการทำให้เกิดปัญหาขึ้น 2 ประการ ก่อให้เกิดความเสียหายต่อหม้อไอน้ำ ซึ่งได้แก่ การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับผิวโลหะ และการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่อส่งไอน้ำ

1. น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรดต่ำ ๆ จะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวโลหะ ภายในหม้อไอน้ำ และท่อส่งไอน้ำ (Steam Trap) ตลอดจนถึงเครื่องจักรกลที่ใช้ไอน้ำเป็นต้นกำลังในการทำงาน

2. ผลของการกัดกร่อน อันได้แก่ ตะกรันตะกอนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนทั้งหมด จะถูกน้ำพาไปสะสมตามส่วนต่าง ๆ ของหม้อน้ำ ในที่สุดก็จะเป็นปัญหาเรื่องของการอุดตันของท่อต่าง ๆ ภายในหม้อไอน้ำอีกด้วย ซึ่งในที่สุดจะมีผลทำให้เกิดการอุดตันของท่อต่าง ๆ ภายในหม้อน้ำ ตามมาในที่สุด

การกัดกร่อนในระบบส่งจ่ายไอน้ำนั้น ส่วนใหญ่เกิดจากก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำ ก๊าซที่สำคัญ ๆ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และแอมโมเนีย

น้ำในหม้อไอน้ำจะมีความเป็นด่างสูงมาก เนื่องจากมีการใส่สารเคมีบางชนิดลงไป เพื่อให้มีการเกิดความเป็นด่างสูงนี้ จะสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังสมการ

$$NaHCO_3 + \text{ความร้อน} \longrightarrow NaOH + CO_2$$

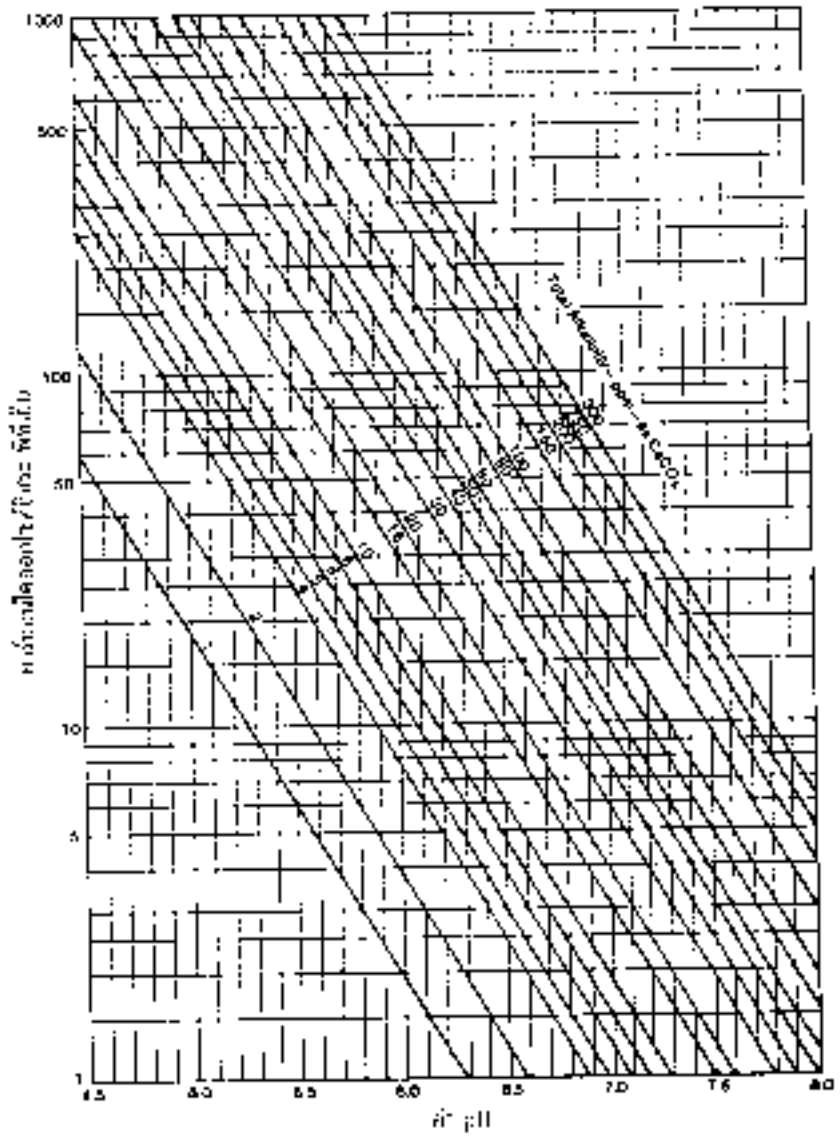
$$Na_2CO_3 + H_2O + \text{ความร้อน} \longrightarrow 2\,NaOH + CO_2$$

ปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนตจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ 100% แต่ปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมคาร์บอเนตจะเกิดขึ้น 80 % หรือเกิดได้สมบูรณ์ที่ความดันสูงกว่า 150 psig ปฏิกิริยาที่เกิดได้ 100% ถ้าความดันอยู่ระหว่าง 50-150 psig จะเกิด 50 ถึง 80% ถ้าความดัน 10-50 psig ในขณะที่ยูเรตจะ

ที่มีผลต่อปฏิกิริยาการละลายสังเกต โดยที่น้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ จะสามารถละลายแคลเซียมคาร์บอเนตได้มากขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในน้ำเดิม ๆ ที่มีอยู่ ในรูป $CaCO_3$ เมื่อสามารถละลายได้มากขึ้นจากการมีคาร์บอนไดออกไซด์ ความกระด้างที่มีเพิ่มขึ้นจากนี้ ในน้ำบาดาลจะมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำอยู่แล้ว ในการปรับคุณภาพน้ำดิบถ้ามีการใช้สารเคมีจำพวกไฮดรอกไซด์ จะทำให้เพิ่มการเกิดตะกอนคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมาอีก ในขณะเดียวกัน คาร์บอนไดออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกขึ้นเป็นดังสมการ

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

เมื่อกรดคาร์บอนิกนี้ทำปฏิกิริยากับด่างในรูปของไบคาร์บอเนตแล้ว จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้เกิดการสูญเสียด่างไปได้ เช่น การเกิดตะกอนจับตัวกัน จะทำให้ตะกอนสามารถมีค่า pH ต่ำ ซึ่งไม่ให้เกิดการกัดกร่อนได้



รูปที่ 9.60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ความเป็นด่างและคาร์บอนไดออกไซด์อิสระ

ดังนี้ ถ้าน้ำมีสภาวะเป็นกรดจัดให้เกิดฟอร์มิกคาร์บอนสูงละลายน้ำได้ดี และไม่ช่วยให้เกิดการผุกร่อน (Passivate) ซึ่งจะเกิดการผุกร่อนได้มากขึ้น

$$Fe + 2\,H_2CO_3 \longrightarrow Fe(HCO_3)_2 + H_2$$

ถ้าหากเกิดความสั่นสะเทือน หรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบรรยากาศที่เป็นไอ ไบคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนกลับตัวเป็นตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์

$$4\,Fe(HCO_3)_2 + O_2 \longrightarrow 2\,Fe_2O_3 + 8\,CO_2 + 4\,H_2O$$

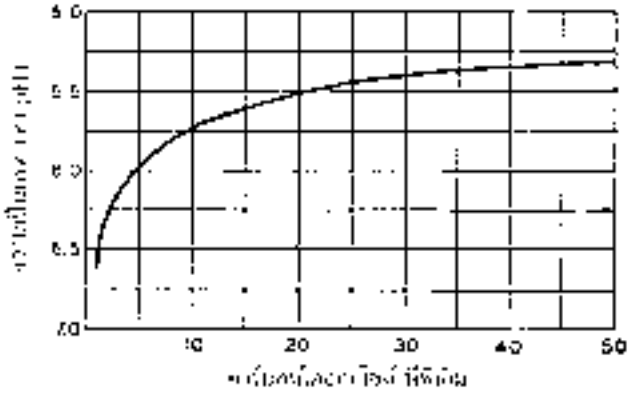
ดังนั้น ถ้าในกระแสน้ำมีทั้งก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว จะเกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว การผุกร่อนที่เกิดจากกรดคาร์บอนิกนี้ มักจะเกิดในรูปของหลุมและที่ท่อจะถูกกัดแหว่งเป็นรู ซึ่งต่างจากการกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซออกซิเจนที่ผิวหน้าเป็นหมุน อัตราการกัดแหว่งของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในกระแสน้ำนั้นเป็นไปตามสูตร

$$R = 5.7\,W^{0.8}$$

R = อัตราการผุกร่อน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l)

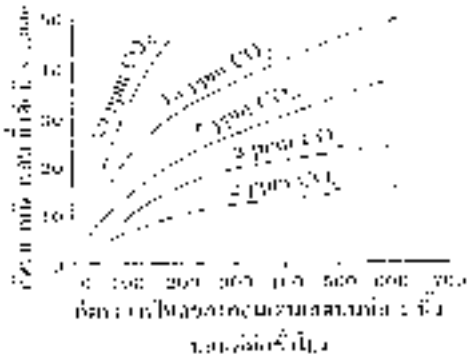
W = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในกระแสน้ำ มีหน่วยเป็น พีพีเอ็ม หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำเกิดปฏิกิริยาแล้ว จะเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนไอออน ปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเฟอร์รัสไบคาร์บอเนตและก๊าซไฮโดรเจน ถ้าน้ำมีค่า pH ของกระแสน้ำต่ำกว่า 5.0 ปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดเฟอร์รัสไบคาร์บอเนตขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งจะช่วยเพิ่มค่า pH และลดอัตราความเร็วของปฏิกิริยานี้ ถ้า pH มีค่าต่ำกว่า 5.0 อัตราการกัดกร่อนจะลดลงมาก เพราะเมื่อน้ำของกระแสน้ำมี pH มากกว่า 5.0 แล้ว ปฏิกิริยาการผุกร่อนจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น และก๊าซนี้จะทำให้เกิดชั้นป้องกันบนผิวโลหะ ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลงมาก



รูปที่ 5.21 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำจากกระแสน้ำและการให้เกิดความเป็นกรด

ในรูปที่ 5.21 แสดงความเป็นกรดของน้ำจากกระแสน้ำมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่เพียงเล็กน้อย เช่น ที่ค่า pH 5.8 แสดงว่ามีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ 10 พีพีเอ็ม น้ำจากกระแสน้ำที่มีค่า pH ต่ำกว่า 7.0 แล้ว อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในกระแสน้ำจะเริ่มคล้ายคลึงกับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ และถ้าหากน้ำมีค่าต่ำกว่า 6.0 แล้ว อัตราการกัดกร่อนของเหล็กจะขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ



รูปที่ 9.62 การหาค่าคาร์บอนไดออกไซด์อิสระในน้ำตามแนวคาร์บอนไดออกไซด์คง ๆ

ในรูปที่ [illegible] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ละลายในรูปของไบคาร์บอเนตกับค่าคาร์บอนไดออกไซด์อิสระ ๆ ระหว่างอุณหภูมิ 20 ถึง [illegible] องศาเซลเซียส

ปัญหาที่ควรคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งก็คือ ปริมาณและชนิดของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนในคลองแต่ละแห่ง เพราะน้ำเสียคาร์บอนไดออกไซด์จะมีบทบาทสำคัญในการกัดกร่อนโลหะ ดังจากการกัดกร่อนที่จะกล่าวต่อไป

ปัญหาที่ควรคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งก็คือ ปริมาณและชนิดของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนในคลองแต่ละแห่ง เพราะน้ำเสียคาร์บอนไดออกไซด์จะมีบทบาทสำคัญในการกัดกร่อนโลหะ ดังจากการกัดกร่อนที่จะกล่าวต่อไป ซึ่งมีหลักว่า ปริมาณความเข้มข้นของน้ำเสียที่ละลายในน้ำทะเลนั้นจะต้องมีความสัมพันธ์กับความดันย่อยของก๊าซนั้นที่อยู่เหนือน้ำ จากหลักนี้สามารถใช้ไปคิดหาปริมาณน้ำเสียที่ปนเปื้อนในระบบต่าง ๆ ในระบบดันตัวเป็นน้ำของท่อน้ำที่ทำงานและขุดลอกโดยกรมเจ้าท่า เพราะคนงานขุดลอกจะต้องลงไปทำงานในน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการคำนวณหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียนั้นด้วย เมื่อความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านขึ้นมาจากน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น [illegible] ปรอท ก็จะทำให้ค่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ละลายอยู่ในน้ำเสียนั้นมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในการขุดลอกท่อน้ำเสียที่มีความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าปกติ ซึ่งอาจมีค่าสูงถึง [illegible] ปรอท โดยที่ในน้ำทะเลจะมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตละลายอยู่ประมาณ ๑๐๐ ส่วนในล้านส่วน ดังนั้นเมื่อน้ำเสียมีค่าสูงกว่าปกติ ก็จะทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนออกมาได้ ซึ่งจะเป็นอุปสรรคในการขุดลอกท่อน้ำเสียนั้น ในกรณีที่ได้ตะกอนเป็นครั้งคราว แม้ว่าในน้ำที่ออกจากเครื่องกรองจะมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนอยู่ไม่มากนัก เพราะเมื่อผ่านการกรองแล้วก็ให้ไหลย้อนกลับเข้าไปในถังกรองด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกขับออกไปได้มากขึ้น ทำให้ pH สูงขึ้น จึงมีความเป็นด่างได้ง่ายขึ้น

ปัญหาการกัดกร่อนของวัสดุก่อสร้างในน้ำทะเล ขึ้นกับคุณสมบัติและความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในคลองแต่ละแห่งก็ย่อมมีปริมาณที่แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำในคลองนั้น ๆ เพราะที่อุณหภูมิต่ำจะมีคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ได้มากกว่าที่อุณหภูมิสูง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ยกตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (39 องศาฟาเรนไฮต์) จะมีค่าความเป็นกรดสูงสุดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (104 องศาฟาเรนไฮต์) นอกจากนี้ ความหนืดของน้ำก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนด้วย เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดของน้ำจะลดลง แม้ว่าจะมีแป้งกระจายอยู่ในน้ำมาก ถึงแม้ว่าอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส แต่เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดของน้ำจะลดลง ทำให้การกัดกร่อนเกิดได้ง่ายขึ้น

การกัดกร่อนในระบบคลองแต่ละแห่งนั้น จะมีการกัดกร่อนมากน้อยแตกต่างกันไป ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สรุปการกัดกร่อนเนื่องจากแก๊สต่าง ๆ ในน้ำทะเลในคลองแต่ละแห่งได้ดังนี้

(1) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C และน้ำมีความเป็นกรด pH ตั้งแต่ 6 ขึ้นไป ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนละลายน้ำมีมากกว่า 0.5 พีพีเอ็ม จะมีการกัดกร่อนน้อยมาก

(2) ถ้าสารละลายมีค่า pH 6-8 และมีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ 0.5 พีพีเอ็มขึ้นไป อัตราการกัดกร่อนจะเป็นไปตามสูตร

$$R = 34\,(C - 0.41)^{1/3}$$

R = อัตราการกัดกร่อน หน่วยเป็น mdd.

C = ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน พีพีเอ็ม

สมการนี้ใช้ไม่ได้กับการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม และไม่สมการนี้จะไม่มีค่า ประสิทธิภาพมีอยู่ด้วย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น สมการนี้จึงเหมาะสมกับการกัดกร่อนของออกซิเจนในรูปอื่น

9.11.1 การกัดกร่อนของก๊าซแอมโมเนีย

ในบางครั้งอาจมีการใช้แอมโมเนียเป็นสารปรับค่า pH ของระบบคอนเดนเสต หรือมีการใช้สารเคมีบางชนิดที่สลายตัวให้แอมโมเนีย ถ้าในระบบคอนเดนเสตมีออกซิเจนที่ปนในไอระเหยผสมของแก๊สอยู่ด้วย จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากแรงดันไอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีไอระเหยของแอมโมเนียที่มีน้ำอยู่ 0.04% ที่อุณหภูมิ 15-65°C จะเกิดการกัดกร่อนอย่างมาก และในอัตราเดียวกัน ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียก็มีผลต่อการกัดกร่อนด้วย

ตารางที่ 9.12 การกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงในเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง

โลหะ	อัตราการกัดกร่อน มิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตร - วัน
Naval B	0.02
80-20 aluminum brass	0.06
90-10 Ni copper-nickel	0.08
Admiralty metal	0.1
Monel	0.3

9.11.2 การกัดกร่อนของทองแดงในระบบคอนเดนเสต

เนื่องจากโลหะผสมทองแดงมีความต้านทานการกัดกร่อนดีกว่าเหล็ก จึงนิยมใช้ทองแดงหรือโลหะผสมของทองแดงในอุปกรณ์ต่าง ๆ ของหม้อไอน้ำ เช่น Surface Condensers, Low Pressure Feedwater Heaters, Heat Exchanger โดยปกติแล้วจะมีฟิล์มเคลือบไม่ให้มีการกัดกร่อนมากนัก แต่ถ้าหากที่เกิดจากการกัดกร่อนนั้น จะไปทับถมอยู่ตามผิวโลหะเหล็กกล้าที่ใช้ทำหม้อไอน้ำ ตะกรันเหล่านี้จะทำให้ผิวโลหะทองแดงนั้นมักจะเกิดอยู่ตามบริเวณที่มีการรับความร้อนสูง โลหะทองแดงอาจจะสลายตัวกลายเป็นแอมโมเนียเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ในรูปของ $Cu(NH_3)_4^{2+}$ หรือในรูปที่เป็นไอระเหยของแอมโมเนียและอีก เกิด

เป็นขั้นตอนกับ [illegible] ในกรณีที่ละลายน้ำได้ยาก [illegible] ปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของท่อและส่วนที่มีไอน้ำมีได้เป็นเรื่องสำคัญมาก เมื่อแน่ใจแล้วว่าน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำไม่มีออกซิเจนละลายอยู่

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นว่าออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ [illegible] ทำปฏิกิริยากับเหล็กโดยตรงเพื่อจะกัดกร่อนเหล็กได้ ดังสมการ

$$2\ Cu_2O + O_2 \longrightarrow 4\ CuO$$

ก๊าซแอมโมเนียก็จะทำปฏิกิริยาทำนองเดียวกันดังนี้

$$CuO + 4\ NH_4OH \longrightarrow Cu(NH_3)_4(OH)_2 + 3\ H_2O$$

จากสมการทั้งสองจะเห็นได้ว่าแอมโมเนียจะไม่กัดกร่อนทองแดงถ้าอากาศไม่มีออกซิเจนอยู่ ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดในการป้องกันการกัดกร่อนของทองแดงจากแอมโมเนียก็โดยการทำลายก๊าซออกซิเจนให้หมดไป หรือถ้ามีอยู่ก็ไม่ควรมีเกิน 0.5 พีพีเอ็ม

9.12 การกัดกร่อนในเครื่องกังหันไอน้ำ

การกัดกร่อนในเครื่องกังหันไอน้ำมีหลายชนิด การกัดกร่อนที่ใบพัดเสียส่วนใหญ่ จึงมีสาเหตุเนื่องจากมีมลทินต่าง ๆ เจือปนอยู่ในไอน้ำที่ไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำ

มลทินที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนมีดังนี้

- แอมโมเนีย
- ออกซิเจน
- ซัลไฟด์
- คลอไรด์
- ไฮโดรเจนซัลไฟด์
- ไฮโดรเจนคาร์บอเนต

รูปที่ 9.43 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุมบนใบพัดกังหัน

ถ้าระดับความเป็นกรดด่างของน้ำต่ำกว่า 8.4 น้ำจะมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็กและเหล็กกล้าได้ ซึ่งจะทำให้ท่อเสียหายได้ง่าย ถ้าน้ำมีความกระด้างสูงจะทำให้เกิดตะกรันได้ง่าย ถ้าน้ำมีคลอไรด์ Chloride ที่ทนต่อการกัดกร่อนสูง จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมได้ง่าย ดังรูปที่ 9.43

การกัดกร่อนแบบนี้เกิดง่าย ในขณะที่หยุดใช้งานและสัมผัสกับความชื้นในอากาศ ไอที่มีคลอไรด์จับบนผิวโลหะแล้ว นอกจากนี้แล้วในน้ำส่วนใหญ่ ๆ ของน้ำจืดก็มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ เพราะมีคลอไรด์และไบคาร์บอเนตอยู่ ส่วนน้ำทะเล จึงทำให้โลหะที่ระดับลงเป็นตัวไฟฟ้าเกิดกัดกร่อนได้ในขณะที่ใช้งาน การกัดกร่อนเนื่องจากแรงดันนั้น เนื่องมาจากสาเหตุ 3 ประการคือ

1. ต้องมีแรงดันเกิดในหม้อไอน้ำ
2. ต้องมีวัสดุหรือบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนเจาะเข้าไป
3. มีสภาพแวดล้อมที่มีการแตกหักต่าง ๆ ทำให้เกิดการกัดกร่อนในปริมาณที่มากขึ้น

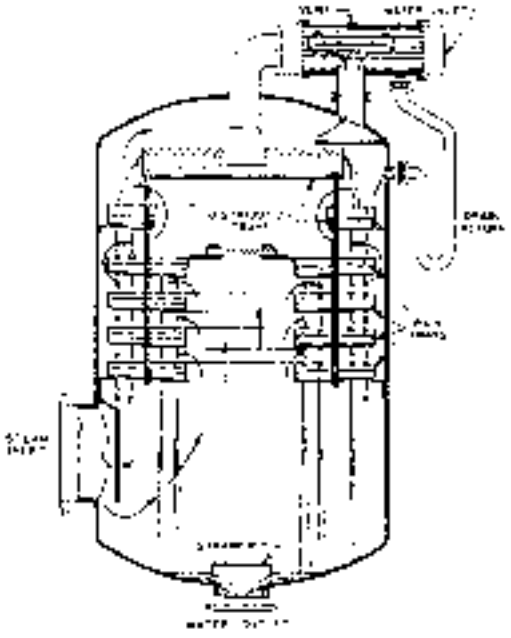
9.13 การป้องกันการกัดกร่อนในหม้อไอน้ำ

ก๊าซออกซิเจน เป็นตัวการสำคัญของการกัดกร่อนแบบแอ็บหลุมในหม้อไอน้ำทั้งระบบ ดังนั้น จึงต้องพยายามไม่ให้น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำมีก๊าซออกซิเจนอยู่ มีวิธีที่จะกำจัดก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำป้อนและระบบเครื่องกลเสียก่อน วิธีการขจัดก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำมี 2 วิธีคือ

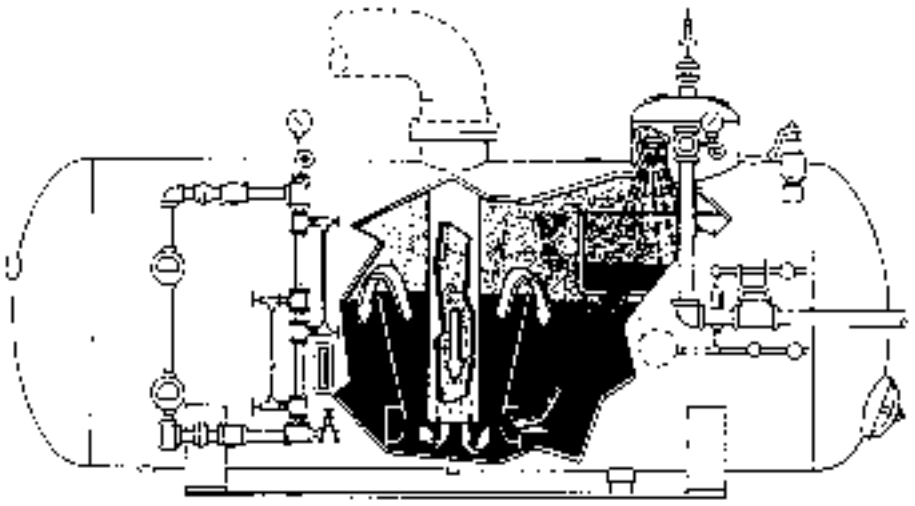
1. วิธีทางกล
2. ใช้สารเคมี

9.13.1 วิธีทางกล

วิธีทางกล เรียกว่า Deaerator or Degasifier เป็นวิธีไล่ก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำให้หมดไปด้วยความร้อน โดยอาศัยกฎของดอลตันและกฎของเฮนรี่ ในการต้มน้ำให้เดือดในน้ำที่เกิดขึ้นจะมีก๊าซออกซิเจนอยู่น้อยมาก ดังนั้น ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้น ก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกตัวออกมาสู่ในบรรยากาศได้มากขึ้น เมื่อให้น้ำมาสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนในอากาศ ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำมาก เช่นที่ 0°C จะละลายได้ 10.08 พี.พี.เอ็ม แต่ที่ 90°C จะละลายได้เพียง 5.6 พี.พี.เอ็ม

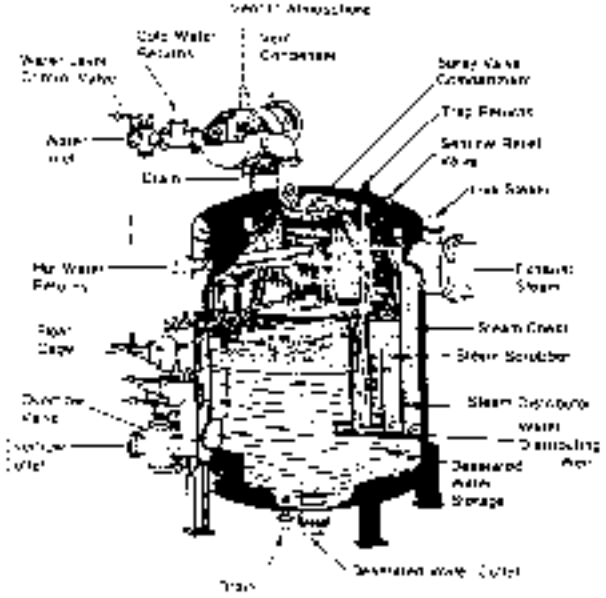


รูปที่ 9.44 สีทแทร์นาดเป็นชั้น ๆ และสัมผัสโดยตรง

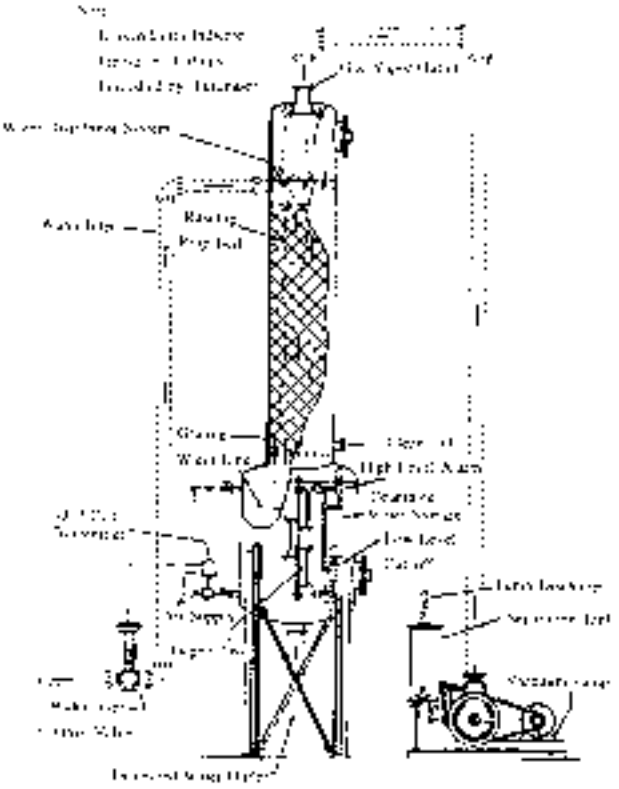


รูปที่ ๙.๔๕ ดีแอเรเตอร์แบบพ่น

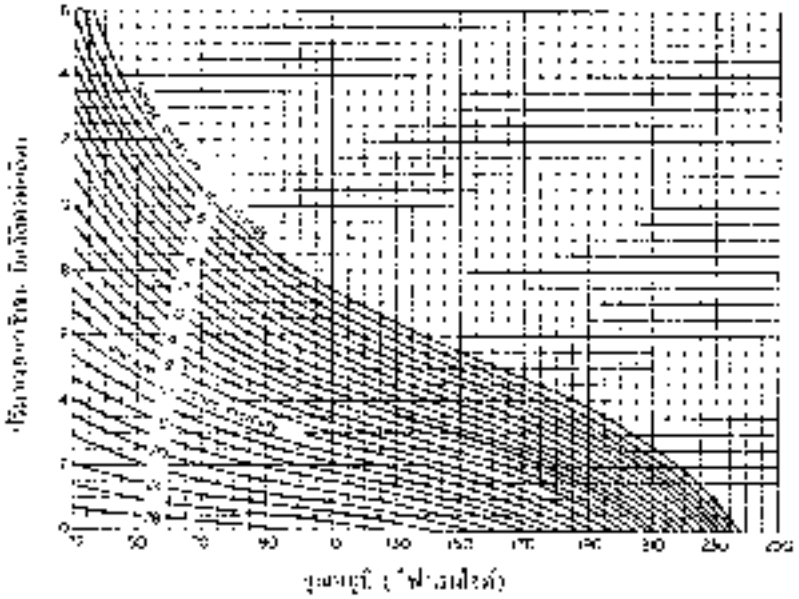
อุปกรณ์ให้ความร้อนที่ใช้ความร้อนนี้มีหลายแบบ เช่น แก๊สเรเจอร์ไอ (Open Heater) เหมาะที่จะใช้กับหม้อไอน้ำความดันต่ำที่ไม่มีเครื่องอุ่นเหล็กไหม้ แบบนี้จะไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากน้ำให้หมด จะเหลือ ๐.๑ ถึง ๐.๒ มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ ความร้อนที่อุ่นน้ำนี้ยังได้จากการนำไอกลับมาใช้ได้อีก และทำให้ความเป็นกรดในน้ำลดลงอีกด้วย แบบนี้เป็นแบบที่ให้น้ำสัมผัสกับไอน้ำโดยตรง โดยการฉีดพ่นจากชั้นวัสดุกันอยู่ หรือเป็นการพ่นน้ำให้สัมผัสกับไอน้ำที่ดี แบบที่จัดอยู่ในพวกนี้ เช่น ดีแอเรเตอร์ (Deaerator) ในการที่จะใช้ดีแอเรเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เราจะใช้ในการอุ่นน้ำเมื่อหม้อไอน้ำร้อนขึ้นเต็มที่ และที่จะมีอุณหภูมิของน้ำในดีแอเรเตอร์สูงกว่าน้ำเดือด ๑๐๐๐ มิลลิลิตรต่อลิตรเท่านั้น



รูปที่ ๙.๔๖ ดีแอเรเตอร์แบบสเปรย์



รูปที่ 9.67 ตัวอย่างการออกแบบหม้อไอน้ำ



รูปที่ 9.68 การออกแบบถังเก็บน้ำร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความดันต่าง ๆ

นอกจากวิธีใดๆ ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีวิธีลดความดันเหนือน้ำในภาชนะให้มีสภาวะ สุญญากาศ วิธีนี้ก็คือการทำให้เป็นสุญญากาศ (Vacuum Deaeration) โดยไม่ต้องอุ่นน้ำให้ร้อน แต่วิธีนี้จะไม่กำจัดออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และนิวเคลียส มีข้อจำกัดว่าจะมีก๊าซออกซิเจนเหลืออยู่ในน้ำ ๐.๑ มิลลิลิตรต่อลิตร จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ถ้าลดความดันลงมากและเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ก๊าซออกซิเจนก็จะละลายในน้ำได้น้อยลง

ตารางที่ ๑.๑๑ ประสิทธิภาพของเครื่องไล่ก๊าซออกซิเจนแบบต่างๆ

	ปริมาณออกซิเจนที่เหลือ มิลลิลิตรต่อลิตร
Feed Water Heater	0.1 – 0.5
Deaerating Heater	0.05
Deaeration	0.005

๑.๑๓.๒ ใช้สารเคมี

ดังได้กล่าวมาแล้ว การขจัดก๊าซออกซิเจนด้วยสุญญากาศนั้น จะขจัดออกได้ไม่หมดสิ้น เท่าที่สุดจึงตกค้างปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเลี้ยงประมาณไม่เกิน ๐.๐๐๕ ซีซี/ลิตร หรือ ๐.๐๐๗ พีพีเอ็มเท่านั้น อุปกรณ์ขจัดก๊าซออกซิเจนเหล่านี้ก็มีโอกาสที่จะเสื่อมประสิทธิภาพการใช้งานได้ง่าย ดังนั้น วิธีการที่ดีที่สุดก็ต้องใช้สารเคมีควบคู่กับเครื่องขจัดก๊าซออกซิเจนด้วย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและประหยัดที่สุด เพราะการใช้สารเคมีขจัดก๊าซออกซิเจนเพียงอย่างเดียวนั้นเป็นการสิ้นเปลืองมากไป สารเคมีที่นิยมใช้ขจัดก๊าซออกซิเจนในน้ำเลี้ยง ได้แก่ โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium Sulfite – Na_2SO_3) และไฮดราซีน (Hydrazine – N_2H_4) สารทั้งสองมีวิธีการใช้งานและข้อแตกต่างกันดังนี้

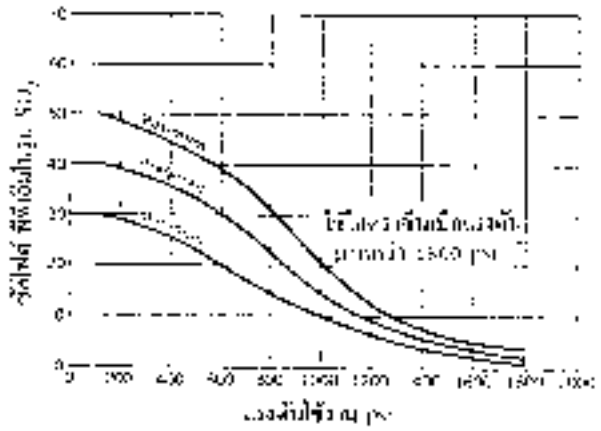
1. **โซเดียมซัลไฟต์** เป็นของแข็งมีสีขาว โซเดียมซัลไฟต์จะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนดังนี้

$$2\,Na_2SO_3 + O_2 \longrightarrow 2\,Na_2SO_4$$

นิยมใช้โซเดียมซัลไฟต์กับหม้อไอน้ำความดันต่ำและปานกลาง มีแรงดันต่ำกว่า ๑๐๐ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปฏิกิริยาขจัดก๊าซออกซิเจนจะเกิดได้ดีที่ pH และอุณหภูมิสูง ถ้าดูจากสมการ โซเดียมซัลไฟต์บริสุทธิ์ ๗.๘๘ ส่วน จะขจัดก๊าซออกซิเจนได้ ๑ ส่วน ในทางปฏิบัติมักใช้โซเดียมซัลไฟต์เทคนิค (Technical Grade) และคิดว่ามีการสูญเสียไปบ้างเนื่องจากการใช้งานและน้ำหม้อน้ำ (Blowdown) ดังนั้นโซเดียมซัลไฟต์ ๘ ส่วน จะจับก๊าซออกซิเจน ๑ ส่วน แต่เพื่อให้มั่นใจได้ว่าน้ำในหม้อต้มน้ำจะไม่มีก๊าซออกซิเจนตกค้างอยู่แม้แต่น้อย ดังนั้นจึงมีปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเหลือค้างอยู่ในน้ำหม้อไอน้ำดังนี้

ตารางที่ 9.14 ปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ที่ควรมีเหลือค้างอยู่ในน้ำหม้อไอน้ำ

ความดันใช้งาน psig	โซเดียมซัลไฟต์ในรูป SO_3 มิลลิกรัมต่อลิตร
ต่ำกว่า 300	30 - 70
301 - 600	20 - 60
601 - 900	15 - 50
901 - 1,200	10 - 40
1,201 - 1,500	5 - 30

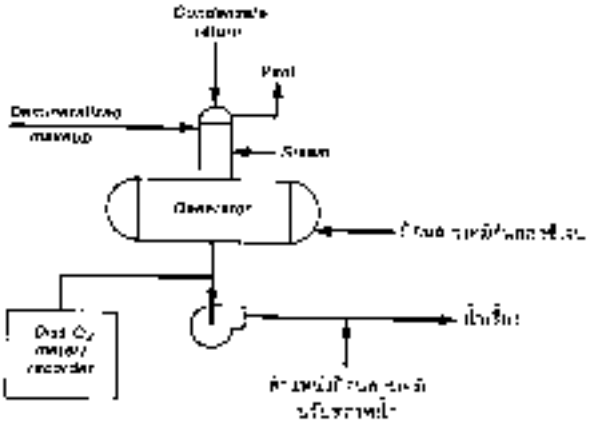


รูปที่ 9.69 ปริมาณซัลไฟต์ค้างเหลือที่ควรมีในน้ำหม้อไอน้ำ

เมื่อมีออกซิเจนปนอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนภายในหม้อไอน้ำ และท่อต่างๆ ที่ใช้ส่งไอน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ก่อนที่จะนำน้ำป้อนนี้ไปใช้งาน ซึ่งวิธีการกำจัดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำนั้นมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละโรงงาน ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการกำจัดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำด้วยวิธีการทางเคมี โดยการใช้สารเคมีที่เรียกว่า โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ในการกำจัดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ซึ่งสารเคมีชนิดนี้มีราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโซเดียมซัลไฟต์กับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำ เป็นดังสมการต่อไปนี้

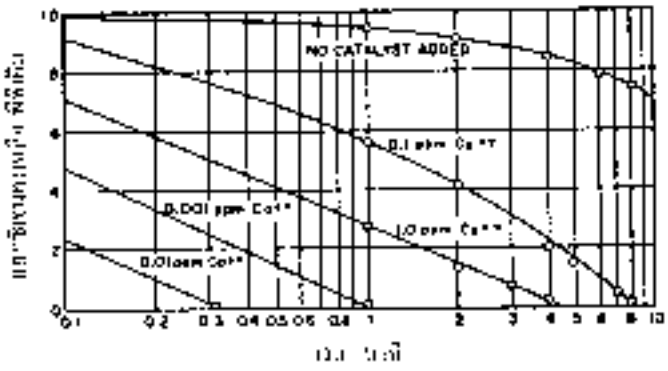
$$2Na_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2Na_2SO_4$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าโซเดียมซัลไฟต์ 1 โมเลกุล จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมเลกุล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งเป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนภายในหม้อไอน้ำ และท่อต่างๆ ที่ใช้ส่งไอน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้โซเดียมซัลไฟต์ในปริมาณที่เหมาะสมกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้โซเดียมซัลไฟต์ประมาณ 8 ppm ต่อออกซิเจน 1 ppm ที่ละลายอยู่ในน้ำป้อนหม้อไอน้ำ

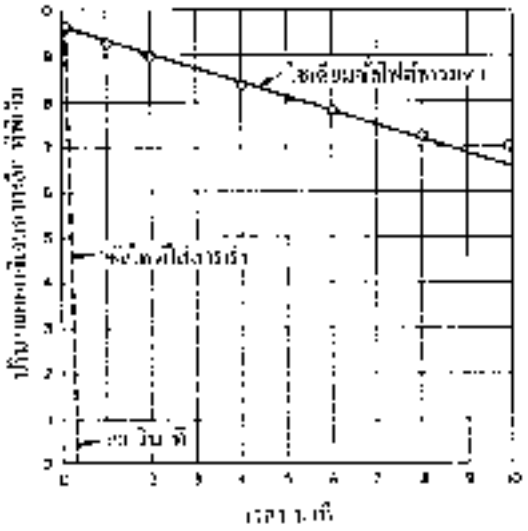


รูปที่ 9.70 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งในการป้อนสารเคมีขจัดออกซิเจนในน้ำเลี้ยง

อัตราการเกิดของปฏิกิริยาไฮโดรเจนซัลไฟด์กับคลอรีนจะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ pH ของน้ำเสีย ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 10 °C จะทำให้ปฏิกิริยาเร็วขึ้นถึงสองเท่า ที่อุณหภูมิ 100 °C หรือสูงกว่า ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นทันทีทันใด ถ้า pH ของน้ำเสียอยู่ระหว่าง 8 - 10 ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าที่ pH อื่น ๆ ในการใช้งานจริงนั้น เรื่องไม่ที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นนั้นจะไม่ประหยัด ดังนั้น จึงนิยมใช้โซเดียมซัลไฟต์ที่มีคอปเปอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เข้าไปผสมด้วย เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาของคลอรีนและซัลไฟด์ได้เร็วขึ้น แม้ไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาก็ตาม แต่จะไม่นิยมใช้งานจริงนั้น ถ้าหากระยะทางระหว่างตำแหน่งที่ปล่อยน้ำเสียเข้าไปกับหม้อไอน้ำมีมากพอที่ให้เวลาเพียงพอแก่การทำปฏิกิริยาขึ้นไป ปฏิกิริยาจะเกิดในสายน้ำ เมื่อน้ำเสียเข้าสู่หม้อไอน้ำ ความร้อนจะทำให้ก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่แยกตัวออก และถูกพาไปกับไอน้ำไปสู่ระบบจ่ายไอน้ำและคอนเดนเสต ทำให้เกิดการกัดกร่อนในบริเวณนั้นได้ สารเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กัน ได้แก่ โลหะหนักที่เป็นประจุบวกและมีวาเลนซีเท่ากับ 2 หรือมากกว่า เช่น ทองแดง โคบอลต์ แมงกานีส และเหล็ก จากการใช้เพียงตัวใดตัวหนึ่งหรือผสมกัน ที่นิยมใช้กันคือ $CuCl_2$ และ $CoSO_4$ ซึ่งหากใช้ร่วมกันแล้วจะเกิดสมบัติเสริมกันดีขึ้น ในปริมาณเข้มข้นน้อยเพียง 0.2 ppm เท่านั้น ก็ใช้โคบอลต์คลอไรด์ได้ผลดีในอัตรา 1.0 ppm



รูปที่ 9.71 ผลของโคบอลต์ต่ออัตราการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลไฟต์



รูปที่ 9.72 เปรียบเทียบอัตราเร็วของการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนของโซเดียมซัลไฟต์ระหว่างมีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ในรูปที่ ๙.๒๘ จะเห็นได้ว่าไซเดียมซัลไฟต์นั้น ใช้เวลาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนนาน ๗๐ นาที ปริมาณออกซิเจนลดลงจาก ๘.๐ พีพีเอ็มเหลือ ๐.๐ พีพีเอ็มเท่านั้น หรือเทียบกันในกรณีมีใช้โซเดียมซัลไฟต์ที่ใส่สารเร่งปฏิกิริยา (Catalyzed sodium sulfite) ซึ่งจะทำออกซิเจนหมดไป ๑๐ วินาที แม้ว่าการใส่สารเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็วมากเท่าใดก็ตาม ค่า pH ของน้ำเลี้ยงก็ยังมีผลต่อความเร็วของปฏิกิริยาด้วย เพราะที่ pH ๙.๐ ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าที่ pH ๙.๕ ถึงสิบเท่า ในกรณีที่ใช้เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง (Economizer) ในน้ำเลี้ยงควรมีปริมาณซัลไฟต์เหลือตกค้างเพียง ๓๐-๔๐ พีพีเอ็ม และมี pH ๙.๐ เพื่อจะป้องกันมิให้เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงถูกกัดกร่อนจากออกซิเจน

ถึงแม้ว่าจะมีการใช้ซัลไฟต์ที่เติมลงในปฏิกิริยา เป็นระยะๆ ในการป้อนเข้าท่อน้ำเลี้ยงรวมกับสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่เติมเพื่อจุดประสงค์อื่น เพราะสารเคมีนั้นอาจจะไปทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาให้เสื่อมประสิทธิภาพได้ ซึ่งในที่สุดก็จะประโยชน์อะไรเลยในการที่ต้องเสียเงินซื้อของที่มีคุณภาพดีพิเศษ แต่ใช้งานเหมือนซัลไฟต์ธรรมดา ดังนั้น ในการที่จะสารละลายของซัลไฟต์ที่มีสารเร่งปฏิกิริยานี้ควรจะแยกต่างหากจากสารเคมีอื่น ๆ และมีข้อควรปฏิบัติดังนี้คือ

๑. ในถังละลายโซเดียมซัลไฟต์นั้น ควรออกแบบให้ห่างไกลจากถังพักน้ำเลี้ยง เพื่อให้มีเวลาละลายตกค้างอยู่นานประมาณ ๑๐-๑๕ นาที ก่อนที่จะใช้งานหมุนเวียน เมื่อเติมสารละลายชุดใหม่ลงไปจะได้มีระยะเวลาค้างอยู่ในถังนานพอควร

๒. ในกรณีที่ถังบรรจุไม่ได้ต่อเป็นคอท่อไว้ เมื่อเครื่องกรองละลายโซเดียมซัลไฟต์แล้วจะต้องทิ้งไว้ (Age) ประมาณ ๑๒ ชั่วโมง เพื่อกระตุ้นให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดีขึ้น

๓. ในการเตรียมสารละลายโซเดียมซัลไฟต์นั้น ถ้ามีการกวนโดยเครื่องกลแบบ ต้องระมัดระวังอย่าให้เกิดฟองแก๊สน้ำมันหรือไขมันในถังหรือในหัวเม็ดหมุนหมุน เพราะจะดูดอากาศเข้าไปในน้ำ ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีโดยไร้ประโยชน์

๔. ถังเตรียมและถังพักสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ควรมีท่อป้อนน้ำอุ่นจากน้ำเลี้ยง ควรใช้หม้อกลั่นไอน้ำ ๑๐๐ หรือ ๒๐๐ ปอนด์

๕. ควรใช้โซเดียมซัลไฟต์ชนิดที่มีสารเร่งปฏิกิริยา เช่นอุตสาหกรรมน้ำเลี้ยงเรียกว่า ซัลไฟต์ (ราคาแพงกว่า) หรือในกรณีที่ใช้สารประกอบ Chelate เพื่อป้องกันละอองกรดกัดกร่อนจะดีมาก ซึ่งจะได้กล่าวถึงในภายหลังนี้

ข้อดีและข้อเสียในการใช้โซเดียมซัลไฟต์ มีดังนี้

ข้อดี

๑. เป็นสารเคมีที่หาง่าย ราคาถูก

๒. ไม่เป็นพิษหรืออันตรายให้เกิดพิษแก่ผู้ใช้งาน

๓. ไอน้ำที่ผลิตได้ สามารถใช้สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ที่กินในการอาหารได้ปลอดภัย

๔. ในกรณีที่ระบบน้ำเลี้ยงไม่มีเครื่องไล่ก๊าซออกซิเจน การใช้โซเดียมซัลไฟต์จับออกซิเจนจะประหยัดกว่าใช้สารเคมีชนิดอื่น ๆ

๕. ให้ได้ผลดีพอสมควร แม้ที่อุณหภูมิน้ำเลี้ยงต่ำ

ข้อเสีย

1. ใช้ได้กับหม้อไอน้ำความดันต่ำและปานกลางเท่านั้น หม้อไอน้ำความดันสูงมีข้อแม้ค่าปริมาณ TDS ในน้ำหม้อไอน้ำ เพราะโซเดียมซัลเฟตที่เกิด และซิลิกาที่ผสมอยู่ในน้ำ จึงไปเพิ่มปริมาณ TDS ในน้ำหม้อไอน้ำ ทำให้ต้องระบายน้ำทิ้ง (Blowdown) มากและบ่อยขึ้น เป็นการสูญเสียพลังงานความร้อนส่วนหนึ่ง และอาจเกิดปัญหาการพาสารไปกับไอน้ำ (Carry over) ซึ่งจะทำให้เกิดคราบตะกรันที่ท่อของซูเปอร์ฮีทเตอร์ หรือใบพัดกังหันและอาจแผ่นโลหะของท่อคอนเดนเซอร์

2. น้ำที่ใช้ฉีดน้ำใช้สำหรับฉีดน้ำลดอุณหภูมิ (Desuperheat or Attemperator Spray Water) จะต้องไม่มีโซเดียมซัลไฟต์ตกค้างจากการเติมมากเกินไป เพราะมันจะกลายเป็นไอพร้อมกับไอน้ำ ทำให้เกิดปัญหาเรื่องตะกรันตามจุดที่ไอพ่น ทำให้เกิดปัญหาเรื่องตะกรันตามจุดที่ไอพ่น

3. ถ้าใช้ในหม้อน้ำไอน้ำที่มีความดันสูงกว่า 900 psig แล้วโซเดียมซัลไฟต์จะสลายตัวด้วยความร้อน

$$Na_2SO_3 + H_2O + \text{ความร้อน} \longrightarrow 2\,NaOH + SO_2\uparrow$$

$$4\,Na_2SO_3 + 2\,H_2O + \text{ความร้อน} \longrightarrow 3\,Na_2SO_4 + 2\,NaOH + H_2S\uparrow$$

ทั้งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไฮโดรเจนไซด์ไนโตรเจนที่มีคุณสมบัติกัดกร่อนสูง จึงจะทำให้เกิดการกัดกร่อนในท่อส่งไอน้ำและระบบคอนเดนเสทได้ ในกรณีที่มีเครื่องทำน้ำไอน้ำ SO_2 ในน้ำจะละลายในคอนเดนเสทจนกลายเป็นกรดซัลฟูริค ซึ่งจะทำให้ค่า pH ของคอนเดนเสทลดต่ำมากจนทำให้เกิดการกัดกร่อนในท่อน้ำป้อนได้ การแก้ไขการกัดกร่อนนี้เกิดขึ้นได้ด้วยการเติมสารประเภท Amine เพื่อเพิ่มค่า pH แล้วจึงจ่ายที่ความดัน 600-800 psig ก๊าซจะสลายตัวได้ขึ้นกับปริมาณ pH

4. ในหม้อน้ำความดันสูงที่มีการใช้ระบบ Coordinated Phosphate pH ควบคุมสภาพน้ำในหม้อไอน้ำอยู่ ถ้ามีการใช้โซเดียมซัลไฟต์เพราะการเพิ่มปริมาณโซเดียมไอออนจะไปรวมกับฟอสเฟตเกิดเป็นโซเดียมฟอสเฟตขึ้นมาอีกด้วย

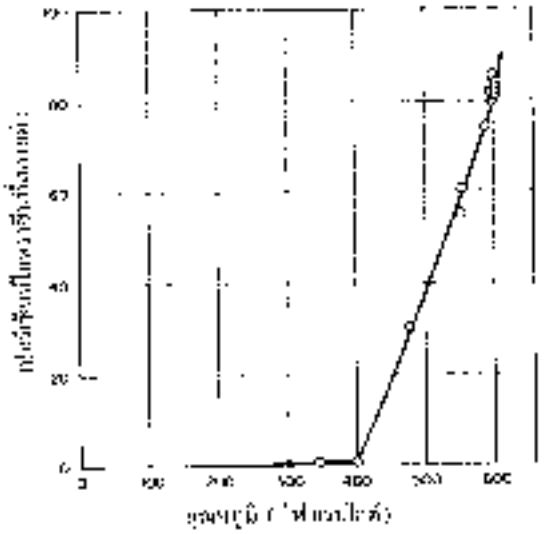
2. **ไฮดราซีน** นิยมใช้กันมากของหม้อน้ำขนาด 15-3500 เพราะไฮดราซีนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ผลมากกว่าเมื่อเทียบกับโซเดียมซัลไฟต์ ไฮดราซีนเป็นสารที่เป็นพิษและมีฤทธิ์กัดผิวหนังมนุษย์ได้ จำเป็นจะต้องมีวิธีการที่ปลอดภัยในการใช้งาน ไฮดราซีนจัดเป็นสารจำพวก Reducing Agent ปฏิกิริยาเคมีของไฮดราซีนเป็นดังนี้

$$N_2H_4 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + N_2\uparrow$$

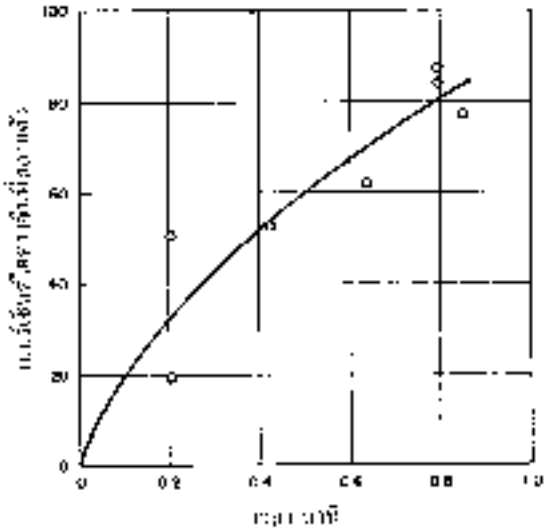
ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ก๊าซไนโตรเจนกับน้ำ ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดๆ ทั้งสิ้น ดังนั้น การใช้ไฮดราซีนจึงไม่เพิ่มปริมาณ TDS ในน้ำหม้อไอน้ำ ตามสมการ ไฮดราซีน 1 พีพีเอ็ม จะจับตัวกับก๊าซออกซิเจน 1 พีพีเอ็ม ในการใช้งานทั่วไปใช้ไฮดราซีน 1.5-2 พีพีเอ็มกับออกซิเจน 1 พีพีเอ็ม ที่ความดันสูงกว่า 2 psig (1 บาร์ G) ไฮดราซีนจะกลายเป็นไอไปกับไอน้ำจึงจะเข้าสู่ระบบคอนเดนเสทได้ ประการต่อมาก๊าซออกซิเจนในระบบคอนเดนเสทลดลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ ไฮดราซีนที่ช่วงอุณหภูมิ 150-250°C ไฮดราซีนจะสลายเป็นไนโตรเจนและแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิเกินกว่า 250°C ไฮดราซีนจะสลายตัวได้ดังนี้

$$3\,N_2H_4 \longrightarrow 4\,NH_3 + N_2\uparrow$$

$$2\,N_2H_4 \longrightarrow 2\,NH_3 + N_2\uparrow + H_2\uparrow$$



รูปที่ 9.23 แสดงอุณหภูมิที่อุตสาหกรรมดัดรองไฮดราซีน 0.5 พีพีเอ็ม



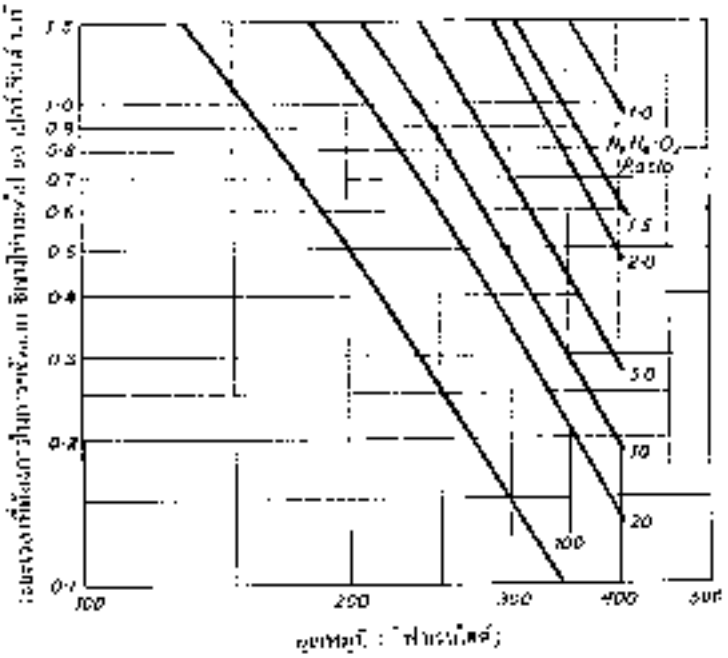
รูปที่ 9.24 อัตราการสลายตัวของไฮดราซีนที่อุณหภูมิ 600 °F

ที่ระดับไมเลียที่เกิดขึ้นนั้น ถ้ามีไอของทองแดงอยู่ด้วย จะเกิดการกัดกร่อนโลหะทองแดงและโลหะผสมทองแดงได้ ไฮดราซีนยังเป็นสารป้องกันการกัดกร่อนได้อีกด้วย เพราะสามารถรีดิวส์คิวปริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ให้กลายเป็นชั้นป้องกันแมกนีไทท์ (Fe_3O_4) ได้

$$N_2H_4 + 6\,Fe_2O_3 \longrightarrow 4\,Fe_3O_4 + 2\,H_2O$$

ดังนั้น ภายในหม้อน้ำจะมีชั้นฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนของแมกนีไทท์เกิดขึ้นได้ ไฮดราซีนยังรีดิวส์ทองแดงออกไซด์ (CuO) ที่มีสีดำให้กลายเป็น Cu_2O มีสีแดง ซึ่งเป็นชั้นป้องกันการกัดกร่อน

$$N_2H_4 + 4\,CuO \longrightarrow 2\,Cu_2O + 2\,H_2O + N_2\uparrow$$



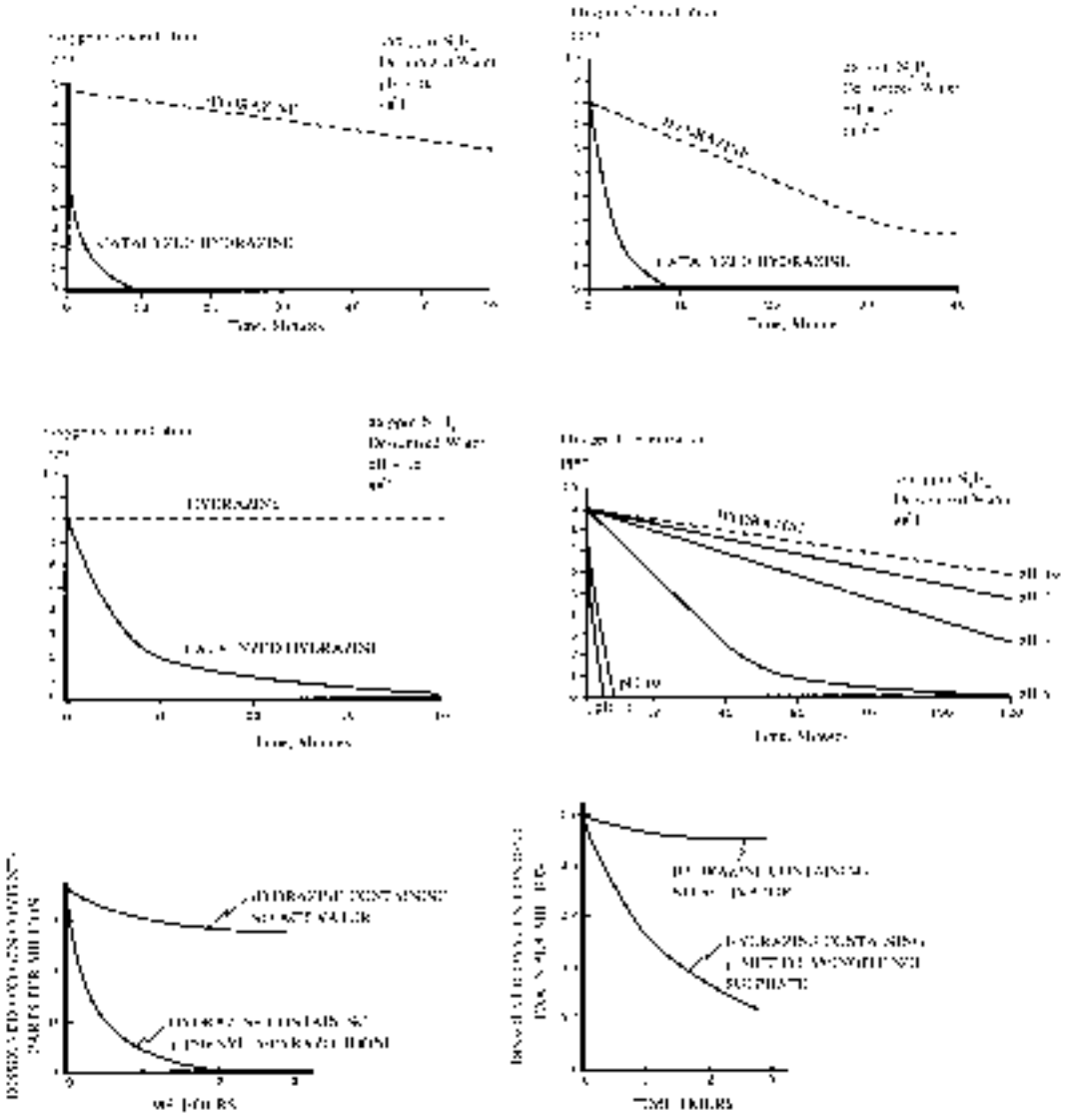
รูปที่ 9.25 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮดราซีน เวลา และอุณหภูมิที่ pH 9.5 สำหรับการรักษาหม้อไอน้ำและ ...

ปฏิกิริยาเริ่มต้นนี้เกิดกับเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และคิวปริกออกไซด์ (CuO) ที่ละลายหรือแขวนลอยอยู่ในน้ำด้วย ซึ่งจะรีดิวซ์กลายเป็นเฟอร์รัสออกไซด์ที่ละลายและกระจายตัวในน้ำได้ดี ไม่จับกับผนังหม้อน้ำ ทำให้ระบายทิ้งไปกับน้ำระบายทิ้งได้ ในทางทฤษฎีต้องใช้ไฮดราซีน 1 ppm ต่อ Fe^{+3} 0.88 ppm และ Cu^{+2} 0.126 ppm ไฮดราซีนนอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ดังกล่าวแล้ว ยังมีการสลายตัวเป็นก๊าซแอมโมเนียซึ่งจะเพิ่มค่า pH ได้ หรือทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำกลายเป็นสารคาร์บอเนตด้วย

โดยปกติแล้วนิยมใช้ไฮดราซีนไฮเดรตในหม้อไอน้ำที่เป็นความดันสูง เพราะที่หม้อไอน้ำความดันต่ำปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก

ดังนั้น เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วแม้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงต้องเติมสารเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกับไซเดียมซัลไฟต์ สารเร่งปฏิกิริยามีหลายชนิด สารเร่งปฏิกิริยานี้จะช่วยให้ปฏิกิริยาการรีดักชันเกิดเร็วขึ้น 10-50 เท่า สารที่ใช้เป็นตะกะลิสต์ ได้แก่ ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone, Methylhydroquinone, 1-Phenyl-3 Pyrazolidone, p-methylaminophenol sulfate, p-aminophenol, 2,4-Diaminophenol

ตัวอย่างเช่น สารละลายที่มีไฮดราซีนอยู่ 1% ผสมกับ 0.1% 1-Phenyl-3-Pyrazolidone หรือ 0.3% p-methylaminophenol sulfate หรือ 0.3% Aminophenol หรือ 0.3 ถึง 2.4 Deaminophenol แล้วปรับ pH ของน้ำด้วยน้ำแอมโมเนีย (NH_4OH) ให้ pH 9.5-10.5 จึงปฏิกิริยาเกิดได้ดีที่สุด



รูปที่ 9.74 เปรียบเทียบปฏิกิริยาของไฮดราซีนและไฮดราซีนไฮเดรตกับปฏิกิริยาที่ภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ 9.11 การลดค่าซีโอดีของน้ำเสียจากการย้อม

	ปริมาณไฮดราซีน พีพีเอ็ม	อัตราการกัดกร่อนลดลง ร้อยละ
น้ำเสีย		0
ไฮดราซีน-ธรรมดา	50	10.5
	200	54.0
	500	75.0
ไฮดราซีน-ที่มีสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyzed Hydrazine)	50	58.5
	200	84.5
	500	94.5

ในการใช้งานหัวฉีดไฮดราซีนโดยทั่วไปจะมีแรงดันอยู่ในช่วงประมาณ 0.1 0.3 นิวตัน สำหรับหัวฉีดไฮดราซีนขนาดใหญ่ ความดันในห้องเผาไหม้ 100 psig ปกติจะมีการลดแรงดันให้เหลือต่ำกว่าประมาณ 0.02 0.1 นิวตัน ในขณะที่ไฮดราซีนกำลังไหลผ่านวาล์วลดแรงดันเพื่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ปริมาณน้ำที่ระเหยไปจะมีอยู่ในช่วง 0.01-0.1 นิวตัน สำหรับตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ก่อนเข้าสู่ระบบน้ำเสียนั้นจะเป็นส่วนหนึ่งของน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่ 0.70

ข้อดีและข้อเสียของการไฮดราซีนมี ดังนี้ 2

ข้อดี

1 เป็นสารละลายที่ไวต่อการ EDS ในน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

2 ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันสร้างขึ้นปัจจัยต่างๆ ในไนโตรเจน

3 ช่วงค่าพีเอช pH ของน้ำตกอนุภาค

4 มีเทคนิคและวิธีการในน้ำตกอนุภาคโดยตรง ซึ่งอนุภาคจะถูกดักจับไว้ในกระบวนการแยกอนุภาคต่างๆ

5 มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของไฮดราซีนและการเกิดออกซิเดชันของไฮดราซีนในระบบต่างๆ

ข้อเสีย

1. เนื่องจากไฮดราซีนมีความเป็นพิษ สำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (FDA) จึงห้ามมิให้ใช้ในการผลิตที่ใกล้กับสิ่งที่ต้องส่งผ่านการผลิตอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ ตามข้อที่ 21 CFR ของ FDA code ได้กำหนดไว้ว่า "ไม่ให้ใช้ไฮดราซีนอยู่ในไอน้ำ"

2. OSHA และ NIOSH ของสหรัฐอเมริกา ได้ประกาศว่าไฮดราซีนเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ (Carcinogen)

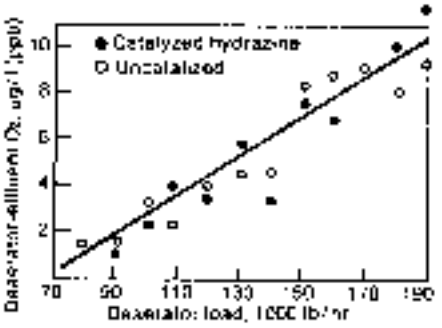
3. ไฮดราซีนจะมีความเข้มข้นปฏิกิริยาต่ำ ต่อเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาน้ำตกอนุภาคต่ำ

4 มีการเกิดไอระเหยของไฮดราซีนในปริมาณที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในกฎหมายของสหรัฐอเมริกา

5 มีผู้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮดราซีนที่ใช้ในการผลิตกับปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่เปรียบเทียบกันในเอกสารอ้างอิงต่างๆ ได้สรุปว่า สารต่างๆ ที่เติมลงในน้ำนั้นไม่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วขึ้นเลย (ยกเว้นการใช้ความร้อน เช่น 77 องศาเซลเซียส) โดยปริมาณของไฮดราซีนที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะมีปริมาณลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่สามารถนำไฮดราซีนมาใช้ในการกำจัดออกซิเจนได้ในปัจจุบัน

ออกซิเจนในน้ำเลี้ยง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ไม่ใส่ไว้ก่อน	1-2
Catalyze Bisulfite	1-2
Catalyze Sulfite	3-5
Cobalt-Catalyzed Hydrazine	5-7
Hydroquinone-Catalyzed Hydrazine	6
Hydrazine (Uncatalyzed)	6-7
Methyl-Ethylquinone	10-12
Catalyzed Hydrazine	
(ที่ระดับความเข้มข้น 12 ppb)	



รูปที่ 9.17 ผลการใช้ไฮดราซีนธรรมดาและไฮดราซีนร่วมปฏิกิริยาในการขจัดออกซิเจน

นอกจากโซเดียมซัลไฟต์และไฮดราซีนที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันแล้ว ก็ยังมีสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ได้เช่นกัน เช่น โซเดียมไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$), sodium orthophosphate pentahydrate ($Na_2HPO_4 \cdot 5\ H_2O$), sodium orthophosphate anhydrous (Na_2HPO_4), sodium acid orthophosphate (NaH_2PO_4), sodium hypophosphite ($NaH_2PO_2 \cdot H_2O$), sodium hemiphosphate ($NaH_4(HPO_3)_2$) ตัวอย่าง ๆ เหล่านี้ สามารถใช้ร่วมกันได้ และมีขนาดการใช้ที่แน่นอน ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้งาน

สารจับก๊าซออกซิเจนตัวใหม่

เนื่องจากไฮดราซีนเป็นสารเคมีที่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานกับหม้อไอน้ำแรงดันสูงมาก ดังนั้น จึงมีการนำสารเคมีตัวใหม่ ๆ มาใช้แทนไฮดราซีน ซึ่งมีความสามารถในการจับก๊าซออกซิเจนได้ใกล้เคียงกับไฮดราซีน และมีพิษน้อยกว่าหรือไม่มีเลย สารเคมีเหล่านี้ได้แก่

- N, N-Diethylhydroxylamine (DEHA)
- Carbohydrazide
- Erythorbic Acid

สารเคมีเหล่านี้โดยเฉพาะ DEHA มีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถจับก๊าซออกซิเจนในน้ำได้ดีกว่าไฮดราซีน และสามารถจับก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำได้ดีกว่าไฮดราซีนด้วย เนื่องจาก DEHA มีค่า DR = 1.96 ดังนั้น จึงสามารถนำไปใช้กับหม้อน้ำที่อยู่ในน้ำดูแลคุณภาพแล้วก็ได้ มีผลในการป้องกันการกัดกร่อนของก๊าซออกซิเจนในระบบท่อและอุปกรณ์ในหม้อไอน้ำได้อีกทางหนึ่ง

ในการใช้งานที่ใช้ปรับสภาพน้ำ เช่น DEEA (ย่อมาจาก Secondary Amine ethanol amine) ที่มีค่า pH ประมาณ 9.0 ขึ้นไป ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดีกว่า DEEA ที่มีค่าต่ำกว่านี้ ในการเลือกใช้งานจะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำด้วย

ตารางที่ 9.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารจับก๊าซออกซิเจนชนิดต่าง ๆ

สารเคมี	อัตราของการจับก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำหม้อไอน้ำ	ปริมาณสารเคมีจับก๊าซออกซิเจนที่ตกค้างอยู่ในหม้อไอน้ำ พีพีเอ็ม
ไฮดราซีนไฟล์	0.5:1	1
ไฮดราซีน	1:1	1
DEHA	1:1	1
Carbohydrazide	1:1	1
Erythorbic Acid	10:1	1

ตารางที่ 9.17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กและทองแดงระหว่างไฮดราซีนและ DEHA

โลหะ	สารเคมี	อัตราการกัดกร่อน มิล เมตร ต่อปี
เหล็ก	ไฮดราซีน	1.0
ทองแดง	ไฮดราซีน	0.05-0.10
เหล็ก	DEHA	0.01
ทองแดง	DEHA	0.05-0.10

ที่มา : ASME ปี 1998 ตารางที่ 2-2 หน้าที่ 2-2

9.14 การกัดกร่อนแบบเปราะร้าว (Caustic Embrittlement)

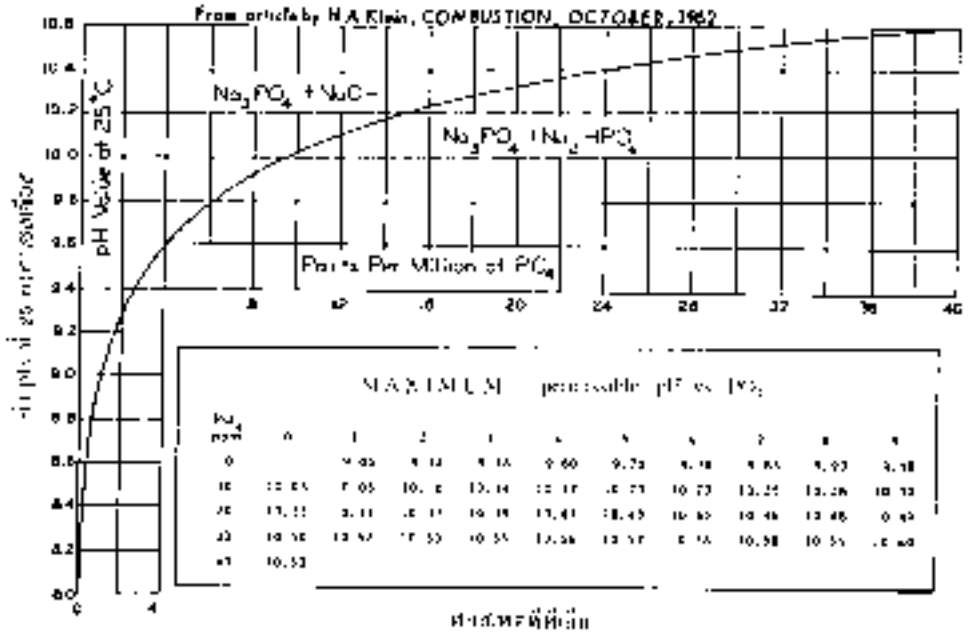
สำหรับคำว่าเปราะร้าว หมายถึงการแตกหักของเหล็กที่ไม่มีการเสียรูปมาก่อนหรือมีการเสียรูปน้อยมาก ซึ่งมีความเป็นด่างของน้ำในหม้อไอน้ำสูงมาก ประมาณ 50,000 พีพีเอ็ม ขึ้นไป และมีหินปูนหรือตะกรันเกาะอยู่ด้วย ทำให้เกิดการกัดกร่อนเสียหายได้ ป้องกันได้โดยการเติมสารจำพวกโซเดียมไนเตรต ($NaNO_3$) ลงไปในน้ำหม้อไอน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมตามตารางดังต่อไปนี้

ความดันหม้อไอน้ำ	อัตราส่วน $NaNO_3$ /NaOH
psi	
0 - 250	0.20
251 - 900	0.33
901 - 1,000	0.40 - 0.60

โดยที่ อัตราส่วน $\frac{NaNO_3}{NaOH}$ = $\frac{\text{พีพีเอ็ม ในรูปของ } NO_3 \div 2.11}{\text{พีพีเอ็มของความเป็นด่าง} - \text{พีพีเอ็มของฟอสเฟตในรูป } PO_4}$

9.15 การกัดกร่อนเนื่องจากด่างเข้มข้น

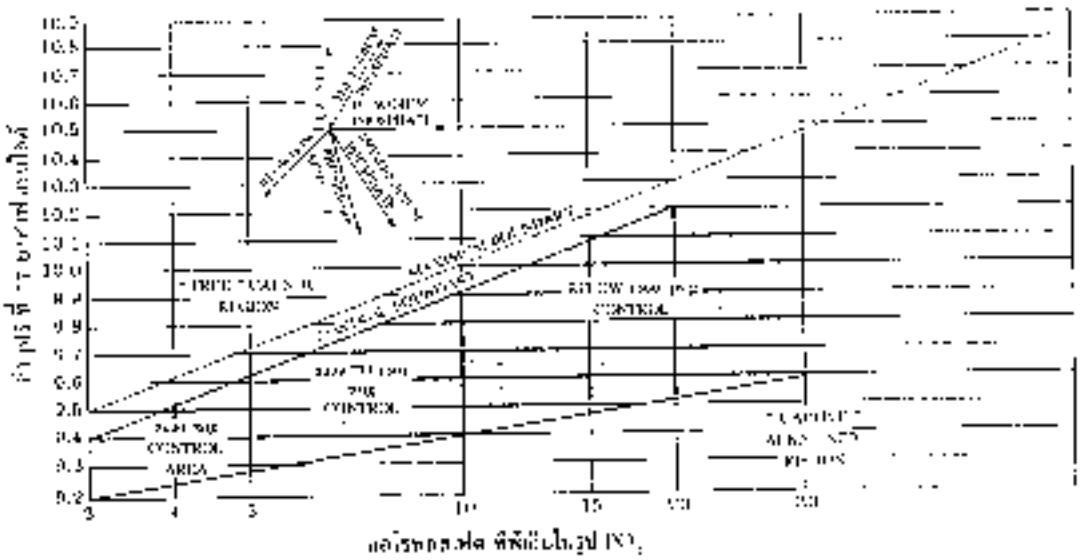
ตามรูปที่ 9.73 จะเห็นได้ว่าการกัดกร่อนจากเส้นในหม้อไอน้ำจะน้อยที่สุดเมื่อน้ำในหม้อน้ำมี pH 11.5 ดังนั้น ถ้าน้ำในหม้อน้ำมี pH ต่ำกว่านี้ สารเคมีจะถูกเติมเพื่อปรับค่า pH ให้ได้ตามที่ต้องการ นอกจากนี้ การเติมสารด่างเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ วิธีที่ป้องกันที่ดีคือการใช้ไฮดรอกไซด์อิสระ (Free Hydroxide) โดยใช้ระบบปรับค่าน้ำในหม้อน้ำแบบ Coordinated Phosphate pH Control เพื่อที่จะควบคุมน้ำในหม้อน้ำให้มีสภาพเป็นด่างเพียงพอ โดยไม่ให้มีไฮดรอกไซด์อิสระขึ้น และทดแทนฟอสฟีเสียที่ใช้ประโยชน์ในการกัดกร่อนด้วย



รูปที่ 9.73 กราฟการใส่ฟอสเฟตเพื่อควบคุมความเป็นด่างและค่า pH ให้พอเหมาะ

ตามวิธีการนี้ จะใช้ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) และไดโซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ร่วมกันในน้ำหม้อน้ำ และควบคุมให้ได้ตามช่วงที่กำหนดในกราฟ เพราะถ้ามีมากเกินกว่าจะมีไฮดรอกไซด์อิสระเกิดขึ้น ซึ่งมีโอกาสจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ ถ้าใช้ไตรโซเดียมฟอสเฟตอย่างเดียว ก็จะมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ดังนั้น ในการป้องกันการกัดกร่อนต้องควบคุมให้ค่า pH และปริมาณฟอสเฟตในน้ำหม้อน้ำอยู่บนเส้นกราฟเท่านั้น

นอกจากนี้ การทำงานรักษาให้ผิวเนื้อหม้อน้ำสะอาดอยู่เสมอนั้นก็เป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันมิให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเข้มข้น พยายามควบคุมให้มีความกระด้าง เหล็กและทองแดงในน้ำเลี้ยงให้น้อยที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความกระด้างต้องไม่มีเลย ถ้าน้ำมีความกระด้างและมีตะกอนเข้าไปในหม้อน้ำด้วยแล้ว ก็เป็นสาเหตุที่จะทำให้มีสารเข้มข้นเฉพาะที่ขึ้น ดังนั้น จึงต้องควบคุมปริมาณเหล็กและทองแดงในน้ำหม้อน้ำให้น้อยที่สุด ถ้าเป็นหม้อน้ำความดันสูงกว่า 600 psig



รูปที่ 9.79 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ฟอสเฟต ความเป็นด่าง และไฮดราโซดีสระ

ละเอียดส่วนใหญ่จะเป็นพวกออกไซด์ของโลหะ ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมการเกิดร่องในระบบน้ำเลี้ยงโดยเข้าหม้อน้ำและระบบคอนเดนเสทให้ดี มิให้เกิดการกัดกร่อนปล่อยออกไซด์ของโลหะออกมา ในบางกรณีก็อาจต้องใช้วิธีกรองน้ำคอนเดนเสท (Condensate Polishing)

9.18 การป้องกันการกัดกร่อนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

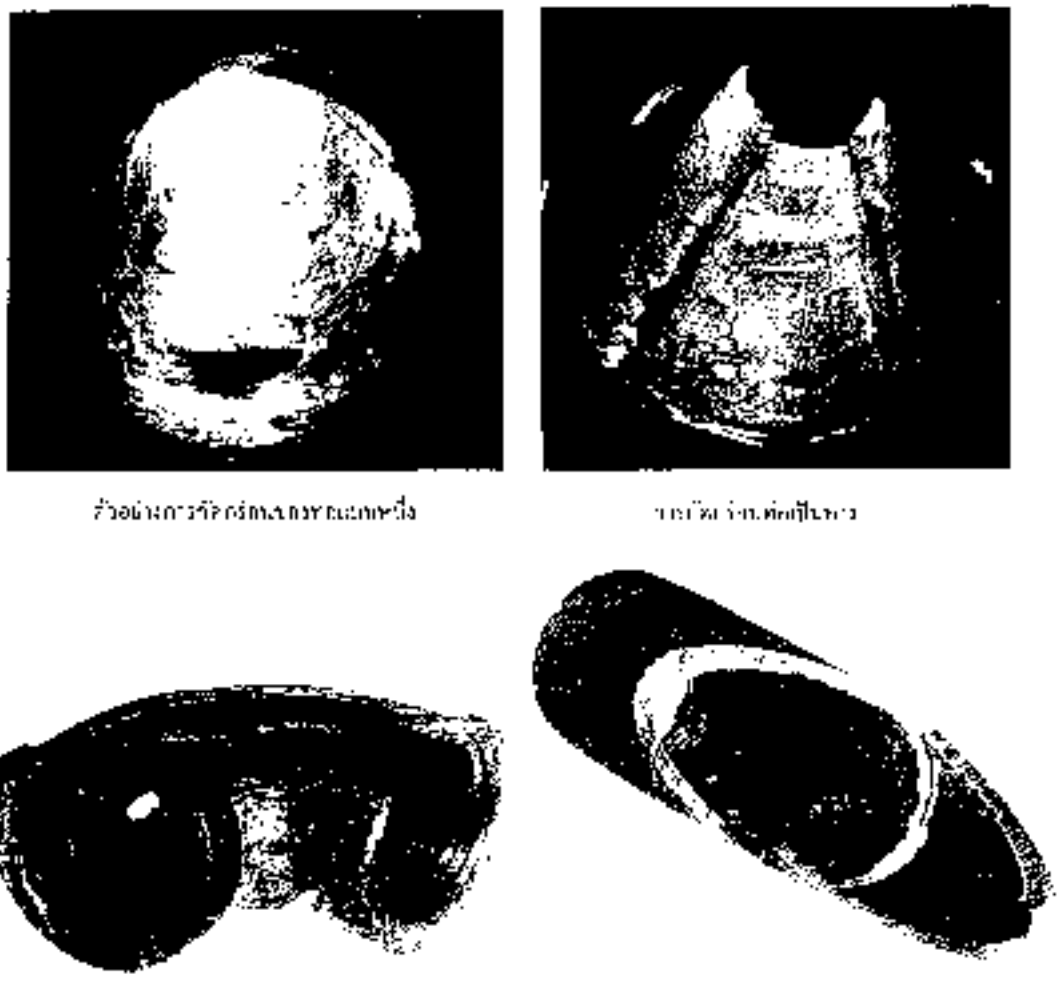
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายในน้ำคอนเดนเสท เกิดเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งได้กล่าวมาแล้ว กรดนี้สลายตัวให้ไฮโดรเจนไอออนซึ่งทำให้ pH ลดลง

$$H_2CO_3 \longrightarrow H^+ + HCO_3^-$$
$$HCO_3^- \longrightarrow H^+ + CO_3^{--}$$

และเมื่อกรดคาร์บอนิกกัดกร่อนเหล็กจะเกิดเป็นเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต ($Fe(HCO_3)_2$) ซึ่งละลายได้ในน้ำ มีคุณสมบัติคล้ายกับเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ คือ เป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาการกัดกร่อน เสถียรภาพของเฟอร์รัสไบคาร์บอเนตในน้ำขึ้นกับความร้อน pH และความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในคอนเดนเสท จึงมีข้อแม้ว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะต้องเร็วกว่าปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังนั้น จึงไม่แปลกเลยที่มักพบตะกรันที่เกิดจากการกัดกร่อนในจุดที่อยู่ห่างจากจุดที่เกิดการกัดกร่อน ตะกรันที่เกิดจากการกัดกร่อนนี้อาจเป็นพวกไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ หรือคาร์บอเนตของเฟอร์ริกหรือเฟอร์รัสก็ได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่หม้อน้ำโดยการละลายอยู่ในน้ำเลี้ยงหรือในรูปความเป็นด่างคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต

$NaHCO_3$ ในรูป $CaCO_3$ 1 พีพีเอ็ม ผลิตตัวให้ CO_2 0.79 พีพีเอ็ม

$NaCO_3$ ในรูป $CaCO_3$ 1 พีพีเอ็ม ผลิตตัวให้ CO_2 0.85 พีพีเอ็ม



ก) ลักษณะการเกิดรอยแตกของผลมะเขือเทศ

ข) ผลมะเขือเทศที่ปกติ

ค) ลักษณะการเกิดรอยแตกของผลมะเขือเทศ

ง) ผลมะเขือเทศที่ปกติ

รูปที่ 9.30 การเกิดรอยแตกเนื่องจากมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำคอนเดนเสท

การแก้ไขปัญหาการเกิดรอยแตกเนื่องจากมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำคอนเดนเสท ทำได้ 2 วิธีการ ดังนี้

1. **ใช้สารเคมีเพื่อปรับค่า pH ของคอนเดนเสทให้เป็นด่างเล็กน้อย** สารเคมีที่ใช้ในการแก้ปัญหานี้มีชื่อเรียกว่า Neutralizing Amine or Volatile Amine ซึ่งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งานในแต่ละพื้นที่ ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่

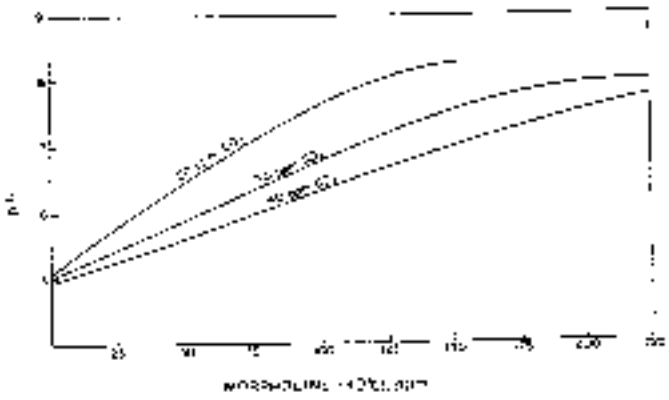
- Morpholine (C_4H_9NO)
- Cyclohexylamine ($C_6H_{11}NH_2$)
- 2-amino-2-methyl-1-propanol
- Diethylaminoethanol
- Dimethylaminoethanolamine
- Ammonia

สารตกค้างนี้จะไฮโดรไลซ์ในน้ำได้ไซคลอเฮกซิลเอมีน เมื่อทำปฏิกิริยากับคลอรีนอิสระจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

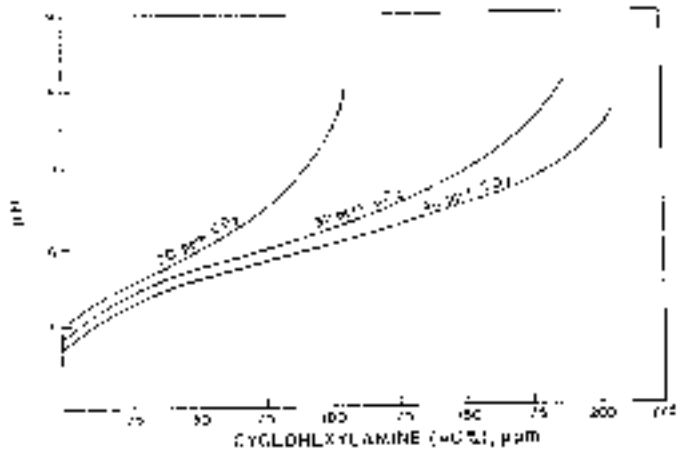
$$R\text{-}NH_2 + H_2O \longrightarrow R\text{-}NH_3^+ + OH^-$$

ปฏิกิริยาการตกค้างจะเกิดเป็นดังนี้

$$R\text{-}NH_2 + H_2CO_3 \longrightarrow R\text{-}NH_3^+ + HCO_3^-$$



(ก) การปรับ pH ด้วย Morpholine



(ข) การปรับ pH ด้วย Cyclohexylamine

รูปที่ 9.21 การปรับค่า pH ด้วยสารเคมี

นิยามจำนวนระดับคลอรีนที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ (Distribution Ratio or DR)

DR = ปริมาณระดับคลอรีนในน้ำ : ปริมาณระดับคลอรีนที่อยู่ในน้ำกระจายตัว

ดังนั้น ระดับที่มีค่า DR มากกว่า 1 จะมีปริมาณระดับคลอรีนในน้ำมากกว่าปริมาณระดับคลอรีนที่อยู่ในคอลลอยด์ ส่วนระดับคลอรีนที่มีค่า DR น้อยกว่า 1 จะอยู่ในคอลลอยด์มากกว่าในน้ำ

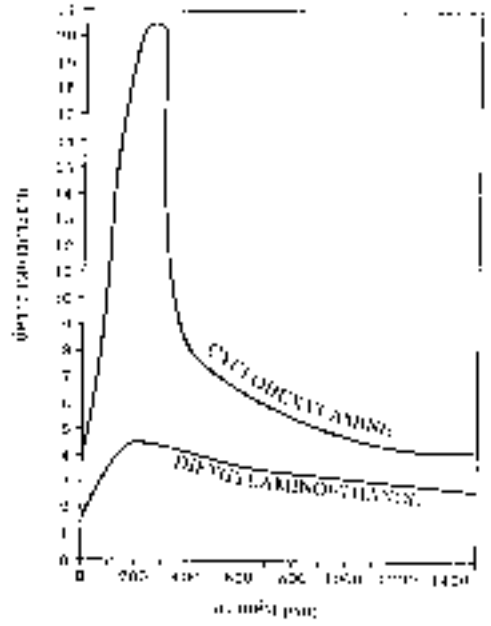
ค่า DR ของอะมีนชนิดต่าง ๆ มีดังนี้

	DR
2-amino-2-methyl-1-propanol	0.21
Morpholine	0.40
Diethylaminoethanol	1.70
Dimethylisopropanolamine	1.70
Cyclohexylamine	4.0
Ammonia	13.0

ตารางที่ 9.13 คุณสมบัติของ Volatile Neutralizing Amine

สาร	เสถียรภาพทางความร้อน	ความสามารถในการละลายน้ำ
Morpholine	เริ่มสลายตัวที่ 340°C แต่ที่ 260°C	∞
Cyclohexylamine	ไม่สลายตัวที่ 300°C แต่เริ่มสลายตัวที่ 1200°C	61
2-amino-2-methyl-1-propanol	เริ่มสลายตัวที่ 350°C	∞
Diethylaminoethanol	สลายตัวอย่างรวดเร็วที่ 425°C ไม่สลายตัว	∞
Ammonia	ไม่สลายตัว	11

* ที่ที่มีน้ำผสมอยู่ในระบบ pH และน้ำที่มี CO_2 ละลายอยู่ จะทำให้ pH ของน้ำลดลงไปอยู่ที่ประมาณ 7.5



รูปที่ 9.32 แสดง DR ของอะมีนสองชนิดที่แปรผันตามความดัน

ตารางที่ 9.19 ปริมาณที่ต้องใช้ในการปรับค่า pH

ปริมาณที่ต้องใช้ในการปรับค่า pH ของน้ำระบริสุทธิ์เป็น 5.0	Morpholine	Cyclohexylamine	Ammonia
พีพีเอ็มในน้ำ	1.0	0.8	0.2-0.5
พีพีเอ็มในไอน้ำ	1.0	1.9	1.4-5.0
ปริมาณที่ต้องใช้ในการปรับค่า pH ของคอนเดนเสตเป็น 5.0	1.0	1.3	
พีพีเอ็มต่อพีพีเอ็มของ CO_2 ปริมาณที่ต้องใช้ในการปรับค่า pH ของคอนเดนเสตเป็น 7.0	1.0	2.0	
พีพีเอ็ม ต่อพีพีเอ็มของ CO_2			

ในการใช้งานจริง การที่จะเลือกใช้สารเคมีตัวใดนั้น ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

(1) ความซับซ้อนของระบบ After Boiler เช่น มีการเติมต่อมากกว่าและใช้งานที่แรงดันต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการแก่งสารกระจายไปในท่อต่าง ๆ จะต้องมีระบบใช้นี้ จำเป็นการใช้สารมีมากกว่าผสมกัน สารตัวที่มีค่า DR ต่ำที่สุดนั้นจะละลายในน้ำคอนเดนเสตแรกที่เกิดจากไอน้ำแล้วเข้าสู่ระบบ สารตัวที่มีค่า DR สูงที่สุดจะถูกพาไปกับไอน้ำไปกลั่นตัวเป็นคอนเดนเสตจึงจะละลายอยู่

ในน้ำคอนเดนเสตที่อยู่ปลายทาง ตัวอย่างเช่น Morpholine ซึ่งมี DR = 5.40 จะละลายในน้ำคอนเดนเสตของต้น ๆ ก่อน Cyclohexylamine ซึ่งมี DR = 4.0

(2) อุณหภูมิใช้งานของ Deaerating Heater ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายของการใช้สารเคมีด้วย เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีไอระเหยสารขึ้นที่สารเคมีที่มีจุดเดือดต่ำจะระเหยออกไปทางท่อระบายอากาศ (Vent) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการมีใช้ระบบตัวหนึ่ง ซึ่งเมื่อสารตัวนี้รวมกับน้ำมีผลเป็นสารผสมเรียกว่า Azeotrope ซึ่งจะมีจุดเดือดต่ำกว่าสารตัวใดตัวหนึ่งเสมอ เช่น Cyclohexylamine และ Ethylaminoethanol เมื่อผสมกับน้ำ สารผสมจะมีจุดเดือดต่ำกว่าสารตัวที่มีจุดเดือดต่ำ ซึ่งในกรณีนี้มีน้ำ

ตารางที่ 9.20 จุดเดือดของสารละลายและอะซีโอโทรป

	จุดเดือดของสารเคมีบริสุทธิ์	จุดเดือดของสารผสมอะซีโอโทรปของคาเซอเทียส
Morpholine	129.0	
Cyclohexylamine	134.5	96.4
2-amino-2-methyl-1-propanol	165	-
Diethylaminoethanol	163	98.9

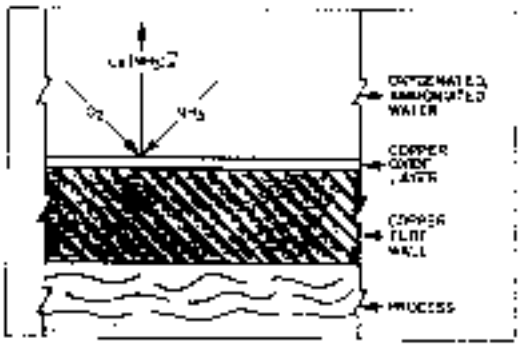
(3) ปริมาณการระบายน้ำทิ้ง (Blowdown) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีนี้เพราะจากตารางที่ 9.20 จะเห็นได้ว่าสารที่มีจุดเดือดสูง หรือเมื่อรวมกับน้ำแล้วเกิดเป็นอะซีโอโทรปที่มีจุดเดือดสูง ซึ่งสารเหล่านี้มีโอกาสที่จะอยู่ในน้ำมากกว่า จำสูญเสียส่วนหนึ่งไปกับการระบายน้ำทิ้ง เช่น Morpholine และ 2-amino-2-methyl-1-propanol ในการใช้งานก็ต้องใส่ให้มากกว่าปกติ เพื่อชดเชยส่วนที่สูญเสียไปนี้

(4) **วัสดุที่ใช้งาน** โมโนเอทาโนล เช่น แอมโมเนีย จะใช้ไม่ได้ถ้าเกิดการสึกกร่อนของท่อที่ทำด้วยทองแดงหรือทองเหลืองอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ในระบบด้วย ถ้าหากไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลาย ปริมาณของแอมโมเนียที่ใช้อยู่ในสารละลายจะน้อยกว่า 0.5 พีพีเอ็ม จะไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของท่อ หรือโลหะผสมทองแดง ทั้งนี้เพราะตัวยับยั้งโมเลกุลของออกซิเจน ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาของออกซิเจนละลายกับทองแดงจะเป็นคิวไพรัสออกไซด์ (Cu_2O) ซึ่งจะไม่เกิดการกัดกร่อนที่เป็น Cu_2O เพียงแต่เกิดการกัดกร่อนเล็กน้อยเท่านั้น แต่ถ้ามีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้วย จะเกิดฟิล์มคิวปริกออกไซด์ (CuO) ขึ้น ซึ่งแอมโมเนียไม่สามารถยับยั้งได้

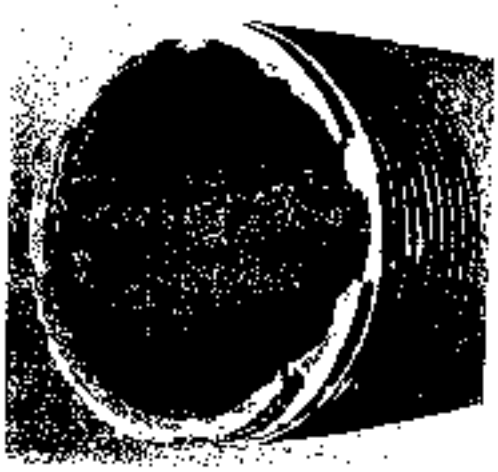
(5) ***เสถียรภาพต่อความร้อน*** สารประกอบแอมโมเนียจะสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้น การใช้อะไมด์ตัวใดต้องคำนึงถึงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้งานด้วย ตามรายละเอียดแสดงในตารางที่ 9.14

(6) ***เป็นสารต้องห้ามในการใช้งานหรือไม่*** สารประกอบแอมโมเนียบางตัวนั้น เช่น สารประกอบเกลือของกรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซีติก (EDTA) ห้ามใช้ในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น การผลิตอาหาร ผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับยา รายละเอียดดูได้จาก Code of Federal Regulations, Title 21, Section 173.310, "Boiler-water additives", และ EDTA

มีการใช้แอมโมเนียเพื่อเพิ่ม pH และทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนียที่ใช้นี้จะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือแอมโมเนียซัลเฟต โดยปั๊มเข้าไปที่ระบบน้ำเลี้ยง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดในน้ำและจัดไม่ให้เกิดน้ำ โดยทั่วไปนิยมใช้แอมโมเนียมากกว่าน้ำเพื่อ (Make-up) ส่วนละเอียดคาร์บอนไดออกไซด์ในไอน้ำมีมาก ดังนั้นจึงมีการเติมแอมโมเนียมากขึ้น ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนต่อโลหะผสมทองแดงและโลหะผสมทองขาวมากขึ้น จากนี้ การเติมแอมโมเนียมีค่า DR = 10 ดังนั้น ส่วนใหญ่จะติดไปกับไอน้ำแทนที่จะละลายในคอนเดนเสต ซึ่งทำให้น้ำคอนเดนเสตมีค่า pH ต่ำและเกิดการกัดกร่อนเป็นคอนเดนเสตบางบริเวณ เมื่อมีการกัดกร่อนของทองแดงจะทำให้โลหะทองแดงที่ถูกกัดกร่อนนั้นไหลกลับคอนเดนเสตเข้าสู่วัฏจักรน้ำในรูปของการผสมกับน้ำเลี้ยงซึ่งทำให้เกิดปัญหาตะกรันการกัดกร่อนในหม้อไอน้ำต่อไป



รูปที่ 9.83 การกัดกร่อนชั้นฟิล์มใหม่ที่เป็นของแข็งและไฮดรอกไซด์โดยการใช้แอมโมเนีย

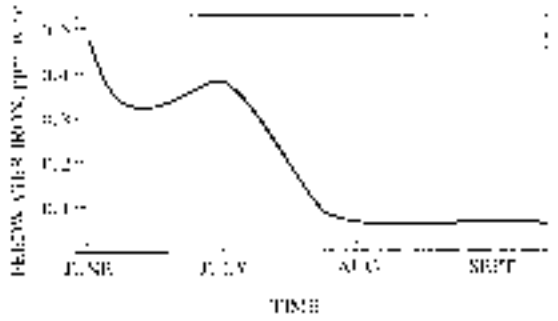


รูปที่ 9.84 การกัดกร่อนของท่อเนื่องจากมีก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำคอนเดนเสต

Neutralizing Amine ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ Morpholine และ Cyclohexylamine ซึ่งมีขั้วดี สามารถละลายน้ำได้ และสามารถระเหยออกมาพร้อมกับไอน้ำได้ ปฏิกิริยาของ Morpholine กับกรดคาร์บอนิกเป็นดังนี้

$$OC_4H_9N + H_2CO_3 \quad \rightleftharpoons \quad OC_4H_9N \cdot H_2CO_3$$

เนื่องจากสารทั้งสองชนิดมีขั้วต่างกัน จึงสามารถในการปรับค่า pH ของน้ำคอนเดนเสทไม่เท่ากัน ดังนั้น ปริมาณการใช้จึงขึ้นกับค่า pH ที่ต้องการ ในรูปที่ 3.83 แสดงปริมาณ Morpholine และ Cyclohexylamine ที่ต้องใช้ เพื่อปรับค่า pH ของน้ำคอนเดนเสทที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ ในการใช้งานจริงนั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์แล้วยังขึ้นกับว่าต้องการป้องกันการกัดกร่อนมากน้อยเพียงใด เช่น ถ้าต้องการค่า pH ของน้ำคอนเดนเสทมากกว่า 8.5 แล้วแต่ว่าในระบบมีคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มากน้อยเท่าใด ก็จะให้ค่าที่ควบคุมให้ pH คอนเดนเสทอยู่ในช่วง 8.5-9.0 ในกรณีที่ระบบคอนเดนเสทมีปฏิกิริยาที่เป็นไลเซทหรือไฮโดรไลซิสอยู่ ก็ต้องควบคุมให้ค่อยเหลือแต่ละมี pH มากกว่า 9.0 มิฉะนั้นจะมีกรดปนมากับน้ำคอนเดนเสทมาก เพราะเกิดจากการกัดกร่อน ดังนั้น ในการใช้งาน วิธีการควบคุมจำเป็นต้องใช้สารจำพวก Neutralizing Amine ได้ผลหรือไม่ก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเดือดว่ามากน้อยเพียงใด ถ้าสามารถใช้งานได้ผล การกัดกร่อนก็จะลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณเหล็กในน้ำเลี้ยงลดลงด้วย



รูปที่ 3.85 การตรวจวัดปริมาณเหล็กในน้ำเลี้ยงเป็นวิธีการตรวจประสิทธิภาพการใช้สารจำพวกอะมีน

เนื่องจาก Morpholine มีค่า DR ต่ำกว่า Cyclohexylamine จึงมีแนวโน้มที่จะแตกตัวและอยู่ในน้ำคอนเดนเสทได้ดีกว่า จึงจะไปสะเทินกรดคาร์บอนิกที่เกิดจากการละลายของไฮโดรไลซิสได้ดีกว่า ถ้าเป็นระบบคอนเดนเสทที่มีระยะยาว หรือบริเวณที่ไกลน้ำมักจะต้องใช้ Cyclohexylamine เนื่องจากมีค่า DR สูง ก็จะสามารถไปกับไอน้ำได้ดีกว่าที่จะละลายอยู่ในน้ำคอนเดนเสทแล้วกลับมาเดือดอีก ๆ จึงมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนในช่วงไกลของระบบคอนเดนเสทได้ดีกว่า ดังนั้น ในการใช้งานต้องวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการสร้างไอน้ำไปใช้งานของโรงงาน หรือจะให้ดีควรใช้อะมีนทั้งสองชนิดผสมกันเพื่อให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ทั้งสองส่วน

ตัวอย่าง มีผู้ใช้ Cyclohexylamine และ Morpholine ในอัตราส่วน ๓:๑ ถึง ๑:๑ สำหรับหม้อน้ำ ระบบปิด

	ร้อยละ
Cyclohexylamine	๑๖
Morpholine	๖
น้ำ	๘๐

หรือใช้ผสมครั้งละหลายสารชนิดอื่น เช่น Ethylenediamine (๑๒๙) ก็ได้ระบบเปิด เช่น

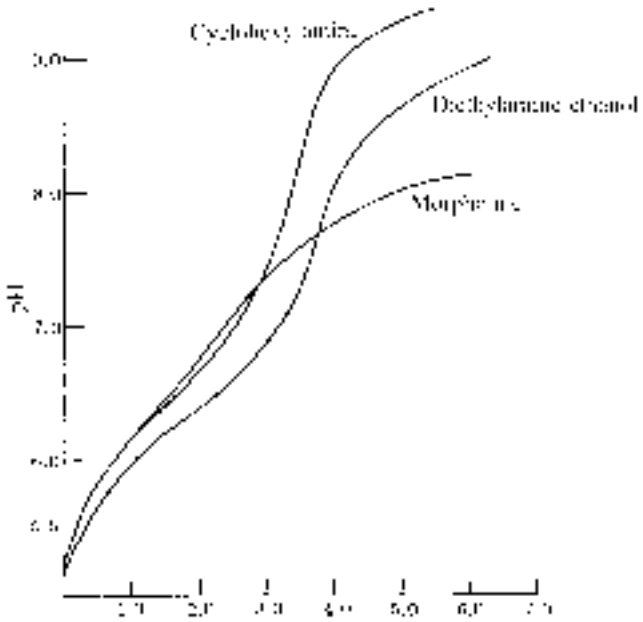
	ร้อยละ
Cyclohexylamine	๓
Morpholine	๑๐
Ethylenediamine	๒
น้ำ	๙๐

หรือ

	ร้อยละ
Cyclohexylamine	๒
Morpholine	๑๑
Ethylenediamine (๑๒๙)	๔
น้ำ	๙๓

การใช้สารระเหยผสมกันที่ ต้องมีการควบคุมที่ดี เช่น การควบคุม pH ของคอนเดนเสตให้อยู่ในช่วง ๙.๕ ๙.๘ ก็ได้ วัดปริมาณเหล็กในน้ำคอนเดนเสตที่กลับคืนมา การใช้แผ่นตัวอย่างสำหรับการกัดกร่อน (Corrosion Coupon) รวมในคอนเดนเสต แต่ไม่ควรใช้สูตรหรือส่วนผสมอย่างใด การใช้สารจำพวก Neutralizing Amine จะไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ครอบคลุมทั้งหมด

ปริมาณการใช้สารจำพวก Neutralizing Amine จะไม่สิ้นเปลืองมากนัก เพราะส่วนใหญ่จะละลายในน้ำคอนเดนเสตซึ่งหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ส่วนที่สูญเสียจะสิญไปกับไอน้ำที่ปล่อยสู่บรรยากาศและที่ใช้งานในกระบวนการต่าง ๆ กับน้ำคอนเดนเสตที่ไม่ได้นำกลับมาใช้ นอกจากนี้ ระหว่างที่อยู่ในรูปละลายน้ำ ไฮดราซีนจะเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนและไฮดราซีนจะสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ระหว่างส่วนหนึ่งจะติดไปกับการระบายน้ำทิ้งออกจากหม้อไอน้ำทิ้ง (Vent) ด้วย และส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในน้ำเลี้ยง ในรูปที่ ๑.๔๔ แสดงระหว่างสัมประสิทธิ์ Distribution Ratio ต่ำที่สุดระหว่างสูญเสียน้อยที่สุดในการไอระเหย



ปริมาณน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์

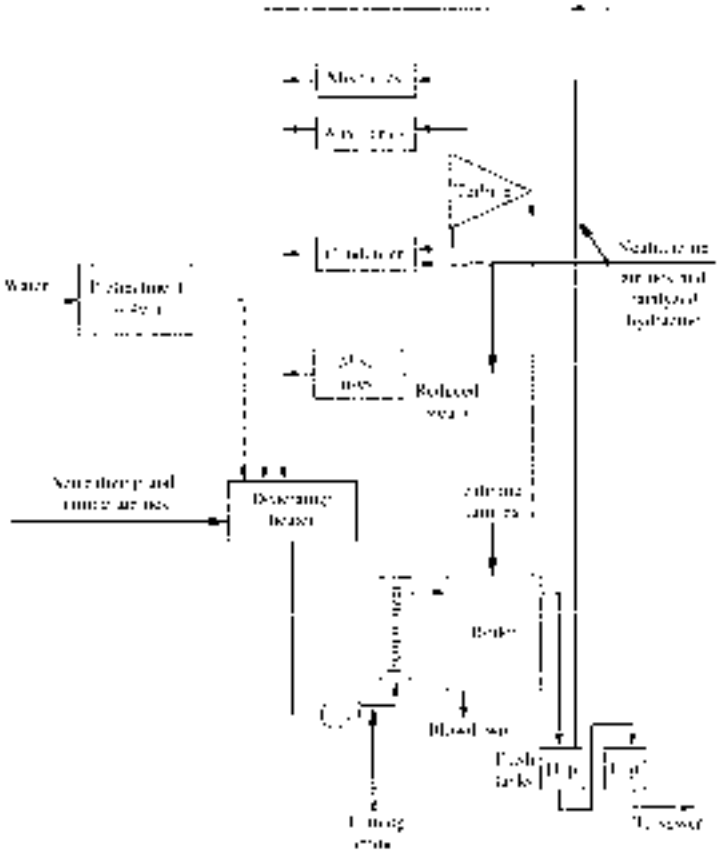
รูปที่ 9.66 ผลของอัตราส่วน Amine/CO_2 ต่อค่า pH ของน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ 10 พีพีเอ็ม

นิยมใช้สาร Neutralizing Amine นั้นมีหลาย ที่สำคัญคือ ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำควบแน่นที่มีค่า pH ต่ำได้ แต่ไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากกรดอินทรีย์ และจำพวกเกลือคลอไรด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำควบแน่นได้ ที่นิยมใช้ควบคุมมากที่สุดคือ Ammonium carbonate, Cyclohexylamine carbonate และ Morpholine carbonate นอกจากนี้ ถ้ามีการนำน้ำควบแน่นไปผ่านกระบวนการ Ion Exchange ก็จะทำให้เกิดปัญหา Sodium Release ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 7

ตารางที่ 9.27 ผลการใช้สารจำพวกอะมีนในการป้องกันการกัดกร่อน

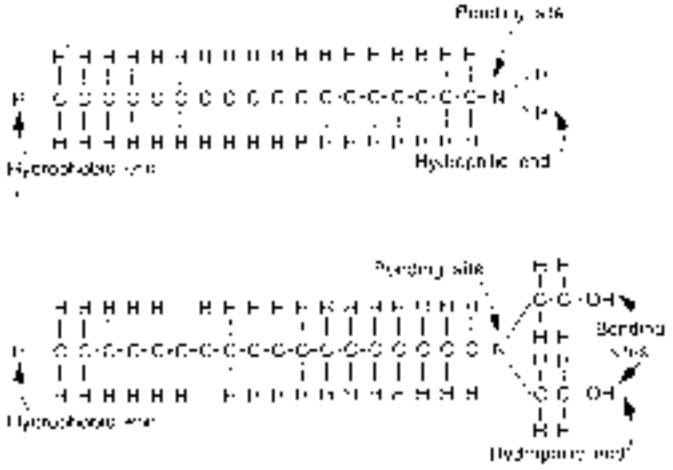
จำนวนวันที่ทดสอบ	อัตราการกัดกร่อน มิล (mils) ต่อปี		
	ไม่ใช้สารเคมี	ใช้ Neutralizing Amine เดียว	ใช้ผลผสมกัน
30	29.1	0.4	1.3
60	23.7	0.2	0.9
90	26.8	0.7	1.7
90	27.6	0.8	1.1
60	26.8	0.2	1.6
90	24.3	0.6	1.2

1 mil = 0.001 นิ้ว (inches)

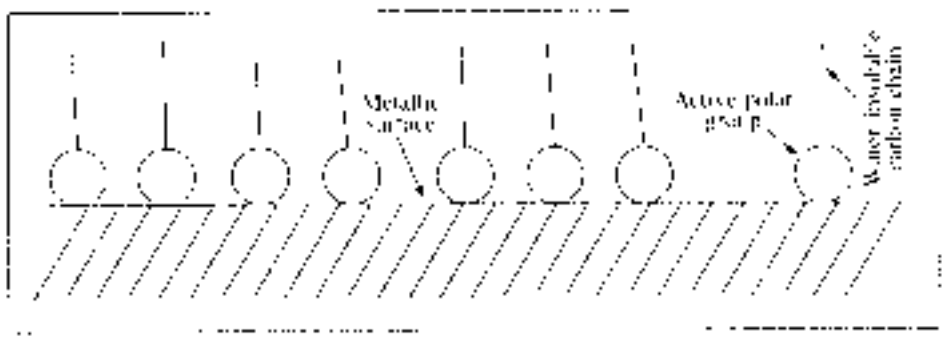


รูปที่ 9.37 ตำแหน่งการฉีดสารเคมีจำพวกอะมีนชนิดต่าง ๆ

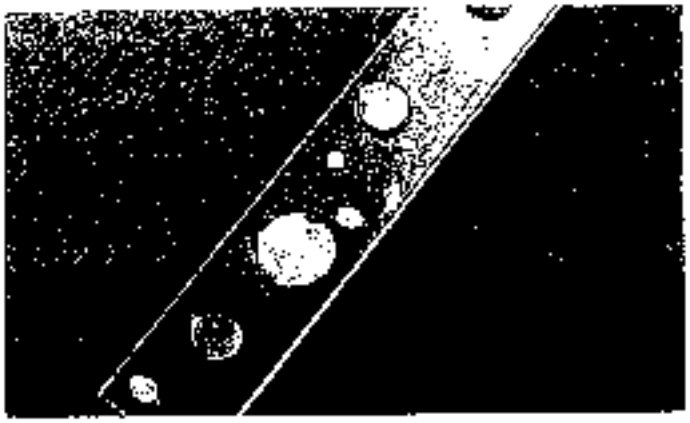
2. การใช้สารเคมีเคลือบผิวโลหะ (Filming Amine) สารประเภทอะมีนชนิดสายยาวสามารถเคลือบผิวโลหะเป็นฟิล์มชั้นบาง ๆ ไม่ให้น้ำและแก๊สที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสัมผัสกับโลหะได้ วิธีการนี้จะป้องกันการกัดกร่อนได้ทั้งจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนและน้ำเกลือในกระบวนการผลิต สารอะมีนที่มีคุณสมบัติเช่นนี้มักจะมีโมเลกุลยาว ๆ ซึ่งมีคาร์บอนอะตอม 10-18 อะตอม เช่น Octadecylamine ($CH_3(CH_2)_{17}NH_2$), Hexadecylamine ($CH_3(CH_2)_{15}NH_2$), Dioctadecylamine ($C_{36}H_{75}NO$) และ Ethoxylated Soya Amine ซึ่งเคลือบผิวโลหะได้ดี สารเหล่านี้จะเคลือบเป็นเพียงชั้นบาง ๆ มีความหนาเท่ากับโมเลกุลของสารเท่านั้น ปลายด้านที่เป็น Hydrophilic ของโมเลกุลจะยึดกับผิวโลหะ ทำให้ปลาย Hydrophobic ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ อะมีนชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ ดังนั้น จึงต้องการสารช่วย (Carrier) ให้ไปกับน้ำ



รูปที่ ๙.๘๘ สูตรโครงสร้างของ Octadecylamine (บน) และ Soya Amine (ล่าง)



รูปที่ ๙.๘๙ แบบแผนการเคลือบผิวโลหะของโมเลกุลอะมีน



รูปที่ ๙.๙๐ การใช้ Filming Amine ไปเคลือบเพื่อเหล็ก น้ำจะเกาะไม่ติดผิวเหล็กจนหยดน้ำบนใบบอน

ในการใช้งานด้านการผลิตกระดาษ จะมีสารตัวหนึ่งที่ขาดไม่ได้ คือ สารที่ช่วยป้องกันการเกิดฟองเสีย ซึ่งสารที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกน้ำมันต่างๆ เช่น น้ำมันสน (Pine) แต่ปัจจุบันนี้จะใช้น้ำมันสนน้อยลงมาก เนื่องจากมีข้อเสียหลายประการ ดังนั้นจึงมีการนำเอาสารเคมีตัวใหม่ๆ เข้ามาใช้แทน ซึ่งสารเคมีที่นำมาใช้นี้จะมีคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อกระดาษได้ดีขึ้น ทำให้ฟองอากาศที่ติดมากับเนื้อกระดาษแตกตัวได้ง่ายขึ้น ทำให้ฟองอากาศที่ติดมากับเนื้อกระดาษแตกตัวได้ง่ายขึ้น การใช้จะมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่นำมาใช้ ตัวอย่างเช่น ท่อต่างๆ และบางส่วนของเครื่องจักรในหม้อต้มน้ำ ดังนั้น ในการใช้งานจะต้องคำนึงถึงปริมาณที่จะใช้ และต้องมีการปรับค่าพีเอชของน้ำให้เหมาะสมกับสารเคมีที่นำมาใช้ การใช้ Filming Amine นี้จะป้องกันการกัดกร่อนของ แคลเซียมไบคาร์บอเนต ซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ ๘.๒ ในท่อที่มีน้ำควบแน่นและไอน้ำในที่ความเร็วสูง จะมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นด้วย จึงต้องมีการป้อนสารเข้าไปเพื่อทดแทนส่วนที่สูญหายไป ถ้าในน้ำควบแน่นมีออกซิเจนอยู่ การใช้ Filming Amine จะมีความจำเป็นต้องใช้ร่วมกับสารกำจัดออกซิเจน เช่น ไฮดราซีน (N2H4) หรือ ไดเอทธิลไฮดรอกซิลามีน (DEHA) เพื่อกำจัดออกซิเจนที่ไม่ได้ละลายน้ำนี้ออกไป ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้สามารถใช้ร่วมกันได้ แต่ที่จะมีการใช้มากที่สุดคือ ไฮดราซีน ซึ่งมีราคาถูกกว่าด้วย ส่วนสารกำจัดออกซิเจนที่ใช้ในการผลิตกระดาษนั้น ปริมาณการใช้ของไฮดราซีนที่ใช้

Octadecylamine	๐.๖-๑.๖ พีพีเอ็ม
Ethoxylated Soya Amine	๐.๒-๑.๖ พีพีเอ็ม

ในระหว่างที่มีการใช้ไฮดราซีน การใช้ Filming Amine จะมีประสิทธิภาพดีกว่า เนื่องจากไฮดราซีนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะให้เป็นออกไซด์ ซึ่งจะมีผลต่อไม่ดีกว่า ถ้าผิวโลหะเป็นออกไซด์

เพื่อเป็นการป้องกันตะกอนชนิดต่างๆ ได้ดี จำเป็นต้องมีสารเคมีชนิด เช่น Emulsifier & Dispersant เพื่อช่วยในการกำจัดตะกอนต่างๆ ออกมาด้วย นอกจากนี้ การใช้ Filming Amine ควบกับ Neutralizing Amine จะช่วยให้การป้องกันการกัดกร่อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

บรรณานุกรม

1. AWWA **Water Quality and Treatment**. 3rd ed. New York : McGraw-Hill Book Co., 1971.
2. Betz. **Handbook of Industrial Water Conditioning**. 8th ed. Betz Laboratories, 1980.
3. Brand Vold, D.C. **Water Treatment-Industrial and Municiple**. Vantage Press, 1979.
4. Bregman, J.I. **Corrosion Inhibitors** New York : The Macmillan Co., 1963.
5. Butler, G. and Ison, H.C.K. **Corrosion and its Prevention in Waters**. New York : Reinhold Publishing, 1966.
6. Cline, D.A. and Bukkin, K.G. "Steam-Water Cycle Chemistry Requirements for High Pressure Boilers in the Paper Industry." 1981 TPPI Engineering Conference. Atlanta. U.S.A.
7. Cotton, I.J. "Optimize Oxygen Control in Your Boiler-feed System." **Power** (October 1980).
8. Drew. **Principles of Industrial Water Treatment**. New Jersey : Drew Chemical. 1977.
9. Fontana, M.G. and Green, N.D. **Corrosion Engineering**. McGraw Hill Book Co., 1967.
10. Gelosa, T.R. and McCarthy, J.W. "Latest Chemical Treatment Controls Corrosion in Condensate Systems." **Power** (January 1978).
11. Green, D. "Corrosion in Steam Plants." In Steam at Work: Industrial and Marine Steam Plant. I Mech E Conference Publications. The Institution of Mechanical Engineers. London. 1977.
12. Harnell, J.D. "Corrosion Monitoring in the CPI." **Chemical Engineering Progress** (March 1978).
13. Herman, K.W. **Cause and Cures of Waterside Problems in Industrial Boiler Systems**. Drew Chemical Corporation.
14. Kemmer, F.N. **The NALCO Water Handbook**. McGraw Hill Book Co., 1979.
15. Kuby, G.N. "Corrosion Performance." **Chemical Engineering** (March 12, 1979).
16. Lindsaiser, H. **The Corrosion of Copper, Tin and their Alloys**. New York : John Wiley & Sons, 1971.
17. Loss Berg. I.G. "Primary and Secondary Boiler Feed-Water Treatments." **Pulp and Paper Magazine of Canada** (June 6, 1960).

18. Metcalf, J.H. "Inhibition and Corrosion Control Practices For Boiler Waters," in **Corrosion Inhibitors** ed. by C.C. Nathan. National Association of Corrosion Engineering, Texas, 1974

19. Powell, S.T. **Water Conditioning for Industry.** New York : McGraw-Hill Book Co., 1954.

20. Ramney, M.W. **Corrosion Inhibitors-Manufacture and Technology.** New Jersey : Noyes Data, 1976.

21. Rogers, T.H. **Marine Corrosion.** London : George Newnes, 1968.

22. Sedriks, A.J. **Corrosion of Stainless Steels.** John Wiley & Sons, 1979.

23. Shreir, L.L. Corrosion Vol. I & II. London : Newnes-Butterworths, 1977.

24. Smith, T.J. "Analysis of Boiler Corrosion : Why it forms, How to Prevent It." **Pulp and Paper** (December 1978).

25. Speller, F.N. **Corrosion Cause and Prevention.** McGraw-Hill Book Co., 1951.

26. Uhlig, H.H. **Corrosion and Corrosion Control-An Introduction to Corrosion Science and Engineering.** New York : John Wiley & Sons, 1971

27. Uhlig, H.H. **The Corrosion Handbook.** New York : John Wiley & Sons, 1966.

28. Van Vlack, L.H. **Elements of Materials Science.** 2nd ed. Addison Wesley Publishing Co., 1972.

29. Winzney, G.P. and White head. " Effect of Steam Purity of Performance, Reliability and Maintenance of Industrial Steam Turbines " 1977 TAPPI Engineering Conference. Atlanta, U.S.A.

30. Wranglen, G. **An Introduction to Corrosion and Protection of Metals.** Department of Electrochemistry and Corrosion Science, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1972.

10 การป้องกันการเกิดตะกรันเกาะจับในหม้อไอน้ำ

ปัญหาที่เกิดจากน้ำในหม้อไอน้ำที่เป็นอุปสรรคสำคัญมีอยู่ 3 ประการคือ

1. การกัดกร่อน
2. การเกิดตะกรันเกาะจับ
3. การพาสารและน้ำไปกับไอน้ำ (Carry over) ในบทนี้จะรวมถึงการเกิดฟอง (Priming) และการเกิดโฟม (Foaming) ด้วย

สำหรับปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนนั้นได้กล่าวถึงไปแล้วในบทที่ 9 แล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาและวิธีป้องกันปัญหาเรื่องตะกรันเกาะจับและการพาสารและน้ำไปกับไอน้ำ การที่เกิดปัญหาเหล่านี้ได้นั้นเนื่องจากน้ำในหม้อไอน้ำมีปริมาณสารแขวนลอย (SS) และสารละลายน้ำทั้งหมด (TDS) มากเกินกว่าสภาวะการใช้งานที่ความดันต่าง ๆ ในหม้อไอน้ำนั้นจะมีระดับการปรับสภาพน้ำที่ดีเพียงใดก็ตาม ในการที่จะมีความสะอาดบริสุทธิ์ต่าง ๆ ติดไปกับน้ำเลี้ยงเข้าสู่ตัวหม้อไอน้ำย่อมมีบ้าง และเมื่อเข้าสู่หม้อไอน้ำแล้วก็ไม่ได้หายไปไหนจึงสะสมอยู่ตามระดับที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้ว

10.1 การเกิดตะกรันเกาะจับ

การแก้ปัญหาตะกรันเกาะจับในหม้อไอน้ำนั้น สิ่งที่ดีควรใช้วิธีปรับสภาพน้ำเลี้ยงก่อนเข้าหม้อไอน้ำให้ดีที่สุดก่อน ล่องเข้าใช้วิธีใส่สารเคมีเข้าไปในหม้อไอน้ำเพื่อควบคุมสภาพน้ำในหม้อไอน้ำไม่ให้เกิดตะกรันเกาะจับ นอกจากต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นแล้วยังมีสิ่งที่ทำให้เกิดปัญหาตะกรันเกาะจับในหม้อไอน้ำ ได้แก่ ความกระด้าง ทั้งในรูปแคลเซียมและแมกนีเซียม ซิลิกา เหล็กออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ในกรณีที่น้ำที่ระบบปรับสภาพน้ำเลี้ยงดีจะไม่มีปัญหาเรื่องตะกรันของแคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา แต่จะมีปัญหาเรื่องตะกรันของเหล็กและทองแดง

หลักการใช้สารเคมีเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันมี 2 แบบคือ

1. จับตัวตกตะกอน (Precipitation)
2. จับตัวละลายในน้ำ (Solubilizing)

แบบนี้ตัวทำละลายแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. ชนิดมีขั้วหรือโพลาร์ (Polar)

ข. ชนิดไม่มีขั้วหรือนอนโพลาร์ (Non-polar)

10.1.1 วัฏจักรคาร์บอเนต (Carbonate Cycle)

ช่วงก่อนปี พ.ศ. 2463 ในระยะนั้น หม้อไอน้ำจะมีปัญหาเรื่องตะกรันของแคลเซียมและแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งนี้เพราะในบริเวณของหม้อไอน้ำที่มีอัตราการระเหยสูง แคลเซียมซัลเฟตจะมีโอกาสตกผลึกเกิดเป็นตะกรันได้ จึงมีการใช้โซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอชใส่ไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซัลเฟต เกิดเป็นตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือหินปูน ซึ่งละลายน้ำได้น้อยกว่าแคลเซียมซัลเฟต ดังนั้น หินปูนที่เกิดขึ้นแทนที่จะตกตะกอนแข็งอยู่ภายในเครื่องของหม้อไอน้ำแทนที่จะไปเกิดเป็นตะกรันแข็งตามผนังท่อ

ปฏิกิริยาโซดาแอชกับแคลเซียมซัลเฟตเป็นดังสมการ

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3 + Na_2SO_4$$

ที่อุณหภูมิและแรงดันของหม้อไอน้ำ โซดาแอชจะสลายตัวให้ด่างโซดาไฟออกมาได้

$$Na_2CO_3 + H_2O + \text{ความร้อน} \longrightarrow 2NaOH + CO_2\uparrow$$

สำหรับความกระด้างที่อยู่ในรูปแมกนีเซียมจะไม่ทำปฏิกิริยากับโซดาแอชเกิดเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนต เพราะละลายน้ำได้พอควร แต่ถ้าทำปฏิกิริยากับด่างโซดาไฟเกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีลักษณะเป็นสลัดจ์ที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะถูกกำจัดออกจากหม้อไอน้ำโดยการระบายทิ้งไปกับน้ำก้นหม้อ (Blowdown)

$$MgSO_4 + 2NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2 + Na_2SO_4$$

ในอดีตนั้นพบว่าการใช้โซดาแอชเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันนี้ได้ผลบางส่วน เพราะเกิดปัญหามีหินปูนตกค้างอยู่ในหม้อไอน้ำ ซึ่งทำให้เกิดตะกรันที่มีลักษณะอ่อน นุ่ม คล้ายปูนก่อใช้ ดังนั้นโซดาแอชเป็นสารป้องกันตะกรันนี้ มีข้อจำกัดและข้อเสียดังนี้คือ

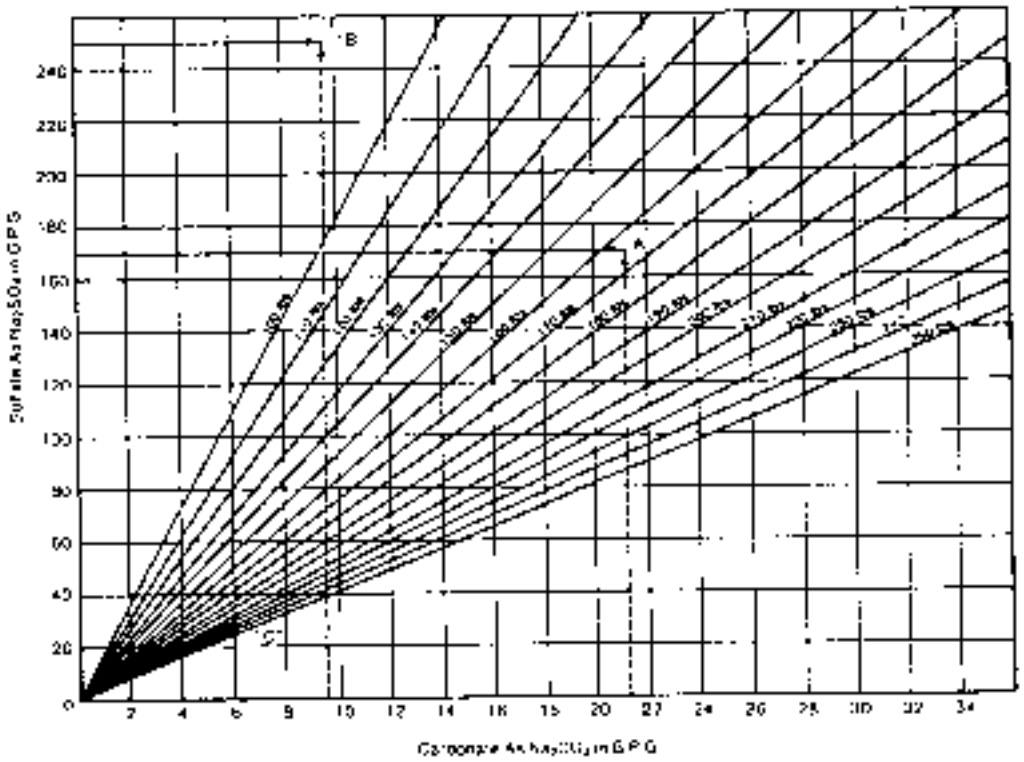
1. ใช้กับหม้อไอน้ำที่มีแรงดันสูงกว่า 200 psi ไม่ได้

2. ที่อุณหภูมิและแรงดันของหม้อไอน้ำในบางขณะ โซดาแอชจะสลายตัวเป็นด่างโซดาไฟรวดเร็วเกินไปจนกระทั่งน้ำเบื้องต้นมีโซเดียมคาร์บอเนตไม่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับความกระด้างแคลเซียม

3. ด่างโซดาไฟที่เกิดขึ้นถ้ามีมากเกินไปก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเปราะได้ นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะละลายอยู่ในน้ำคอนเดนเสทก็ให้เกิดการกัดกร่อนได้

4. ในหม้อไอน้ำชนิดหลอดไฟ (Fire-tube) ซึ่งมีอัตราการไหลเวียนของน้ำต่ำ ทำให้เกิดตะกรันหินปูนได้ง่าย

โซดาแอชถ้าใช้ร่วมกับสารอินทรีย์บางชนิด เช่น แทนนิน ลิกนิน แป้ง เป็นต้น จะทำให้ผลดีมากขึ้น การใช้โซดาแอชเพียงอย่างเดียว ในบางกรณีอาจให้ผลดีกว่าการใช้ฟอสเฟตเสียอีก เช่น ถ้าน้ำเลี้ยงมีความกระด้างสูง การใช้ฟอสเฟตเพื่อขจัดตะกรันจะทำให้เกิดสลัดจ์ที่มีลักษณะเหนียวและหนัก ทำให้ต้องถ่ายเรือบ่อยขึ้น และเกิดฟองมากเกินไป การใช้โซดาแอชร่วมกับสารอินทรีย์จึงสามารถจะเกิดตะกอนหรือสลัดจ์ที่มีลักษณะเหลวพอเหมาะที่ง่าย ทำให้ระบายน้ำทิ้งไปมาก



รูปที่ 10.1 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอเนตและซัลเฟตที่ความดันต่าง ๆ กราฟนี้จะแสดงถึงประสิทธิภาพในการป้องกันตะกรัน โดยการเปลี่ยนแคลเซียมซัลเฟตเป็นคาร์บอเนต G.P.G.= Grain Per Gallon

10.1.2 วัฏจักรฟอสเฟต (Phosphate Cycle)

หลังจากปี พ.ศ. 2469 มีผู้ค้นพบว่าการใช้สารจำพวกฟอสเฟตโซเดียมและเกลือฟอสเฟต (Orthophosphate) ที่อยู่ในรูปของเกลือโซเดียม มีดังนี้

สูตร	ชื่อเรียก	ความเป็นกรด-ด่าง
Na_3PO_4	ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodium phosphate)	เป็นด่างมาก
Na_2HPO_4	ไดโซเดียมฟอสเฟต (Disodium phosphate)	เป็นด่างปานกลาง
NaH_2PO_4	โมโนโซเดียมฟอสเฟต (Monosodium phosphate)	เป็นกรดเล็กน้อย

สารจำพวกฟอสเฟตนี้ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ โดยมิได้มีข้อจำกัดสิ่งเช่นโซดาแอช แต่สารเคมีนี้มีสภาวะการสูญเสียสภาพได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับความกระด้างแคลเซียม เกิดเป็นตะกอนของไตรแคลเซียมฟอสเฟต

$$3Ca^{++} + 2PO_4^{---} \longrightarrow Ca_3(PO_4)_2\downarrow$$

ตะกอนโครแคลเซียมฟอสเฟตนี้ เมื่อตั้งทิ้งไว้จะจับตัวแข็งเป็นหินปูนน้ำ โดยการรวมตัวกับการแข็งตัวของน้ำให้ออกไปทันที ดังนั้นจะไปกลายเป็นตะกอนที่ทำให้เกิดหินปูนน้ำขึ้นมาได้

ปฏิกิริยาของฟอสเฟตกับความกระด้างชนิดต่าง ๆ

$$3CaCO_3 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 3Na_2CO_3$$

$$3Ca(HCO_3)_2 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 6NaHCO_3$$

$$3CaSO_4 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 3Na_2SO_4$$

$$3CaCl_2 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 6NaCl$$

$$3Ca(NO_3)_2 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 6NaNO_3$$

$$3MgCO_3 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Mg_3(PO_4)_2 + 3NaHCO_3$$

$$3MgSO_4 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Mg_3(PO_4)_2 + 3Na_2SO_4$$

$$3MgCl_2 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Mg_3(PO_4)_2 + 6NaCl$$

$$3Mg(NO_3)_2 + 2Na_3PO_4 \rightarrow Mg_3(PO_4)_2 + 6NaNO_3$$

$$Na_2CO_3 + 2Na_2HPO_4 \rightarrow 3Na_3PO_4 + H_2O + CO_2$$

$$Na_2CO_3 + NaH_2PO_4 \rightarrow Na_3PO_4 + H_2O + CO_2$$

$$10Ca(HCO_3)_2 + 6Na_3PO_4 + 2NaOH \rightarrow [Ca_3(PO_4)_2]_3 \cdot Ca(OH)_2 + 10Na_2CO_3 + 10CO_2 + 12H_2O$$

$$10CaSO_4 + 6Na_3PO_4 + 2NaOH \rightarrow [Ca_3(PO_4)_2]_3 \cdot Ca(OH)_2 + 10Na_2SO_4$$

ตารางที่ 10.1 คุณสมบัติของฟอสเฟต

ชนิดของฟอสเฟต	ปริมาณฟอสเฟต % P_2O_5	ค่า pH ของสารละลายร้อยละ 1 %	การละลายในน้ำ ร้อยละ (น้ำหนักสารต่อน้ำหนักน้ำที่ 20 °C)
โซเดียมฟอสเฟส-เดี่ยว $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$	59	4.5	58
โซเดียมฟอสเฟส-ไดไฮเดรต $Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$	39.8	9.1	9
โซเดียมฟอสเฟส-ไม่มีน้ำ Na_2HPO_4	50	9.3	3
โซเดียมฟอสเฟส-เดี่ยว $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	18.5	12.0	28
โซเดียมฟอสเฟส-ไม่มีน้ำ Na_3PO_4	42	12.1	14

เกลือฟอสเฟตสังเคราะห์ : ซิงค์ไพโรฟอสเฟต (Pyrophosphate) ซึ่งได้แก่

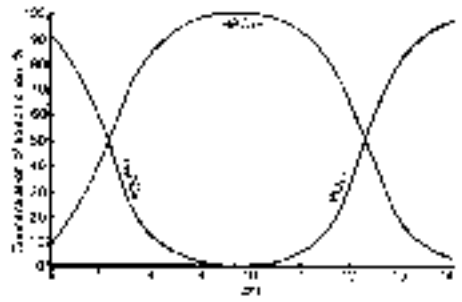
Disodium dihydrogen pyrophosphate ($Na_2H_2P_2O_7$), Tetrasodium pyrophosphate

ต่อมาได้มีการใช้ พอลิฟอสเฟต (Polyphosphate) ซึ่งได้แก่ โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphate-$Na_5P_3O_{10}$)

โซเดียมเฮกซาเมตาฟอสเฟต (Sodium hexametaphosphate - $(NaPO_3)_6$)

$$(NaPO_3)_6 + 6\,H_2O \longrightarrow 6\,NaH_2PO_4$$

$$NaH_2PO_4 + 2\,NaOH \longrightarrow Na_3PO_4 + 2\,H_2O$$



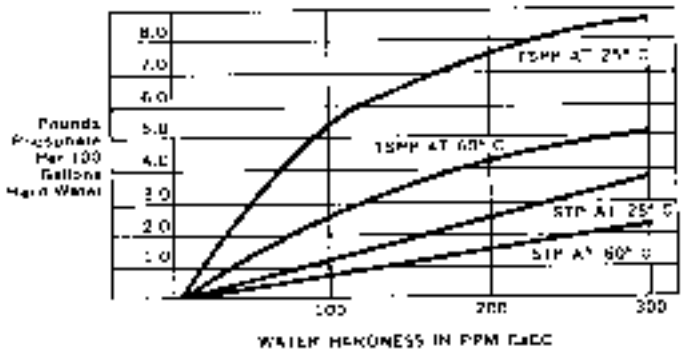
รูปที่ 10.2 แสดงผลของ pH ต่อความสามารถในการละลายของแคลเซียมฟอสเฟตชนิดต่างๆ

การใช้พอลิฟอสเฟตเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันนั้น ความที่ดีต้องใช้ให้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและตกตะกอนแคลเซียมเป็นสลัดจ์ของ Calcium hydroxyapatite ซึ่งเป็นสลัดจ์ที่มีลักษณะอ่อนนุ่น เหนียว ไม่แข็งติดผนังกาต้มน้ำ และหม้อไอน้ำ เป็นสลัดจ์ที่มีสภาพคล้ายกับยูโรไลทแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งทั้งสองชนิดนี้ได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกระด้างกับน้ำยาพอลิฟอสเฟต

ปฏิกิริยาการเกิด Calcium hydroxyapatite เป็นดังนี้

$$10\,Ca^{+2} + 6PO_4^{-3} + 2O\,H \longrightarrow 3\,Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2$$

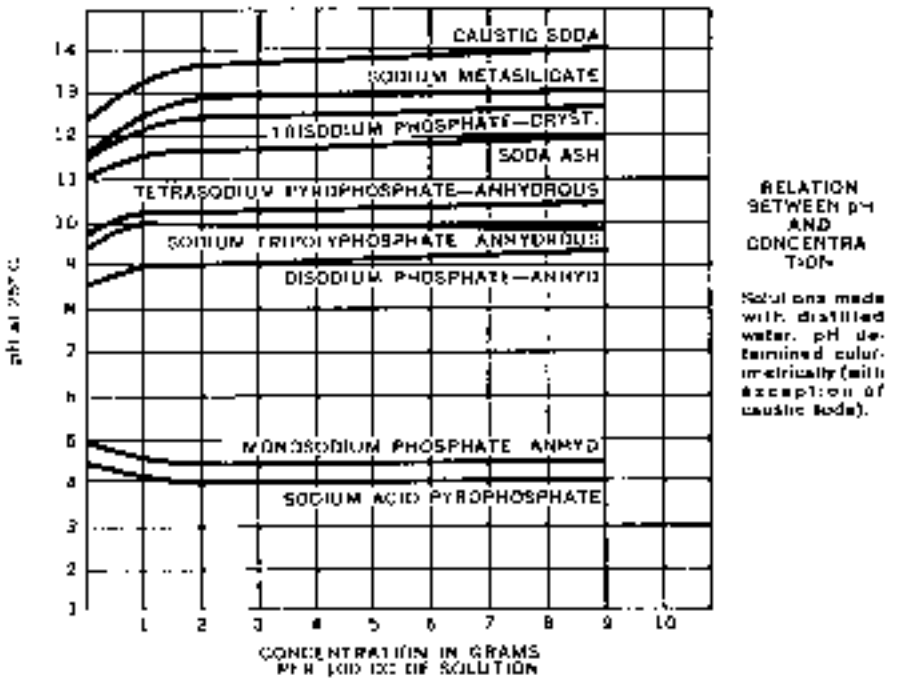
ตะกอนของ Calcium hydroxyapatite ได้ดีที่สุดในน้ำที่เป็นกลางหรือไอโอนิกความเป็นด่างสูงพอ ช่วงที่ดีที่สุดที่ช่วง pH = 11-12 ดังนั้น ถ้าน้ำเลี้ยงให้ความเป็นด่างได้ไม่พอ ก็ควรเติมด่างเข้าไปช่วย โดยหรือโซดาแอชเข้าไปในน้ำหม้อไอน้ำเพิ่มเติม ให้ความเป็นด่างสูงขึ้น ค่า pH ของน้ำในหม้อน้ำต่ำกว่า 9.5 แล้วฟอสเฟตจะจับแคลเซียมเป็นสลัดจ์ไม่หมด



รูปที่ 10.3 ความสามารถในการทำลายความกระด้างของน้ำของสารพวกโพลีฟอสเฟต

TSPP = Tetrasodium pyrophosphate

STP = Sodium tripolyphosphate



รูปที่ 10.4 ค่า pH ของสารจำพวกฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 10.2 คุณสมบัติของสารฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ

ชนิดของฟอสเฟต	ค่า pH ของสารละลายเข้มข้น 1%	ปริมาณฟอสเฟต ในรูป PO_4^{-3} ร้อยละ
โมโนโซเดียมฟอสเฟต ($NaH_2PO_4 \cdot H_2O$)	4.0 - 4.7	68.4
ไดโซเดียมฟอสเฟต ($Na_2HPO_4 \cdot 12\,H_2O$)	8.8 - 9.1	40.4
ไตรโซเดียมฟอสเฟต ($Na_3PO_4 \cdot 12\,H_2O$)	11.7 - 12.0	25.0
เตตระโซเดียมไพโรฟอสเฟต ($Na_4P_2O_7$)	9.9 - 10.2	44.8
โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ($Na_5P_3O_{10}$)	9.7 - 9.8	57.8
โซดาไฟ (NaOH)	13.0	-

จากตารางที่ 10.2 จะเห็นได้ว่าฟอสเฟตแต่ละชนิดมีค่าความเป็นกรด-ด่างไม่เท่ากัน ดังนั้น การที่จะเลือกใช้ฟอสเฟตชนิดใดนั้นขึ้นกับว่าค่า pH ของน้ำเลี้ยงเป็นเท่าใด และต้องการให้น้ำในหม้อไอน้ำมีค่า pH และความเป็นด่างเท่าใด บางแห่งอาจใช้ฟอสเฟตผสมประเภทตรงกันข้ามตลอดเวลาเพื่อปรับค่า pH ของน้ำในหม้อไอน้ำให้ได้ตามต้องการเสมอ ในปัจจุบันนี้มีผู้นิยมใช้ฟอสเฟตจำพวกโพลีฟอสเฟตกันมาก โดยเฉพาะโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟตซึ่งมีสภาพเป็นกรดเล็กน้อย ถ้าหากต้องการความเป็นด่างในน้ำสูงก็จำเป็นต้องเติมด่างโซดาไฟเข้าไปด้วย โพลีฟอสเฟตทุกชนิดเมื่อเข้าไปอยู่ในหม้อไอน้ำซึ่งมีอุณหภูมิสูงแล้วจะสลายตัวกลายเป็นออร์โธฟอสเฟตเพื่อทำปฏิกิริยากับความกระด้างแคลเซียมเกิดเป็นตะกอนหรือสลัดจ์ (Hydroxyapatite) ถ้าเป็นเช่นนี้ก็จะมีผู้สงสัยว่าทำไมไม่ใช้ออร์โธฟอสเฟตจำพวกออร์โธฟอสเฟตเสียเลย เช่น ไดโซเดียมฟอสเฟต ซึ่งราคาถูกกว่าและไม่ต้องเติมด่างด้วย ปัญหาการใช้ออร์โธฟอสเฟตทุกชนิดอยู่ที่ระบบน้ำเลี้ยง เพราะเมื่อปฏิกิริยา

เข้าสู่ระบบน้ำเลี้ยงแล้ว ออโธฟอสเฟตจะทำปฏิกิริยากับความกระด้างแคลเซียมเกิดเป็นสลัดจ์แคลเซียมฟอสเฟตทันที ซึ่งจะไปพอกอยู่ในท่อเกิดเป็นตะกรันในระบบน้ำเลี้ยงได้ แต่ถ้าหากใช้พวกโพลีฟอสเฟตดังกล่าวแล้วก็ทบน้ำเข้าระบบน้ำเลี้ยง จะยังไม่ไปทำปฏิกิริยากับความกระด้างแคลเซียม จนกระทั่งอุณหภูมิสูงพอและระยะเวลานานพอที่จะสลายตัวเป็นออโธฟอสเฟตซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับความกระด้างแคลเซียมต่อไป แม้ว่าออโธฟอสเฟตจะมีปัญหาดังกล่าวแต่ก็มีหม้อไอน้ำบางแห่งใช้สารจำพวกนี้อยู่ ทั้งนี้ต้องไม่เข้าสู่ตัวหม้อของหม้อไอน้ำโดยตรง โดยที่อุณหภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อไอน้ำต้องไม่สูงเกินไปด้วย

10.2 การควบคุมการใช้ฟอสเฟต

การใช้ฟอสเฟตหรือโพลีฟอสเฟตเพื่อป้องกันและขจัดตะกรันนั้น จะต้องคำนึงถึงปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากด่างด้วย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 9 ในระบบ Coordinate Phosphate pH Control นั้น อาจจะใช้ออโธฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ เพียงชนิดเดียว ๆ ตามต้องการและจะมีปัญหาการเกิดด่างอิสระ ทั้งโมโนโซเดียมฟอสเฟต ไดโซเดียมฟอสเฟต และไตรโซเดียมฟอสเฟต ทั้งสามตัวสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำสลายตัวเป็น $H_2PO_4^-$, HPO_4^{-2} และ PO_4^{-3} ได้ ซึ่งจะอยู่ในรูปผสมผสมกับ OH อิออน

ปฏิกิริยาการสลายตัวเป็นดังนี้

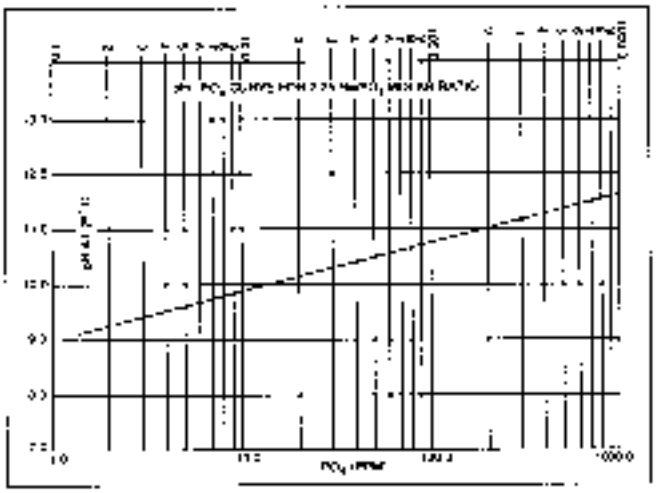
$$PO_4^{-3} + H_2O \longrightarrow HPO_4^{-2} + OH^-$$

$$HPO_4^{-2} + H_2O \longrightarrow H_2PO_4^- + OH^-$$

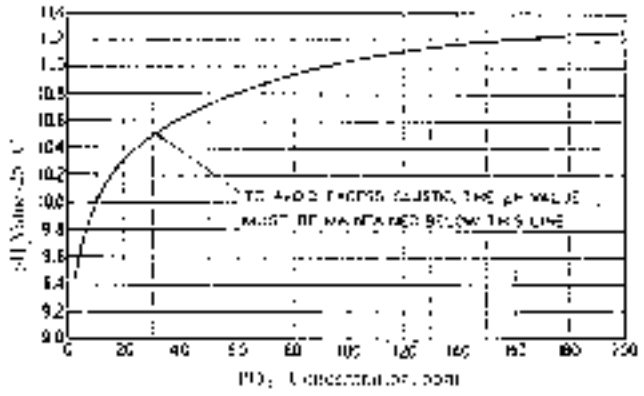
$$H_2PO_4^- + H_2O \longrightarrow 3H^+ + PO_4^{-3} + OH^-$$

$$Na_3PO_4 + H_2O \longrightarrow Na_2HPO_4 + NaOH$$

จะเห็นได้ว่าถ้ามีปริมาณไตรโซเดียมฟอสเฟตที่พอเหมาะจะสลายตัวให้ด่างโซดาไฟจำนวนพอเหมาะเช่นกัน ดังนั้น ในการใช้งานจะเติมไตรโซเดียมฟอสเฟตได้จำนวนหนึ่งเท่านั้น ฟอสเฟตส่วนที่เหลือต้องใช้สารจำพวกฟอสเฟตตัวอื่น ๆ ดังนั้น เพื่อที่จะไม่ให้เกิดด่างอิสระไม่เกินจำนวนที่ต้องการ ณ ที่ pH หนึ่ง จำเป็นต้องควบคุมให้อัตราส่วนโมลาร์ (Molar Ratio) ระหว่าง Na/PO_4 ให้มีปริมาณ 2.75

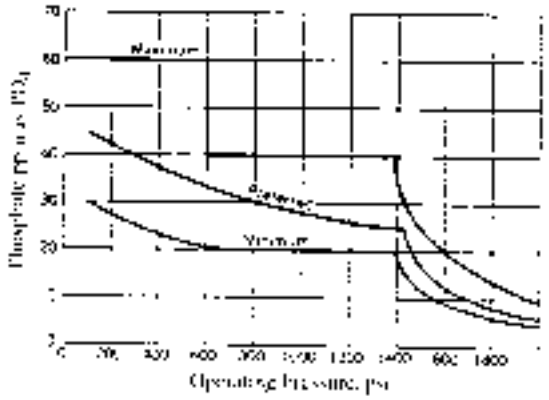


รูปที่ 10.5 กราฟของ pH และปริมาณฟอสเฟตที่มีอัตราส่วนโมลาร์ $Na/PO_4 = 2.75$

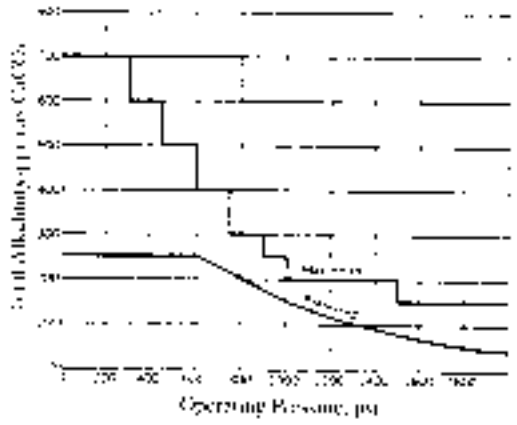


รูปที่ 10.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับความเข้มข้นของไดรโซเดียมฟอสเฟต

การใช้ฟอสเฟตต้องทดสอบว่าเหมาะสมหรือไม่ในขอบเขตของรูปที่ 10.5 และ 10.6 เพื่อป้องกันปัญหาการกัดกร่อน น้ำใช้ฟอสเฟตสองชนิดผสมกัน คือ $Na_3PO_4 \cdot 12\,H_2O$ 0.08 และ Na_2HPO_4 3.66 จะมีอัตราส่วนโมลาร์ 1.0 น้ำหนัก pH ของน้ำในหม้อไอน้ำก็จะต่ำไปกว่าเพียงอัตราส่วนของไดรโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต แต่ค่า pH สูงเกินไปก็ไม่ดีเช่นกัน ผลลัพธ์ผสม



รูปที่ 10.7 ปริมาณฟอสเฟตในน้ำหม้อไอน้ำ ที่ความดันใช้งานต่าง ๆ

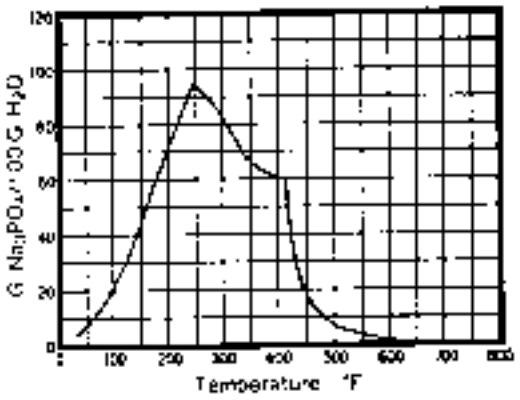


รูปที่ 10.8 ความเป็นด่างของน้ำในหม้อไอน้ำที่ความดันใช้งานต่าง ๆ

สารยับยั้งตะกรันฟอสเฟตในน้ำหม้อน้ำนั้น ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 10.8 และตารางที่ 10.5 ตารางนี้แสดงสารยับยั้งตะกรันที่ใช้ในหม้อน้ำตาม ASME (คู่มือเครื่องกลหม้อไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า ฉบับปรับปรุงแก้ไข)

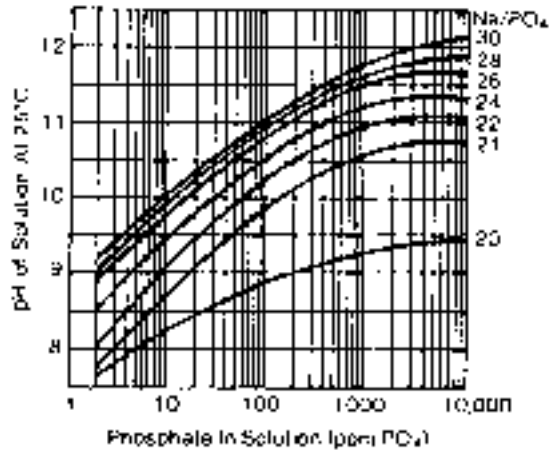
10.3 ปรากฏการณ์ "การซ่อนตัว" ของฟอสเฟต

สำหรับหม้อน้ำที่ใช้โซเดียมฟอสเฟตในการควบคุมตะกรันนั้น ในบางครั้งจะมีการสูญเสียฟอสเฟตอย่างกะทันหันและไม่คาดคิด ในขณะที่ยังมีปริมาณฟอสเฟตอยู่ในหม้อน้ำ และในขณะที่ยังมีปริมาณฟอสเฟตมากเกินพอที่จะสร้างตะกรันฟอสเฟตได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "ฟอสเฟตซ่อนตัว" (Hide-out) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตลดลงอย่างรวดเร็วในพื้นที่ที่เกิดความร้อนสูง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ตะกรันฟอสเฟตเคยก่อตัวขึ้นมาก่อนหน้านี้ ทั้งนี้เนื่องจากตะกรันฟอสเฟตมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อน้ำที่อยู่รอบๆ ตะกรันฟอสเฟตมีอุณหภูมิสูงขึ้น ตะกรันฟอสเฟตจึงเริ่มละลายน้ำได้ ทำให้ฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำบริเวณนั้นถูกดูดซับโดยตะกรันฟอสเฟตที่ยังไม่ละลายน้ำ ทำให้ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำบริเวณนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนด่างได้ ในขณะที่ตะกรันฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำบริเวณนั้นถูกดูดซับโดยตะกรันฟอสเฟตที่ยังไม่ละลายน้ำ ตะกรันฟอสเฟตที่ยังไม่ละลายน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตาหรือด้วยกล้องส่องตรวจภายในหม้อน้ำ ดังนั้นจึงไม่สามารถตรวจพบปรากฏการณ์ฟอสเฟตซ่อนตัวได้ด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตาหรือด้วยกล้องส่องตรวจภายในหม้อน้ำ



รูปที่ 10.8 การละลายของโซเดียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การใช้โซเดียมฟอสเฟตในการควบคุมตะกรันนั้นมีข้อจำกัดอยู่บางประการ ดังนี้ ประการแรกคือโซเดียมฟอสเฟตมีการละลายน้ำได้ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ประการที่สองคือโซเดียมฟอสเฟตมีการตกตะกอนได้ง่ายในน้ำที่มีความกระด้างสูง และประการที่สามคือโซเดียมฟอสเฟตมีการตกตะกอนได้ง่ายในน้ำที่มีความเป็นด่างสูง ดังนั้นในหม้อน้ำที่มีความดันสูงจึงไม่นิยมใช้โซเดียมฟอสเฟตในการควบคุมตะกรัน ในหม้อน้ำที่มีความดันสูงนั้นนิยมใช้สารยับยั้งตะกรันที่ไม่ตกตะกอนได้ง่ายในน้ำที่มีความกระด้างสูงและน้ำที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งสารยับยั้งตะกรันที่นิยมใช้ในหม้อน้ำที่มีความดันสูงนั้นได้แก่ สารยับยั้งตะกรันประเภทโพลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งสารยับยั้งตะกรันประเภทโพลิเมอร์นี้จะมีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อนกว่าสารยับยั้งตะกรันประเภทฟอสเฟต ดังนั้นสารยับยั้งตะกรันประเภทโพลิเมอร์จึงมีราคาแพงกว่าสารยับยั้งตะกรันประเภทฟอสเฟต ดังแสดงในตารางที่ 10.6 ซึ่งสารยับยั้งตะกรันประเภทโพลิเมอร์ที่นิยมใช้ในหม้อน้ำที่มีความดันสูงนั้นได้แก่ โพลีอะคริเลต (Polyacrylate) โพลีเมทาคริเลต (Polymethacrylate) โพลีมาลีอิกแอนไฮไดรด์ (Polymaleic anhydride) และโพลีสไตรีนซัลโฟเนต (Polystyrene sulfonate) เป็นต้น ในการควบคุมตะกรันในหม้อน้ำที่มีความดันสูงนั้น นิยมใช้สารยับยั้งตะกรันประเภทโพลิเมอร์ร่วมกับสารยับยั้งตะกรันประเภทฟอสเฟต โดยสารยับยั้งตะกรันประเภทฟอสเฟตที่นิยมใช้ในหม้อน้ำที่มีความดันสูงนั้นได้แก่ โซเดียมไตรฟอสเฟต (Na_3PO_4) ซึ่งจะมีการใช้งานที่ความเข้มข้นประมาณ 2.0 ถึง 2.6 ppm และรักษาความเป็นด่างของน้ำในหม้อน้ำให้อยู่ในช่วง 9.6 ถึง 9.8



รูปที่ 10.10 ค่า pH ของสารละลายออโธฟอสเฟตที่มีอัตราส่วนโมลาร์ของ Na/PO_4 ต่าง ๆ

ในรูปที่ 10.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pH และฟอสเฟต โดยมีอัตราส่วนโมลาร์ต่าง ๆ ตั้งแต่ไตรโซเดียม (Na/PO_4 = 3.0) ไปจนถึงไดโซเดียม (Na/PO_4 = 2.0) จะเห็นได้ว่า ถ้าใช้ฟอสเฟตสองชนิดผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ก็จะได้อัตราส่วนโมลาร์ที่ต้องการได้ ถ้า Na/PO_4 = 2.6 แล้วจะไม่เกิดตะกอนอิสระเลย แม้ว่าจะมีฟอสเฟตไอออนที่ผนังท่อ ทั้งนี้เพราะน้ำในหม้อไอน้ำในกรณีนี้จะมีอัตราส่วน Na/PO_4 ต่ำกว่า 2.6 จึงไม่มีโอกาสเกิดตะกอนอิสระได้

10.4 การแก้ไขความกระด้างแมกนีเซียม

การใช้สารละลายฟอสเฟตนั้น ใช้ได้ผลเฉพาะเพื่อขจัดความกระด้างแคลเซียมเท่านั้น ถ้าฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับความกระด้างแมกนีเซียม จะได้ตะกอนหรือสลัดจ์ของแมกนีเซียมฟอสเฟต ($Mg_3(PO_4)_2$, $Mg(OH)_2$) ซึ่งเป็นสลัดจ์ที่มีลักษณะเหนียวหนืด หนัก กระจัดกระจายผนังในหม้อไอน้ำได้ง่าย และตกตะกอนแมกนีเซียมฟอสเฟตจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีปริมาณฟอสเฟตเกือบอยู่ในน้ำหม้อไอน้ำมากกว่าความกระด้าง และ/หรือน้ำในหม้อไอน้ำมีความเป็นด่าง P ต่ำ ซึ่งมากกว่าความจำเป็นอย่างใดอย่างหนึ่งก็พอเพียงที่จะเกิดสลัดจ์ของแมกนีเซียมฟอสเฟตได้แล้ว นี่คือเหตุผลที่ว่าทำไมน้ำในหม้อไอน้ำจึงต้องมีความเป็นด่างและปริมาณฟอสเฟตตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของน้ำหม้อไอน้ำต่อไป

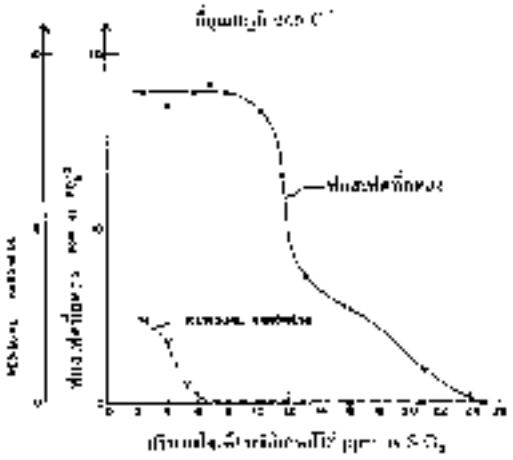
ถ้าหากน้ำในหม้อไอน้ำมีความเป็นด่างมากพอ ความกระด้างแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์เกิดเป็นตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และถ้ามากน้ำในหม้อไอน้ำมีปริมาณซิลิกามากพอ ความกระด้างจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็นตะกอนหรือสลัดจ์ของแมกนีเซียมซิลิเกต ซึ่งกระจายตัวได้ดีในน้ำ และไม่เกาะติดผนังโดยตรง ขจัดทิ้งได้ง่ายโดยการระบายทิ้งไปกับน้ำก้นหม้อ

ปฏิกิริยาการเกิดตะกอนมีดังนี้

$$MgCl_2 + 2\,NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2 + 2\,NaCl$$

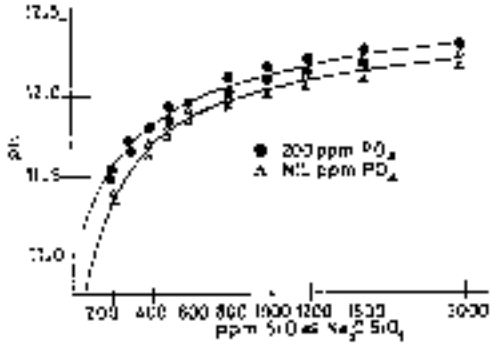
$$3\,Mg^{+2} + 2\,SiO_3^{-2} + 2\,OH^- + H_2O \longrightarrow \underset{\text{Serpentine}}{3MgO \cdot 2\,SiO_2 \cdot 2\,H_2O}$$

ถ้าควบคุมให้น้ำหม้อไอน้ำมีความเป็นด่างต่ำเกินไปก็จะเกิดปัญหาเรื่องสะเก็ดแมกนีเซียมฟอสเฟตขึ้นได้ง่ายเช่นเดียวกัน แต่ถ้าน้ำมีความเป็นด่างมากเกินไปก็จะทำให้ปริมาณของไฮดรอกไซด์ของแมกนีเซียมและสารประกอบอื่นๆ ที่ไม่ละลายน้ำเกิดขึ้นมากเกินไปจนเป็นสะเก็ดได้ง่ายเช่นเดียวกัน ในกรณีที่น้ำเลี้ยงมีความกระด้างแมกนีเซียมมากและมีปริมาณซิลิกาอยู่น้อย ต้องเติมซิลิกาเข้าไปในรูปของโซเดียมเมตาซิลิเกต (Na_2SiO_3) ร่วมไปกับสารเคมีชนิดอื่นๆ ที่ใส่เข้าไปในหม้อไอน้ำ เพื่อให้มีปริมาณซิลิกาเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับสะเก็ดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสะเก็ดแมกนีเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นสะเก็ดที่จับตัวแข็งและควบคุมได้ง่าย เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดีต้องควบคุมอัตราส่วนระหว่างความกระด้างแมกนีเซียมและซิลิกาให้มีค่าเท่ากับ 2 จึงจะเกิดสะเก็ดได้ง่าย ถ้าแหล่งน้ำที่ใช้ทำน้ำเลี้ยงนั้นเป็นน้ำที่มีความกระด้างอยู่ในรูปของแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่แล้ว ต้องระมัดระวังอย่าเติมฟอสเฟตมากเกินความต้องการ และต้องใช้โซเดียมเมตาซิลิเกตร่วมด้วยเสมอ สำหรับปริมาณโซเดียมเมตาซิลิเกตที่ต้องการให้นี้จะคิดจากความกระด้างแคลเซียมได้



รูปที่ 10.11 การควบคุมความกระด้างแมกนีเซียมด้วยฟอสเฟตและซิลิเกต
น้ำมีคุณสมบัติดังนี้

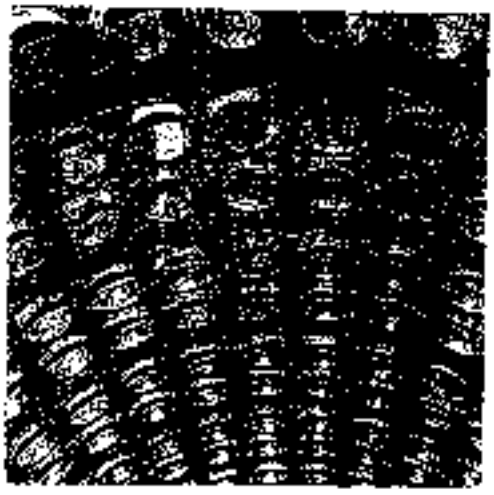
ความกระด้างแมกนีเซียม	120	พีพีเอ็ม
ปริมาณฟอสเฟต	47.5	พีพีเอ็ม
ความเป็นด่าง P	95–110	พีพีเอ็ม
pH	11.3–11.5	พีพีเอ็ม



รูปที่ 10.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และปริมาณโซเดียมซิลิเกต
เมื่อไม่มีฟอสเฟตและมีฟอสเฟต 200 พีพีเอ็ม จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันไม่มาก

10.5 สารปรับสภาพตะกอน (Sludge Conditioner)

[illegible] ใช้ในการ [illegible] ปูนขาว [illegible] หรือโซเดียมอลูมิเนต ซึ่งจะทำให้ [illegible] ดังรูปล่าง [illegible] ที่มีประจุลบที่ผิวสามารถดูดซับประจุบวกของสารส้มได้ง่ายกว่า ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น และยังมีโอกาสที่ตะกอนจะเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น [illegible] ทางกายภาพ เช่น ความเข้มข้น ดังนั้น เพื่อให้การปรับสภาพตะกอนในขั้นตอนนี้ได้ผลดีขึ้น จึงนิยมใช้สารปรับสภาพตะกอน (Sludge Conditioner) ซึ่งจะไปทำให้ตะกอนหรือสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ ไม่สามารถดูดซับน้ำได้ (Dispersed) ในขั้นตอนต่อไป เพื่อให้ตะกอนอยู่ในสภาพที่ระบายน้ำได้ดี [illegible] ที่จะนำมาใช้ปรับสภาพตะกอน ได้แก่ สารอินทรีย์ พอลิเมอร์สังเคราะห์ และสารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แทนนิน (Tannin), ลิกนิน (Lignin), แป้งดัดแปลง (Modified Starch) อัลจิเนต (Alginic Acid & Mannuronic Acid), Glucosate, Sodium Lignosulfonate, CMC (Carboxymethyl Cellulose) สารโพลิเมอร์สังเคราะห์ [illegible] Sodium polystyrene sulfonate, Polyacrylamide, Polyvinylphenol, Styrene maleic Anhydride copolymer, Sodium polyacrylate & methacrylate เป็นต้น



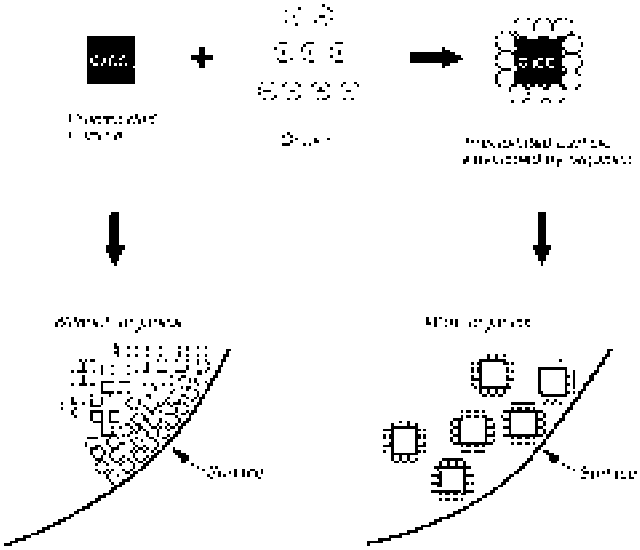
รูปที่ 10.13 แสดงหลักการของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในการจับกับมลภาวะในน้ำ

รูปที่ 10.14 ภาพแสดงการใช้พอลิเมอร์ในน้ำที่ระดับประสิทธิภาพต่างกันและตะกอน

รูปที่ 10.15 ผลของสารเคมีในหม้อน้ำของหม้อไอน้ำขนาดกำลังผลิต 25,000 ปอนด์ต่อชั่วโมง

(ซ้าย) [illegible] (Acid Cleaning) [illegible]

(ขวา) [illegible]



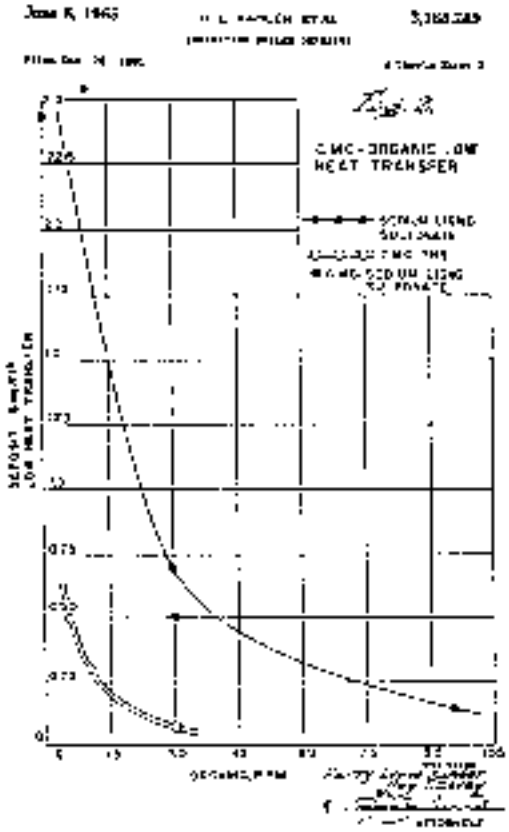
รูปที่ 10.16 แสดงภาพสารโพลิเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic) ทำหน้าที่ช่วยให้ตะกอนไม่เกาะผนังได้อย่างไร

แทนนินเป็นสารที่ละลายได้ดีในน้ำ มีส่วนประกอบของสาร Polyhydroxy benzene ซึ่งได้จากการสกัดเปลือกไม้และเมล็ดพืชต่าง ๆ เช่น Quebracho และแทนนินสังเคราะห์ [illegible] ใช้ควบคุมตะกอน [illegible] สารปรับสภาพตะกอนที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ CMC และโพลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ สารปรับสภาพตะกอนที่ดีนั้นอาจต้องใช้สารหลายชนิดผสมกันขึ้นอยู่กับสภาพน้ำว่าจะให้ผลดีที่สุด

ตารางที่ 10.3 ผลการทดลองใช้ CMC และโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตในการป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำ

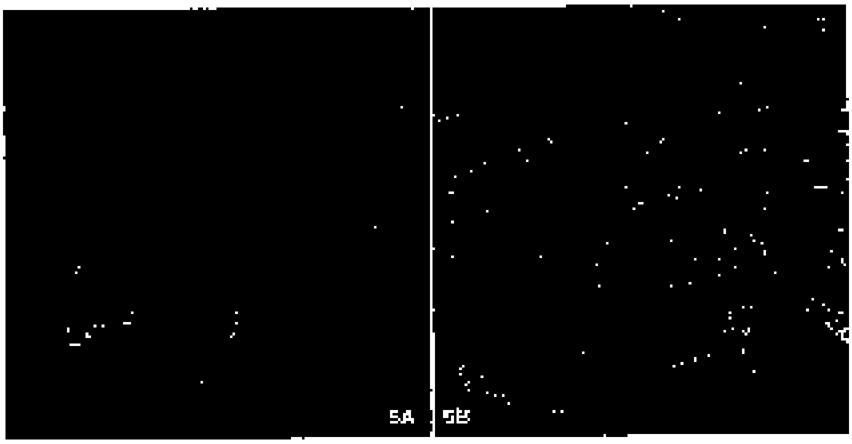
ปริมาณสารที่ใช้ (พีพีเอ็ม)	ปริมาณตะกรัน (กรัม-ต่อตารางฟุต)	
	บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ	บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง
ไม่ใส่สารเคมี	7.4	7.2
โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 10 พีพีเอ็ม	2.6	5.7
โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 50 พีพีเอ็ม	0.7	1.4
โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 95 พีพีเอ็ม	0.15	0.17
CMC 5 พีพีเอ็ม	0.52	1.01
CMC 10 พีพีเอ็ม	0.30	0.20
CMC 50 พีพีเอ็ม	0.0	0.05
CMC 5 พีพีเอ็ม + โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 95 พีพีเอ็ม	0.51	0.75

จากตารางที่ 10.3 นี้ จะเห็นได้ว่าสารปรับสภาพตะกอนบางชนิดก็เป็นสารป้องกันการเกิดตะกรันด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดต่อไป

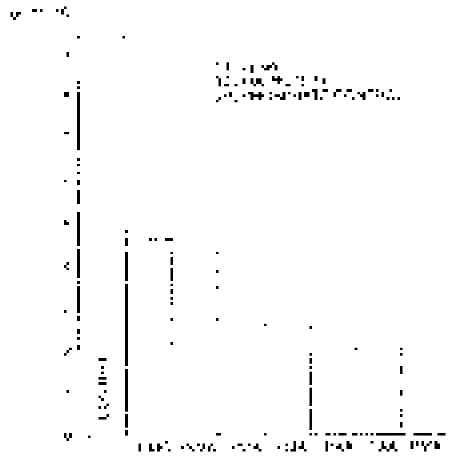


รูปที่ 10.17 ภาพจากเอกสารสิทธิบัตรของสหรัฐอเมริกา แสดงประสิทธิภาพการใช้ CMC เปรียบเทียบกับโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต

การที่สารปรับสภาพละลายได้ดีทำให้การเกิดตะกรันน้อยลง เนื่องจากสารเหล่านี้ไปจับกับแคลเซียมหรือห่อหุ้มอนุภาคผลึกของแคลเซียมฟอสเฟต และแมกนีเซียมซิลิเกตให้แขวนลอยอยู่ในน้ำ เคลื่อนไปได้และเลือกไม่ไปเกาะติดอยู่บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนและหัวฉีดและกรองได้ (ดูรูปที่ 10.16)



รูปที่ 10.16 (ซ้าย) รูปผลึกของตะกรันแคลเซียมฟอสเฟตและแมกนีเซียมซิลิเกตที่เกิดในระบบหล่อเย็น
(ขวา) หลังจากใส่สารโพลีเมอร์ เช่น Sulfonate ซึ่งเป็นสารปรับสภาพ ผลึกจะกระจายตัวได้ดี



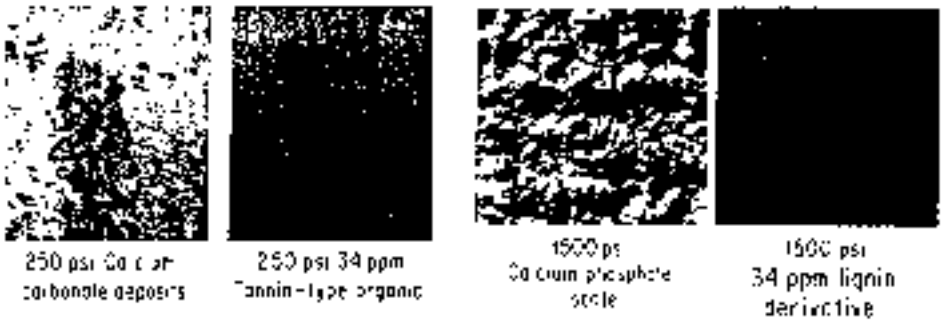
รูปที่ 10.17 ประสิทธิภาพการป้องกันตะกรันของโพลีเมอร์ชนิดต่าง ๆ

PAA = Polyacrylamide

PMA = Polymethacrylate

10.8 สารป้องกันตะกรันจำพวกโพลีเมอร์

สารป้องกันตะกรันหรือสารจับผลึกที่ใช้กันอยู่นี้มีหลายชนิด ได้แก่ สารอินทรีย์และสารโพลีเมอร์ที่เกิดในธรรมชาติ เช่น แทนนิน และลิกนิน ที่ใช้กันมาแล้ว CMC สารจำพวก Organophosphorus หรือพวก Phosphonate และสารโพลีเมอร์สังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ สารเหล่านี้นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารปรับสภาพละลายแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารป้องกันและขจัดตะกรันการจับให้ดีอีกด้วย



รูปที่ 10.20

สารโพลิเมอร์ที่กล่าวถึงข้างต้นนี้สามารถป้องกันและขจัดปัญหาเรื่องตะกรันและคราบฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างของสารตะกรันชนิดต่าง ๆ ได้เปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการต่อไปนี้ ปัญหา คือ ในกรณีของ ผนังโพรงเล็ก ๆ แต่จะเกาะลอยอยู่ในน้ำและขนส่งตกเป็นตะกอนที่ก้นหม้อไอน้ำ (ดูรูปที่ 10.21)

รูปที่ 10.21

ปริมาณสารที่ต้องใช้จะเป็นปริมาณน้อยมากเพียงเพื่อให้เกิดผลที่เรียกว่า "Threshold Effect" เท่านั้น ไม่จำเป็นต้องใส่สารเป็นจำนวนมากเพื่อไปทำปฏิกิริยากับตะกรันทั้งหมด แต่ให้มีปริมาณสารอยู่ในน้ำเพียง 1-10 พีพีเอ็มก็เพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดตะกรันได้แล้ว ซึ่งแตกต่างกับการใช้ฟอสเฟตที่ต้องใส่ไปเพื่อทำปฏิกิริยากับความกระด้างทั้งหมด ดังนั้น แม้ว่าสารเหล่านี้จะมีราคาค่อนข้างแพง แต่ใช้ในปริมาณน้อยก็จำเสียที่ใช้น้อยมาก

10.6.1 Phosphonate

ที่นิยมใช้กันได้แก่สารเคมี 1-Hydroxyethylidene 1, 1-Diphosphonic acid, Nitrotetramethylene phosphonic acid (NTPA), Ethylenediaminetetra-methylenephosphonic acid (EDTPA), Hydroxyethylidene diphosphonic acid (HEDPA), Hexamethylenediaminetetramethylenephosphonic acid

ความเข้มข้นที่ระบบสิ่งกีดขวางถูกทำให้ในปริมาณน้อย ค่าหนึ่งเรียก Threshold Dosage ตามปกติ ความเข้มข้นของสารนี้จะสิ้นสุดเมื่อการกัดกร่อน

10.6.2 Polymer

โดยมากที่นิยมใช้เพราะว่า เมื่อเติมลงไปในน้ำจะแตกตัวเป็นประจุลบ (Polyanion or Polyelectrolyte) เช่น ตัวอย่าง Polyacrylamide แต่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 5,000-20,000 เท่านั้นที่จะมีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน สามารถจำแนกประเภทของสารนี้ได้ น้ำหนักโมเลกุลมากมีค่าเป็นล้าน ตัวอย่างที่ใช้บ่อย เช่น Polyacrylic acid, Sodium polyacrylate (NaPA), Polymethacrylic acid, Sodium polymethacrylate (NaPMA), Polymaleic anhydride, Polyacrylamide, Styrene maleic anhydride polymer, Sulfonated polystyrene, Polyaspartamic acid, Polycitraphenol

ตารางที่ 10.4 แสดงช่วงน้ำหนักโมเลกุลของสารโพลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ป้องกันการเกิดตะกรันและการกัด

โพลิเมอร์	น้ำหนักโมเลกุล	ปริมาณที่ใช้ เพื่อให้	ความเข้มข้นร้อยละ
Polyacrylic acid	1,000-3,000		
Polyacrylic acid	15,000-50,000		-
Polyacrylic acid	5,000-15,000		-
Polyacrylic acid	1,800-3,000		
Sodium polyacrylate	4,000-6,000		
Sodium polyacrylate	5,000-15,000		
Polyacrylic acid	80,000-100,000	3	52
Polyacrylic acid	100,000-150,000	3	62
Polymethacrylic acid	20,000-50,000	3	57
Polymethacrylic acid	5,000-15,000	3	63
Polymaleic anhydride	120,000-150,000	2	61
Polymaleic anhydride	5,000-10,000	3	59

ตารางที่ 10.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดตะกรันหินปูนและแคลเซียมซัลเฟตของโพลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

ชนิดของโพลิเมอร์	ประสิทธิภาพในการป้องกันตะกรันหินปูน ประสิทธิภาพ ร้อยละ			ประสิทธิภาพในการป้องกันแคลเซียมซัลเฟต ประสิทธิภาพ ร้อยละ		
	1 ppm	2 ppm	3 ppm	1 ppm	2 ppm	3 ppm
Sodium polyacrylate (MW 4,000)	65	95	99	10	60	99
Sodium polyacrylate (MW 25,000)	75	91	98	2	97	99
Anionic polyacrylamide acrylic acid copolymer	97	98	99	20	95	99
Acrylic acid polymer	50	93	97	60	95	97
Polyacrylic acid (low MW)	75	90	93	35	75	96
Polymaleic anhydride	95	96	98	30	91	92

[illegible]

10.7 การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็ก

เมื่อเหล็กเสียเนื้อไปจากการกัดกร่อน (Deteriorated) จะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างและเครื่องจักรกล ซึ่งมีผลทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใหม่ ดังนั้นจึงมีการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเกิดขึ้น ซึ่งวิธีการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น การใช้สารเคลือบผิวโลหะ การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน การป้องกันโดยใช้ไฟฟ้า เป็นต้น

ปฏิกิริยาของการเกิดสนิมเหล็กในน้ำ มีดังนี้

$$3\,Fe + 4\,H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + 4\,H_2$$

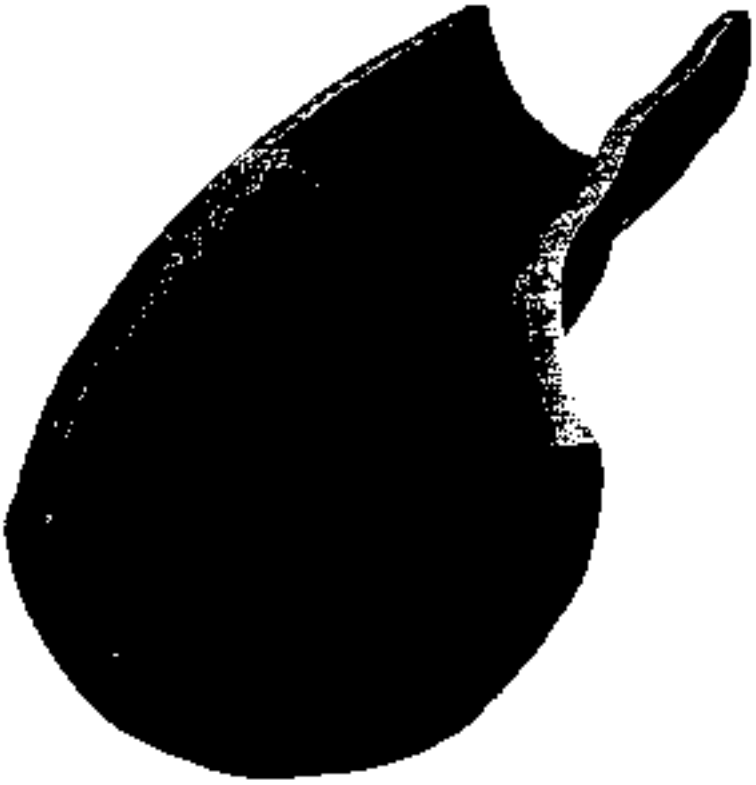
$$Fe + 2\,H^+ \longrightarrow H_2 + Fe^{2+}$$

$$Fe + 2\,H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + H_2$$

$$2\,Fe(OH)_2 + \tfrac{1}{2}\,O_2 + H_2O \longrightarrow 2\,FeO(OH)_2$$

$$2\,Fe(OH)_2 + \tfrac{1}{2}\,O_2 \longrightarrow Fe_2O_3 + 2\,H_2O$$

$$Fe + 2\,CO_2 + 2\,H_2O \longrightarrow Fe(HCO_3)_2 + H_2$$

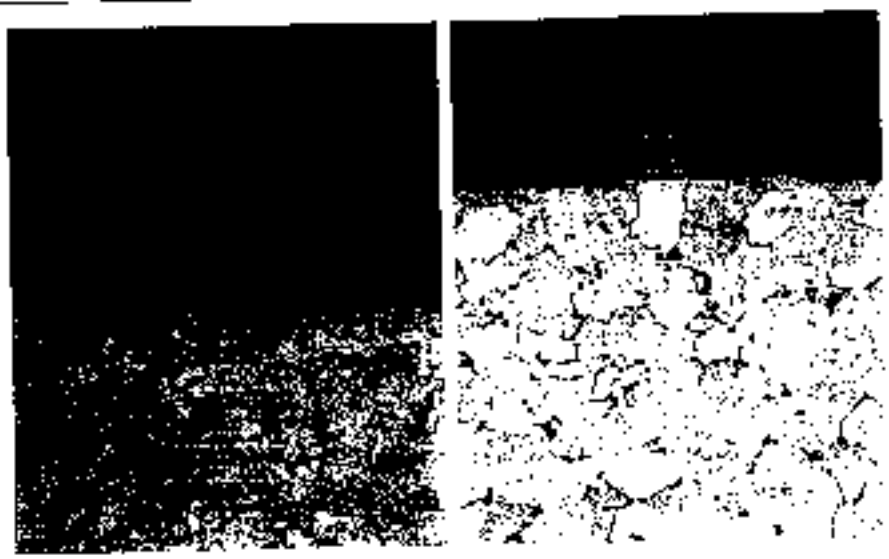


รูปที่ 10.22 ภาพแสดงที่เกิดสนิมเหล็ก

ในรูปที่ ... จะพิจารณาที่ ... (ผู้แปล) ...

ตารางที่ 10.6 ส่วนประกอบของตะกรันในหม้อไอน้ำที่ใช้งานในช่วงความดัน ... psi

ชนิดของตะกรัน	หม้อไอน้ำ ...	หม้อไอน้ำ ...
...	...	...
...	...	...
...	...	...
...	...	...
...	...	...
...	...	...
...	...	...

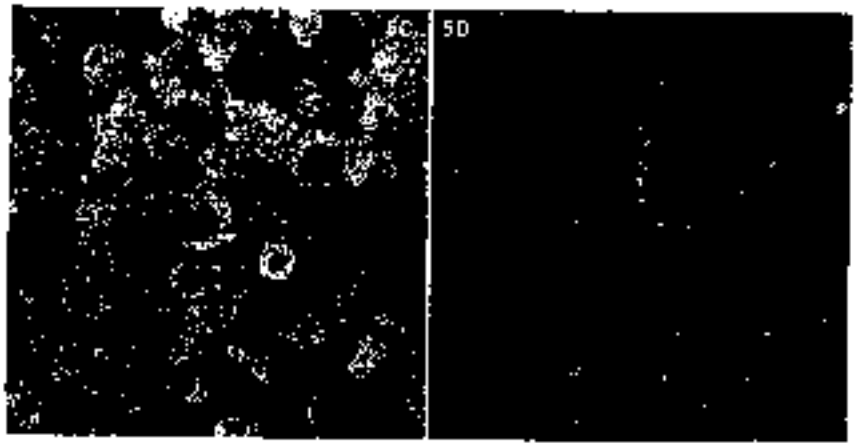


รูปที่ 10.23 แสดงอิทธิพลของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อการเกิดตะกรันหลัก
(ซ้าย) ภาพถ่ายที่ได้จาก ... (ขวา) ภาพถ่ายที่ได้จาก ...

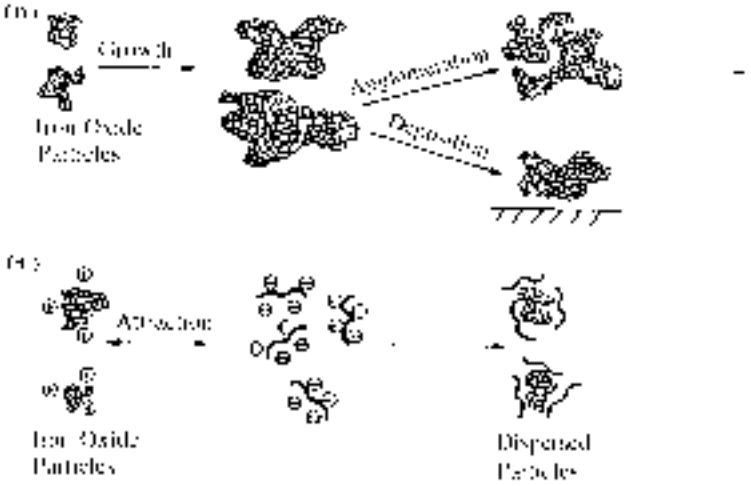
สารเคมีที่ใช้ป้องกันและขจัดตะกรันหลักในหม้อไอน้ำนั้น มีจำพวกที่เป็นกรดและด่าง ไฮดราซีน ... ซึ่งจะไปทำหน้าที่กัดเนื้อโลหะที่สร้างหม้อไอน้ำ ... ทำให้ตะกรันแตกร่อน หรือไปจับตัวกับตะกรันเกิดเป็นสารที่ละลายตัวอยู่ในน้ำ ... ปฏิกิริยาเคมีของไฮดราซีนกับตะกรันหลักจะเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$N_2H_4 + 6\,Fe_2O_3 \longrightarrow 4\,Fe_3O_4 + N_2 + 2\,H_2O$$

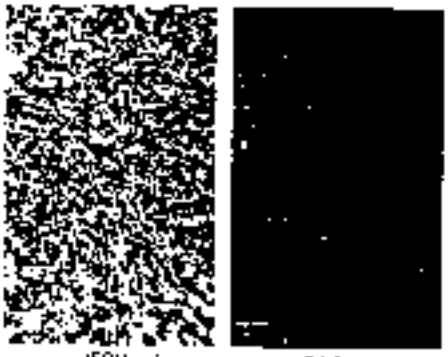
$$N_2H_4 + 4\,CuO \longrightarrow 2\,Cu_2O + N_2 + 2\,H_2O$$



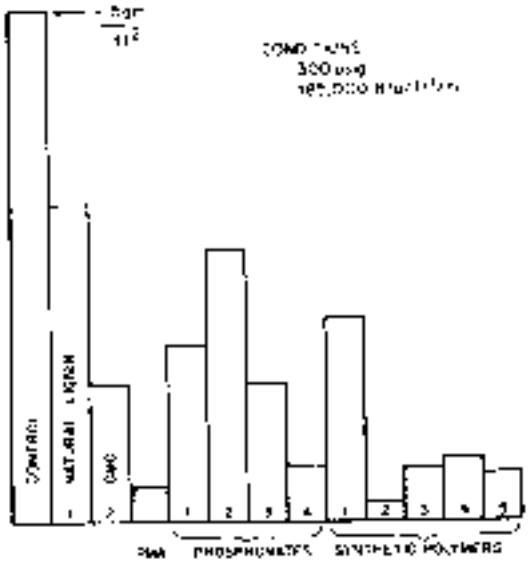
รูปที่ 10.24



รูปที่ 10.25 กลไกของสารโพลิเมอร์จับตะกรันเหล็กกลายไซด์และตะกอนด้วยกันในน้ำ

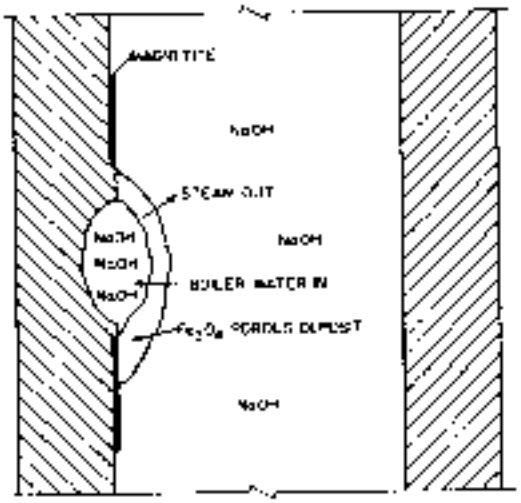


รูปที่ 10.26 การใช้สิทธิ์ในการตกตะกอนเหล็ก



รูปที่ 10.27 ประสิทธิภาพของสารเคมีและโพลีเมอร์ชนิดต่าง ๆ ในการป้องกันตะกรันแข็ง

ตะกรันเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้น เช่น Fe_3O_4 ก่อให้เกิดปัญหามาก เพราะตะกรันนี้มีเนื้อพรุน ซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายฟองน้ำดูดน้ำขนาดจิ๋ว เพราะเนื้อน้ำซึมผ่านเนื้อตะกรันเข้าไปได้รับความร้อนจนระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งจะลอดผ่านตะกรันออกไป น้ำที่ถูกแทนที่จะซึมเข้าไปแทนที่ในน้ำและจะมีความเข้มข้นสูงมาก เป็นเหตุให้เกิดสภาพด่าเข้มข้นได้ เช่น น้ำหม้อ ๆ ตะกรันมีไอลาไฟ 6-10 พีพีเอ็ม แต่ภายใต้ตะกรันนั้นความไอลาไฟอาจเข้มข้นสูงถึง 100,000 พีพีเอ็ม ก็เป็นได้ จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนได้อย่างง่ายดาย



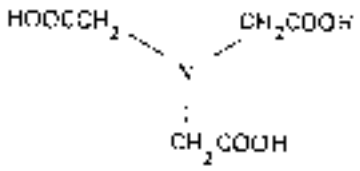
รูปที่ 10.28 ตะกรันแข็งที่มีเนื้อพรุนจะทำให้มีปัญหาเรื่องการเกิดสภาพด่าเข้มข้นภายใต้ตะกรันได้

สารป้องกันตะกรันแบบดันตัวตะแกรงที่ มีดังนี้

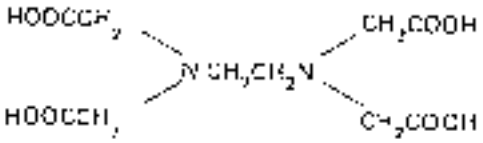
10.8 สารป้องกันตะกรันจำพวกคีเลนท์

คาร์เลนท์ (Chelant หรือ Chelating Agent หรือ Sequestering Agent) นั้นเริ่มรู้จักและใช้กันมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2503 แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดในการประยุกต์จึงไม่ค่อยมีการใช้งานเพราะราคาแพง ในปัจจุบันนี้มีการใช้สำหรับป้องกันการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำและหม้อไอน้ำ ซึ่งมีข้อดีอย่างหนึ่ง คือ การป้องกันตะกรันโดยการใช้ฟอสเฟตนั้นจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากตะกอน (Precipitating) ซึ่งจากปฏิกิริยาจะเกิดแคลเซียมโลหะที่จะเกาะติดและจับตัวได้ แต่สารคีเลนท์จะทำปฏิกิริยาเป็นสารละลายน้ำ (Solubilizing) ทำให้ไม่เกิดตะกอนในหม้อไอน้ำ และคีเลนท์มีคุณสมบัติที่จะจับไอออนของแคลเซียมและโลหะ เช่น Ca^{+2}, Mg^{+2} และโลหะหนักอื่นๆ เช่น Fe^{+2}, Fe^{+3}, Cu^{+2} เกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ สารคีเลนท์ที่นิยมใช้กันมีดังนี้ EDTA (Ethylene diaminetetraacetic acid), NTA (Nitrilotriacetic acid), DTPA (Diethylene triamine penta acetic Acid) และสารอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายสารคีเลนท์ เช่น พวกฟอสโฟนิกแอซิด Citric acid พวก Phosphonic acid ซึ่งมี EDTPA (Ethylenediamine-tetramethylenephosphonic acid) สารคีเลนท์ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ EDTA และ NTA ซึ่งในรูปของเกลือโซเดียม คือ Na_4EDTA และ Na_3NTA

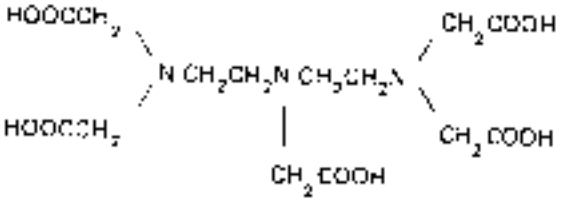
N.T.A.
(Molecular Weight 191)



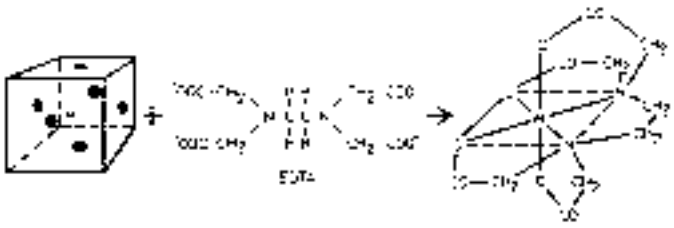
E. D. T. A.
(Molecular Weight 292)



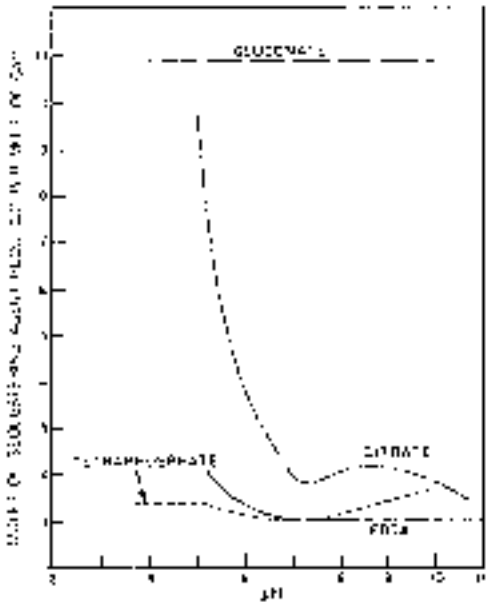
D. T. P. A.
(Molecular Weight 393)



รูปที่ 10.29 สูตรโมเลกุลของสารคีเลนท์ 3 ชนิด



รูปที่ 10.10 EDTA จับอิออนของโลหะที่มี 6 Coordination Site เกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีเสถียรภาพสูง



รูปที่ 10.11 อิทธิพลของ pH ที่มีประสิทธิภาพการจับอิออนแคลเซียมเป็นสาร Sequestering Agent ชนิดต่าง ๆ

EDTA จำแนกปฏิกิริยากับ Ca^{++} ดังสมการต่อไปนี้

$$Ca^{++} + EDTA^{-4} \rightleftharpoons CaEDTA^{-2}$$

$$K = \frac{(CaEDTA^{-2})}{(Ca^{++})(EDTA^{-4})}$$

K = Formation Constant

K_F = Log K

K_s = Stability Constant

ประสิทธิภาพในการจับคีเลตของสารต่างๆ ที่ใช้ดูจากค่า K_s ซึ่งค่า K_s แสดงความเข้มข้นของสารคีเลตที่ใช้ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 10.7 ค่า K_s ของสารคีเลตต่างๆ กับไอออนโลหะชนิดต่างๆ

ไอออนโลหะ	K_s				
	EDTA	NTA	DTPA	STPP	Citric Acid
Ca^{2+}	10.6	6.4	10.9	5.2	3.5
Mg^{2+}	8.7	5.4	9.0	5.7	3.4
Fe^{3+}	24.0	15.9	28.6	7.3	11.9
Fe^{2+}	14.3	8.8			4.4
Cu^{2+}	18.8	12.7	21.0	9.7	6.1
Co^{2+}	16.3	10.4	19.4	9.0	5.0
Al^{3+}	16.1			7	7

STPP = Sodium tripolyphosphate

เนื่องจาก NTA มีค่า K_s ต่ำกว่าไอออนโลหะชนิดต่างๆ ยกเว้น Fe^{3+} ต่ำกว่า EDTA ดังนั้น EDTA จึงมีประสิทธิภาพในการจับคีเลตสูงกว่า NTA ให้ตัวอย่างน้ำที่มีความกระด้างไม่เกิน 905 ppm และ EDTA ใช้เพียงแค่ 1,280 ppm ประสิทธิภาพของสาร ระหว่าง EDTA และ NTA สามารถแสดงได้ดังนี้ (ภาพที่ 10.7) ดังนี้

1. ความสามารถในการคีเลตโลหะที่สูงกว่า
2. ความเสถียรในการคีเลตที่สูงกว่า
3. ความสามารถในการใช้งานในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า
4. ความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ปัจจัยของสารคีเลตที่เป็นตัวแทนที่ดีในการขจัดน้ำกระด้าง ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ (OH) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ดังภาพที่ 10.7 จะเห็นว่า EDTA มีค่า K_s ของ Fe^{3+} = 25.1 นั่นหมายความว่า EDTA จะจับกับไอออนของ Fe^{3+} จะไม่จับกับ OH ซึ่งหมายความว่าในน้ำจะมีไฮดรอกไซด์ มีตะกอนน้ำต่ำกว่า EDTA จับกับ Fe^{3+} เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ตกตะกอนในน้ำ แต่เมื่อไฮดรอกไซด์มีการตกตะกอนน้ำจะ Fe^{3+} กรดไม่ละลาย ถ้าหาก EDTA Fe^{3+} มีการตกตะกอนน้ำจะ Fe^{3+} ก็มีปฏิกิริยาสลาย

การใช้สารคีเลตในน้ำนั้นมีข้อดีหลายประการ ตามที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังมีข้อเสียที่ควรพิจารณาด้วย เช่น ในการใช้งานสารคีเลตในน้ำจะต้องมีการควบคุมปริมาณที่ใช้ให้เหมาะสม ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดการตกตะกอนน้ำแข็ง ตลอดจนการเกิดการกัดกร่อนในท่อน้ำ ดังนั้นการใช้สารคีเลตในน้ำจึงต้องมีการควบคุมปริมาณที่เหมาะสม (Control of Concentration) ดังกล่าวได้

การใช้สารคีเลตในน้ำนั้น จะช่วยแก้ปัญหาในการเกิดตะกรันในหม้อต้มน้ำ ซึ่งจากแบบจำลองการเกิดตะกรันที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ได้อธิบายถึงการเกิดตะกรันในหม้อต้มน้ำ ว่าเกิดจากการที่ความสามารถในการละลายของสารประกอบต่างๆ ในน้ำลดลง ดังนั้นการใช้สารคีเลตในน้ำจึงต้องมีการควบคุมปริมาณที่เหมาะสม ดังต่อไปนี้

1. น้ำที่ผ่านการคีเลตแล้วจะมีความกระด้างไม่เกิน 5 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อลิตร ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 5 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อลิตร ทั้งนี้เพราะน้ำที่มีความกระด้างมากกว่านี้จะต้องใช้สารคีเลตในปริมาณสูงมาก ซึ่งมีราคาแพงมาก ในขณะที่ EDTA มีราคาค่อนข้างแพง

2. ก๊าซไข่เน่า ตัวทำปฏิกิริยาของกระบวนการเมื่อถูกไล่ออกจากน้ำ ทำให้เกิดการ
ตกตะกอนของซัลไฟด์ในน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้

ก. ปฏิกิริยาของไอออนที่อยู่ในสารละลายกับกรดไฮโดรคลอริก

ข. ปฏิกิริยาของไอออนที่อยู่ในสารละลายกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเสีย

ค. ปฏิกิริยาของไอออนที่อยู่ในสารละลายกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ผลิตขึ้นจากปฏิกิริยาของ
ตัวทำปฏิกิริยาในน้ำเสีย ซึ่งมีข้อดีคือ ไม่ต้องเติมสารเคมีเพิ่มเติม แต่ข้อเสียคือ ต้องมีการควบคุมค่า pH
ให้ดีมาก ๆ

3. การใช้ตัวทำปฏิกิริยาที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ ตัวอย่างเช่น ไดไทโอคาร์บาเมต
ซึ่งมีข้อดีกว่าการใช้ Na$_2$EDTA คือ ตัวทำปฏิกิริยาชนิดนี้ไม่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้
ดังนั้นจึงสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่า

4. การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ ตัวอย่างเช่น ไดไทโอคาร์บาเมต ซึ่งมีข้อดีกว่าการใช้
EDTA ตรงที่ไม่ต้องการการควบคุมค่า pH ให้ดีมาก ๆ ตัวทำปฏิกิริยาของไดไทโอคาร์บาเมต คือ Zinc Acetate

5. การตกตะกอนด้วยเฟอร์โรซัลไฟด์ ที่ pH ระหว่าง 7.5 ถึง 8.0

6. น้ำเสียจากการล้างแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ในกระบวนการผลิตกรดไฮโดรคลอริก
ก่อนที่จะนำไปใช้ในการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์ ต้องมีการปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 2.0 ก่อน ทั้งนี้เพื่อป้องกัน
การเกิดตะกอนของเหล็กไฮดรอกไซด์ ในกรณีที่ใช้ตัวทำปฏิกิริยาเป็นเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ตะกอนที่ได้
จะมีสีดำ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้ง Fe_3O_4 หรือ Fe_2O_3 ตามปกติแล้วจะเป็น FeO ซึ่งมีสีดำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้

$$EDTA + FeO + Fe_2O_3 \rightarrow EDTA \cdot Fe_2O + Fe_3O_4$$

$$3\,FeO \rightarrow Fe_3O_4 + Fe$$

10.9 การใช้ EDTA ร่วมกับโซเดียมซัลไฟด์

หากมีการใช้ Na$_2$EDTA ร่วมกับโซเดียมซัลไฟด์ในการบำบัดน้ำเสียพร้อมกัน จะพบว่าสารทั้งสองชนิดนี้จะ
ทำปฏิกิริยากันเองได้ ดังนั้นการใช้ทั้งสองชนิดพร้อมกันจึงไม่ได้ผลเท่ากับ Na$_2$EDTA ตัวเดียว ทั้งนี้เนื่องจาก
Na$_2$EDTA จะไปยับยั้งปฏิกิริยาการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์ ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก
ลดลงไปด้วย ในกรณีที่ต้องการใช้ทั้งสองชนิดร่วมกัน ควรใช้วิธีการเติมสารทั้งสองชนิดนี้ลงไปในถังปฏิกิริยา
ที่แยกจากกัน โดยเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปก่อน แล้วตามด้วย Na$_2$EDTA ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ Na$_2$EDTA
ไปยับยั้งปฏิกิริยาการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์ได้ ในกรณีที่ต้องการใช้ทั้งสองชนิดร่วมกันในถังปฏิกิริยาเดียวกัน
ควรเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปก่อน แล้วตามด้วยสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไดไทโอคาร์บาเมต และควรมีการ
ควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วง 7.5 ถึง 8.0 ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ของ
โลหะหนักกับสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง ในกรณีที่ต้องการใช้
Na$_2$EDTA ทำให้

การใช้สารประกอบอินทรีย์ตัวอื่น ๆ เช่น NTA ก็มีข้อดีและข้อเสียเช่นเดียวกัน

1. น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ต่ำ

2. ค่า pH ของน้ำเสียที่ต้องการใช้งานอยู่ในช่วงประมาณ 7.5 ถึง 8.0 ซึ่งหากมีค่า pH สูงกว่านี้ จะมีปัญหาเกี่ยว
กับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตได้

3. ห้ามใช้ NTA กับน้ำเลี้ยงมีปริมาณแคลเซียมมากกว่า 0.1 พีพีเอ็ม

4. ให้ใช้ระดับอัลคาไลน์ฟอสเฟตไม่เกินกว่า 10 พีพีเอ็ม ในการป้อนน้ำระหว่างการทำงาน

5. ถ้าหากหม้อน้ำมีตะกรันอยู่พอควร ก่อนใช้ NTA ให้ต้มกับโซดาไฟ (ประมาณ 1 ปอนด์ ต่อ 100 แกลลอน) แล้วล้างออกให้สะอาดเสียก่อน มิฉะนั้นตะกรันอาจจะหลุดออกมาเป็นก้อนใหญ่ ซึ่งจะไปอุดตันท่อต่างๆ ในหม้อน้ำ ทำให้การหมุนเวียนน้ำไม่ดี ทำให้เกิดความร้อนสูง หม้อน้ำอาจจะระเบิดได้

6. ให้ใช้ NTA สำหรับหม้อน้ำที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนไม่เกิน 250,000 บีทียู ต่อตารางฟุต ชั่วโมง ถ้ามากกว่านี้ให้ใช้ EDTA แทน

ตารางที่ 10.8 ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ (โดยประมาณ) ต่อโลหะ 1 พีพีเอ็ม

	EDTA พีพีเอ็ม	NTA พีพีเอ็ม
แคลเซียมคาร์บอเนต	3.7	2.8
เหล็ก	2.4	1.8
ทองแดง	3.4	2.6
แมกนีเซียม	17.8	13.0

10.10 การพาสารและน้ำไปกับไอน้ำ (Carry over)

10.10.1 ความหมายของแคร์รีโอเวอร์

การแคร์รีโอเวอร์ คือการที่มีมลทินซึ่งเป็นสิ่งเจือปนต่างๆ ถูกพาพ่วงเข้าไปกับไอน้ำ ทำให้ไอน้ำไม่บริสุทธิ์ สิ่งเจือปนที่ถูกไปกับไอน้ำนั้นอาจอยู่ในสภาพที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ เป็นไอปนไปกับไอน้ำ แคร์รีโอเวอร์ที่เกิดมากมีอยู่ การที่น้ำในหม้อไอน้ำเดือดไปกับไอน้ำ เมื่อเกิดฟองน้ำ สิ่งจะมีสารแขวนลอยและสารละลายน้ำติดไปด้วย การที่มีสารละลายน้ำปนไปกับไอน้ำนั้นทำให้ไอน้ำไม่บริสุทธิ์ ความบริสุทธิ์ของไอน้ำ (Steam Purity) แสดงว่าไอน้ำนั้นมีสิ่งเจือปนที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือที่กลายเป็นไอปนไปกับไอน้ำเท่าใด ไอน้ำที่มีคุณภาพบริสุทธิ์มากจะมีการพาสารละลายน้ำติดไปกับไอน้ำน้อย การวัดความบริสุทธิ์ของไอน้ำนั้นจะดูที่ปริมาณสารที่ละลายอยู่ในน้ำเท่านั้นที่จะไปก่อให้เกิดปัญหาเรื่องตะกรันและการกัดกร่อน ส่วนน้ำที่ติดไปกับไอน้ำไม่มีผลอันตรายแม้แต่น้อย นอกจากจะทำให้คุณภาพของไอน้ำ (Steam Quality) ลดลง คุณภาพของไอน้ำคือ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในไอน้ำ เช่น ไอน้ำที่มีคุณภาพ 99% คือมีน้ำ 1 ส่วน และไอน้ำ 99 ส่วน

10.10.2 มลทินในไอน้ำ (Steam Contamination)

มลทินหรือสิ่งเจือปนในไอน้ำนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. **มลทินที่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องตะกรันเกาะจับ** ได้แก่

แคลเซียมไบคาร์บอเนต	แคลเซียมซัลเฟต
เกลือของแคลเซียม	ซิลิเกต
เกลือของแมกนีเซียม	ไนเตรต

ซิลิกา ไบคาร์บอเนต

เกลือของเหล็ก คาร์บอเนต

สารอินทรีย์

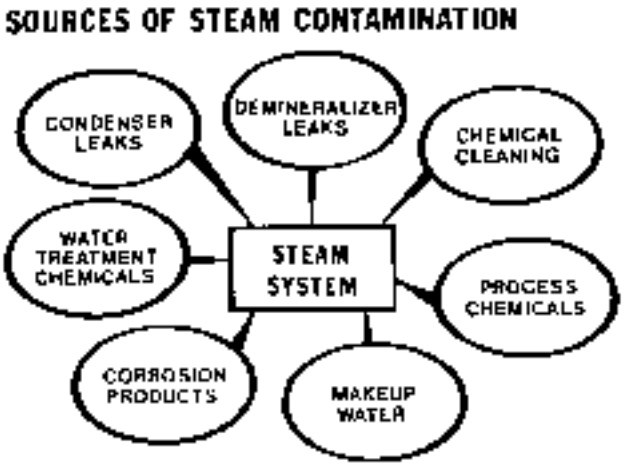
2. มลทินที่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการกัดกร่อน ได้แก่

แอมโมเนีย ออกซิเจน

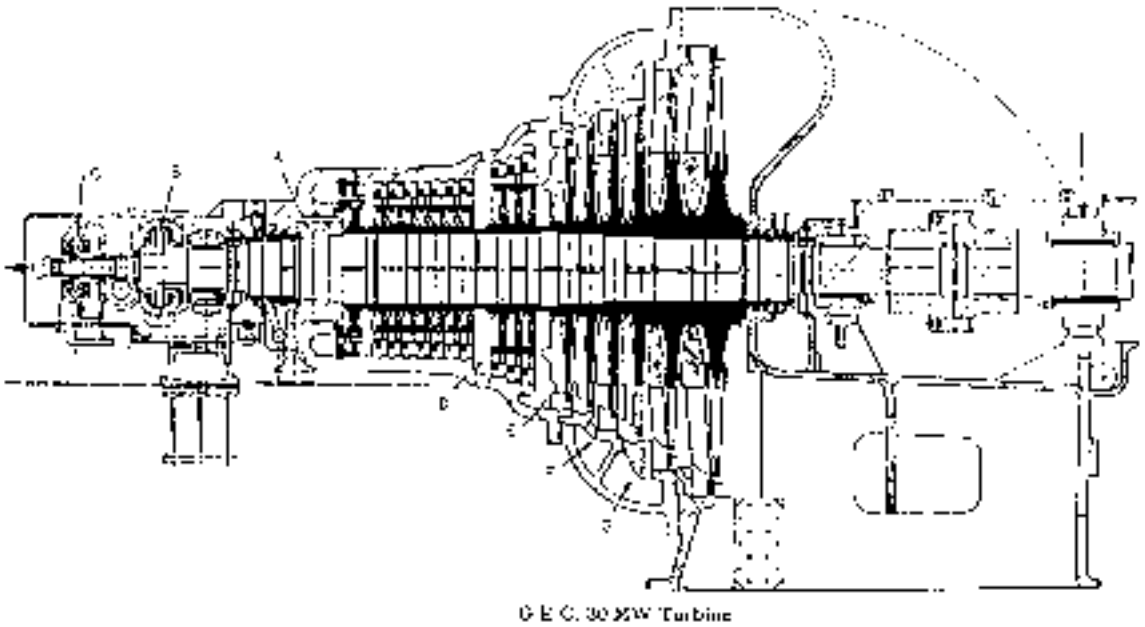
คลอไรด์ ซัลไฟด์

คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮดรอกไซด์

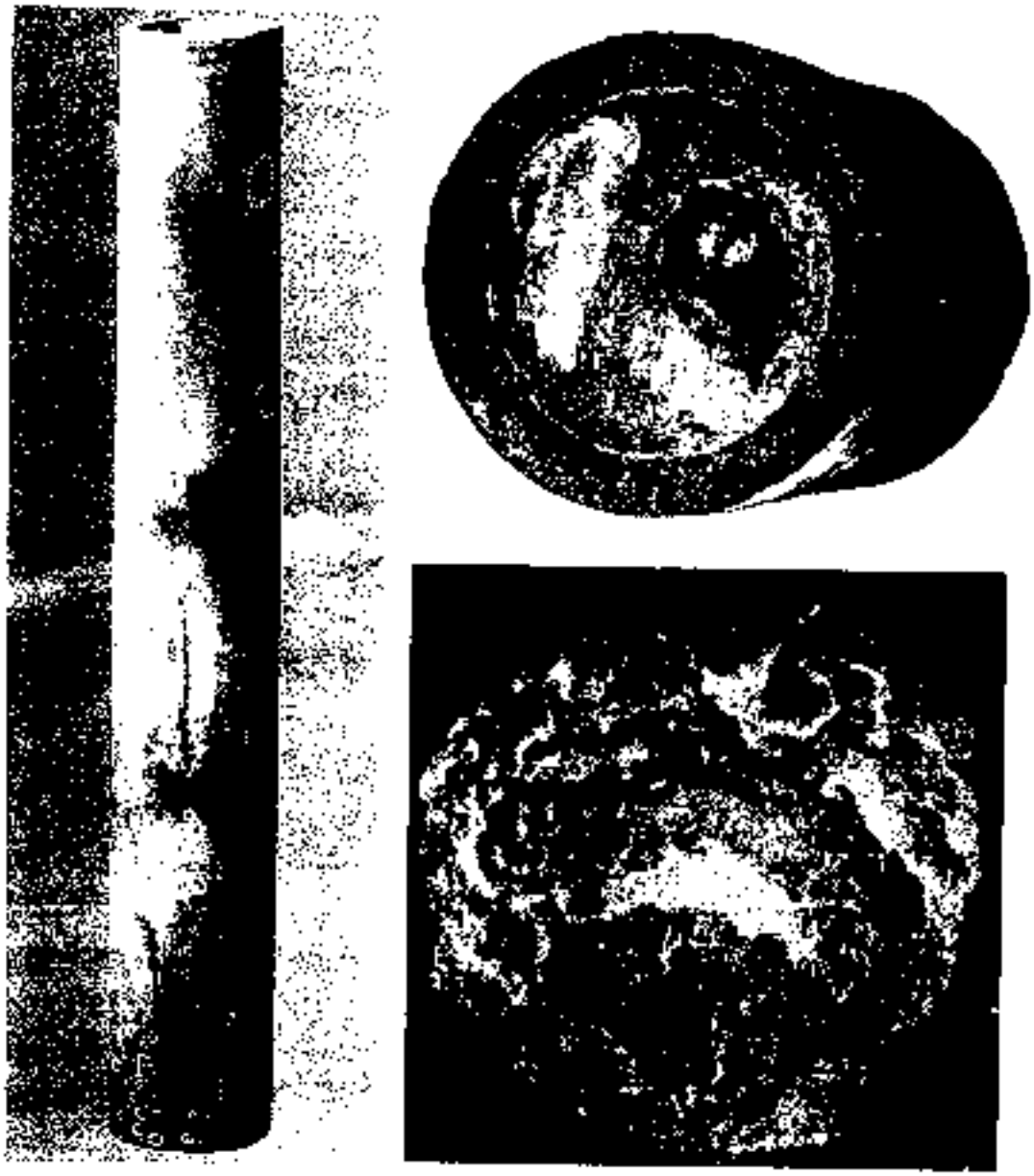
ไซยาไนด์ คาร์บอเนต



รูปที่ 10.32 ต้นเหตุของมลทินในน้ำ เครื่องกังหันไอน้ำ



รูปที่ 10.11 เครื่องกังหันไอน้ำ



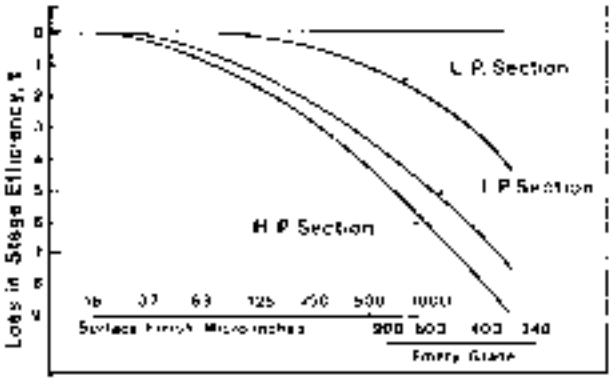
รูปที่ 10.34 คอกรินเกาะจับที่สะสมอยู่ตามใบเข็มที่เกิดจากการพ่นสารและน้ำฝนชะล้าง

10.10.3 ผลของเมฆและหมอก

[illegible]

รูปที่ ๑๐.๑๕ ตะกรันเกาะจับบนใบพัดของเครื่องกังหันไอน้ำเนื่องจากมีการเดือดของ ซึ่งทำให้สมรรถนะของกังหันไอน้ำ

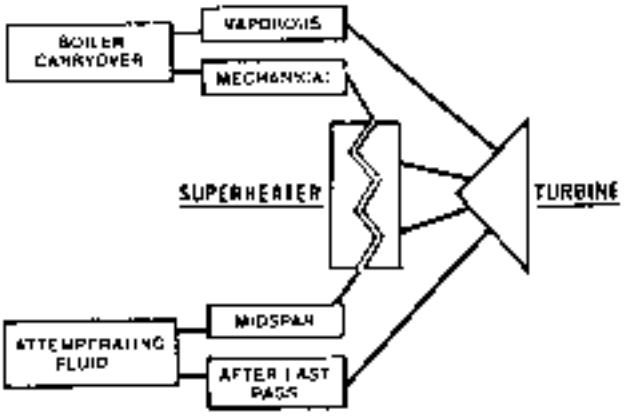
ในเครื่องกังหันไอน้ำ [illegible] ที่มีสารปนเปื้อนในไอน้ำซึ่งจะไปเกิดเป็นตะกรันบน [illegible] ทำให้ประสิทธิภาพ ของเครื่องกังหันไอน้ำลดลง ดังรูปที่ ๑๐.๑๖ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีตะกรันเกาะบนใบพัดมากขึ้น ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันไอน้ำจะลดลงได้ [illegible] ดังนั้น ในการออกแบบ [illegible] จึงต้องทำให้เครื่องกังหันไอน้ำที่ความเร็วสูงเกินกว่า [illegible] ได้



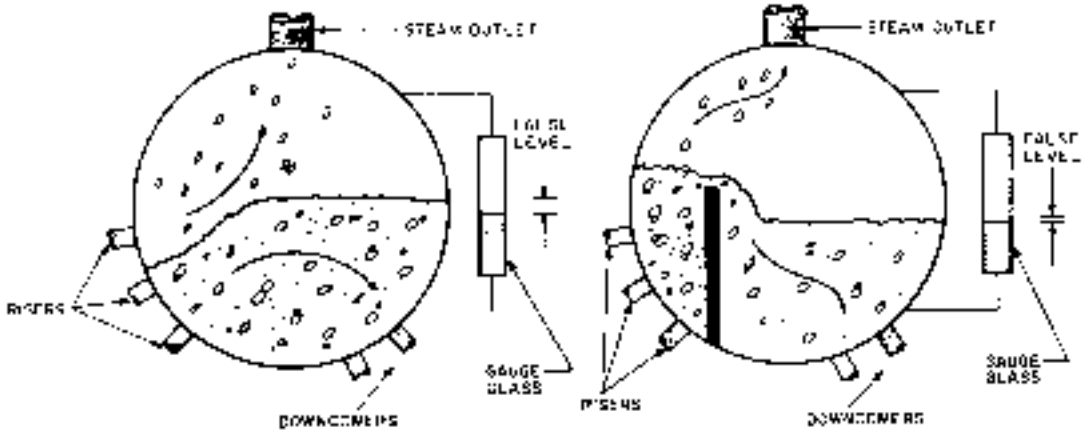
รูปที่ ๑๐.๑๖ ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันไอน้ำลดลงเนื่องจากมีผิวขรุขระ

1 microinch = 0.0000025 mm

ในบางครั้งอาจพบว่าเมื่อผ่านตัวดักไอน้ำแล้วยังมีไอน้ำเปียกหลงเหลืออยู่ ซึ่งมีวิธีแก้ไขโดยการใช้น้ำฉีดเพื่อลดอุณหภูมิไอน้ำ (Desuperheat or Attemperation Water) ก่อนเข้าเครื่องดักไอน้ำ ไอน้ำที่ผ่านเครื่องดักไอน้ำแล้วจะได้ไอน้ำแห้งอิ่มตัว (Saturated Steam) ซึ่งมีปริมาณน้ำเปียกน้อยมาก ดังรูปที่ 10.17 และ 10.18



รูปที่ 10.17 ตัวแหน่งที่ทำให้มีการฉีดน้ำลดอุณหภูมิไอน้ำในเครื่องกังหันไอน้ำ



รูปที่ 10.18 การผสมของน้ำในหม้อไอน้ำในแนวดิ่ง เนื่องจากไม่มีแผ่นกั้นและระดับน้ำที่ต่ำกว่าจะผสมเข้ากันมากกว่าเมื่อมีแผ่นกั้น (ขวา)

10.10.4 สารเคมีสำหรับดักแก๊สโอเวอร์

การผสมของน้ำในหม้อน้ำที่เกิดจากการที่ไม่สามารถแยกไอน้ำออกจากน้ำผสมในหม้อน้ำได้ เนื่องจากมีปัญหาที่ทำให้การแยกไอน้ำออกจากน้ำผสมในหม้อน้ำได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ จะใช้สารเคมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ ๑๐ ปัจจัยที่ทำให้เกิดเครื่องร่อน

การออกแบบปีกเครื่องร่อน	การควบคุมเครื่องร่อน	ปัจจัยทางเคมี
๑. ออกแบบปีกให้มี ขนาดกว้าง ใช้วัสดุที่เบา ความแข็ง ผิวเรียบลื่น	๑. ใช้ความเร็วลมสม่ำเสมอ เพื่อการบินร่อนที่ดีที่สุด ๒. ใช้ความเร็วลมที่เหมาะสม ในการบินร่อนขึ้น	๑. ปฏิกิริยาของ ความเป็นกรด ๒. ความเป็นด่าง ๓. ปฏิกิริยาของ ๔. ความเข้มข้นของ ๕. ปฏิกิริยาของ ๖. ความเข้มข้นของ ๗. ปฏิกิริยาของ ๘. ความเข้มข้นของ ๙. ปฏิกิริยาของ ๑๐. ความเข้มข้นของ ๑๑. ปฏิกิริยาของ ๑๒. ความเข้มข้นของ ๑๓. ปฏิกิริยาของ ๑๔. ความเข้มข้นของ ๑๕. ปฏิกิริยาของ ๑๖. ความเข้มข้นของ ๑๗. ปฏิกิริยาของ ๑๘. ความเข้มข้นของ ๑๙. ปฏิกิริยาของ ๒๐. ความเข้มข้นของ ๒๑. ปฏิกิริยาของ ๒๒. ความเข้มข้นของ ๒๓. ปฏิกิริยาของ ๒๔. ความเข้มข้นของ ๒๕. ปฏิกิริยาของ ๒๖. ความเข้มข้นของ ๒๗. ปฏิกิริยาของ ๒๘. ความเข้มข้นของ ๒๙. ปฏิกิริยาของ ๓๐. ความเข้มข้นของ ๓๑. ปฏิกิริยาของ ๓๒. ความเข้มข้นของ ๓๓. ปฏิกิริยาของ ๓๔. ความเข้มข้นของ ๓๕. ปฏิกิริยาของ ๓๖. ความเข้มข้นของ ๓๗. ปฏิกิริยาของ ๓๘. ความเข้มข้นของ ๓๙. ปฏิกิริยาของ ๔๐. ความเข้มข้นของ ๔๑. ปฏิกิริยาของ ๔๒. ความเข้มข้นของ ๔๓. ปฏิกิริยาของ ๔๔. ความเข้มข้นของ ๔๕. ปฏิกิริยาของ ๔๖. ความเข้มข้นของ ๔๗. ปฏิกิริยาของ ๔๘. ความเข้มข้นของ ๔๙. ปฏิกิริยาของ ๕๐. ความเข้มข้นของ ๕๑. ปฏิกิริยาของ ๕๒. ความเข้มข้นของ ๕๓. ปฏิกิริยาของ ๕๔. ความเข้มข้นของ ๕๕. ปฏิกิริยาของ ๕๖. ความเข้มข้นของ ๕๗. ปฏิกิริยาของ ๕๘. ความเข้มข้นของ ๕๙. ปฏิกิริยาของ ๖๐. ความเข้มข้นของ ๖๑. ปฏิกิริยาของ ๖๒. ความเข้มข้นของ ๖๓. ปฏิกิริยาของ ๖๔. ความเข้มข้นของ ๖๕. ปฏิกิริยาของ ๖๖. ความเข้มข้นของ ๖๗. ปฏิกิริยาของ ๖๘. ความเข้มข้นของ ๖๙. ปฏิกิริยาของ ๗๐. ความเข้มข้นของ ๗๑. ปฏิกิริยาของ ๗๒. ความเข้มข้นของ ๗๓. ปฏิกิริยาของ ๗๔. ความเข้มข้นของ ๗๕. ปฏิกิริยาของ ๗๖. ความเข้มข้นของ ๗๗. ปฏิกิริยาของ ๗๘. ความเข้มข้นของ ๗๙. ปฏิกิริยาของ ๘๐. ความเข้มข้นของ ๘๑. ปฏิกิริยาของ ๘๒. ความเข้มข้นของ ๘๓. ปฏิกิริยาของ ๘๔. ความเข้มข้นของ ๘๕. ปฏิกิริยาของ ๘๖. ความเข้มข้นของ ๘๗. ปฏิกิริยาของ ๘๘. ความเข้มข้นของ ๘๙. ปฏิกิริยาของ ๙๐. ความเข้มข้นของ ๙๑. ปฏิกิริยาของ ๙๒. ความเข้มข้นของ ๙๓. ปฏิกิริยาของ ๙๔. ความเข้มข้นของ ๙๕. ปฏิกิริยาของ ๙๖. ความเข้มข้นของ ๙๗. ปฏิกิริยาของ ๙๘. ความเข้มข้นของ ๙๙. ปฏิกิริยาของ ๑๐๐. ความเข้มข้นของ

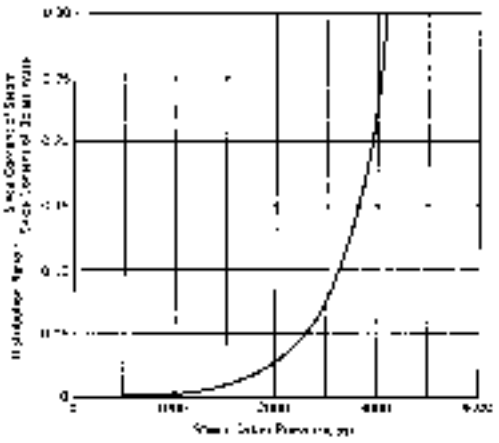
๑. **สาเหตุทางกล** ในการใช้เครื่องยนต์ในการขับเคลื่อนเครื่องร่อน ในขณะที่เครื่องร่อนกำลังเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดการเสียดสีกับอากาศ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ผิวของเครื่องร่อน ความร้อนนี้จะทำให้อุณหภูมิของเครื่องร่อนสูงขึ้น ในขณะที่เครื่องร่อนกำลังบินอยู่ในอากาศ ความร้อนนี้จะถูกพัดพาไปกับกระแสลมที่ไหลผ่านผิวของเครื่องร่อน ทำให้อุณหภูมิของเครื่องร่อนลดลง แต่เมื่อเครื่องร่อนลงจอดแล้ว ความร้อนนี้จะค่อยๆ ถูกถ่ายเทออกไปสู่บรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิของเครื่องร่อนลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิของบรรยากาศ ในขณะที่เครื่องร่อนกำลังบินอยู่ในอากาศ ความร้อนนี้จะถูกพัดพาไปกับกระแสลมที่ไหลผ่านผิวของเครื่องร่อน ทำให้อุณหภูมิของเครื่องร่อนลดลง แต่เมื่อเครื่องร่อนลงจอดแล้ว ความร้อนนี้จะค่อยๆ ถูกถ่ายเทออกไปสู่บรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิของเครื่องร่อนลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิของบรรยากาศ

๒. **สาเหตุทางเคมี** เกิดจากปฏิกิริยาของสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการบินร่อน

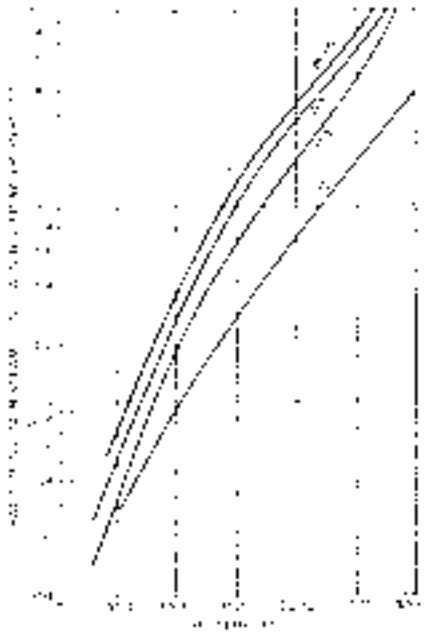
(๑) การกัดกร่อน (Corrosion)

(๒) การทำลายวัสดุของเครื่องร่อน (Material Degradation)

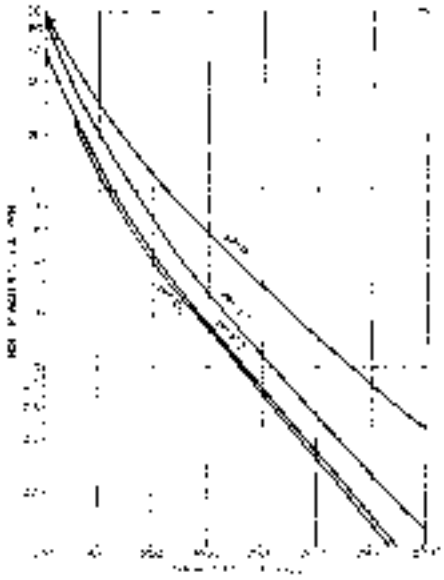
การกัดกร่อน คือ ปรากฏการณ์ที่มีการสึกกร่อนของวัสดุเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ทำให้วัสดุเสื่อมสภาพ การที่น้ำหนักของเครื่องร่อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เครื่องร่อนสูญเสียความสามารถในการบินร่อน การกัดกร่อนของวัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องร่อน ทำให้เครื่องร่อนสูญเสียความสามารถในการบินร่อน



รูปที่ ๑๐.๑๑ ลักษณะการละลายของซิลิกาที่ความดันต่าง ๆ

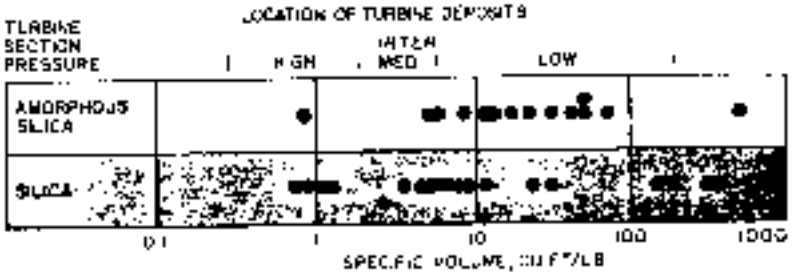


รูปที่ 10.40 ผลของความดันและค่า pH ต่อการละลายของซิลิกาในไอน้ำ



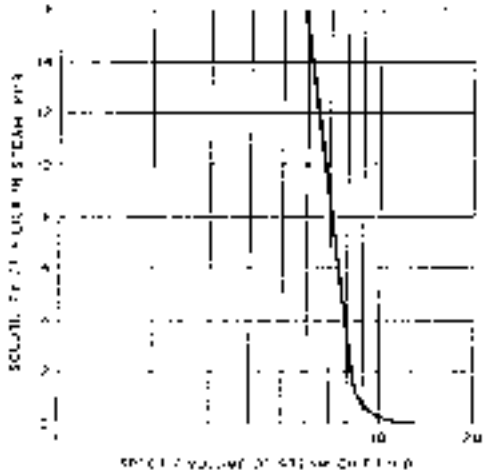
รูปที่ 10.41 ปริมาณซิลิกาที่ควรมีในน้ำหม้อไอน้ำที่ความดันและ pH ต่าง ๆ เพื่อให้ไอน้ำมีซิลิกาอยู่ไม่เกิน 0.02 พีพีเอ็ม

ซิลิกาที่มีอยู่ในน้ำหม้อไอน้ำจะมีแนวโน้มที่จะระเหยปนไปกับไอน้ำ ซิลิกาที่ละลายในไอน้ำนี้จะมีอยู่ในรูปของไอเดียวซิลิกา หรือกรดซิลิสิก ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดตะกรันในหม้อไอน้ำ ปริมาณซิลิกาที่ละลายในไอน้ำจะขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำหม้อไอน้ำ ซิลิกาจะละลายได้ในไอน้ำสูงประมาณ 10 เท่าของการละลายในน้ำ ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมการต้มน้ำให้ระเหยจนแห้งจึงทำให้เกิดตะกรันซิลิกาได้ง่ายกว่าการต้มน้ำให้เดือด ในไอน้ำที่ความดันสูงจะมีซิลิกาละลายอยู่ได้มากกว่าไอน้ำที่ความดันต่ำ ดังนั้นเมื่อไอน้ำแรงดันสูงขยายตัวทำงานในกังหันและสูญเสียความร้อนไป ซิลิกาจะตกตะกอนออกมาเกาะที่ใบกังหัน ทำให้ประสิทธิภาพของกังหันลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณซิลิกาในไอน้ำให้ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดตะกรันเกาะที่ใบกังหัน



รูปที่ 10.42 การตกตะกอนของซิลิกาในเทอร์ไบน์ไอน้ำ

ในรูปที่ ๑๐.๑๒ แสดงค่าของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกาในน้ำร้อน ๆ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำ และความหนืดปานกลางที่ระดับความหนาแน่นของน้ำต่าง ๆ ซึ่งในช่วงนี้ไอน้ำจะมีปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) ประมาณ ๑๐ ลูกบาศก์ฟุต ปกติ รูปที่ ๑๐.๑๑ จะช่วยให้เข้าใจคุณสมบัตินี้ได้ดีขึ้น

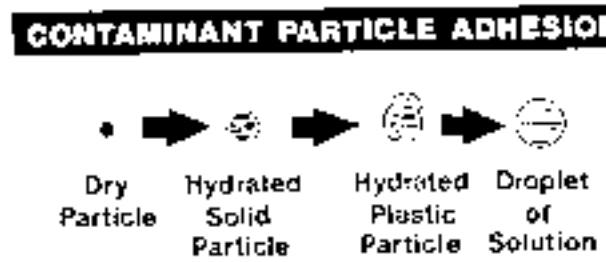


รูปที่ ๑๐.๑๑ การละลายของซิลิกาในไอน้ำ สำหรับสภาวะที่พบในเครื่องกังหันไอน้ำ

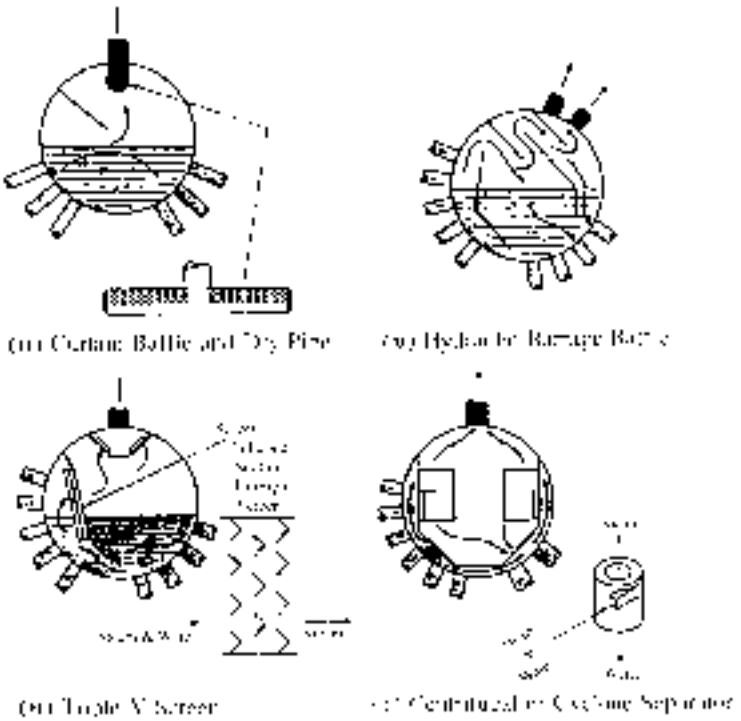
ตะกรันซิลิเกตที่พบในเครื่องกังหันไอน้ำมีอยู่ ๒๐ ชนิด ที่พบมากมีอยู่ในกลุ่มของซิลิเกตที่เป็น อสัณฐาน (Amorphous) ดังที่รูปโครงสร้างในตารางที่

ตารางที่ ๑๐.๔ ตะกรันซิลิเกตที่พบในเครื่องกังหันไอน้ำ

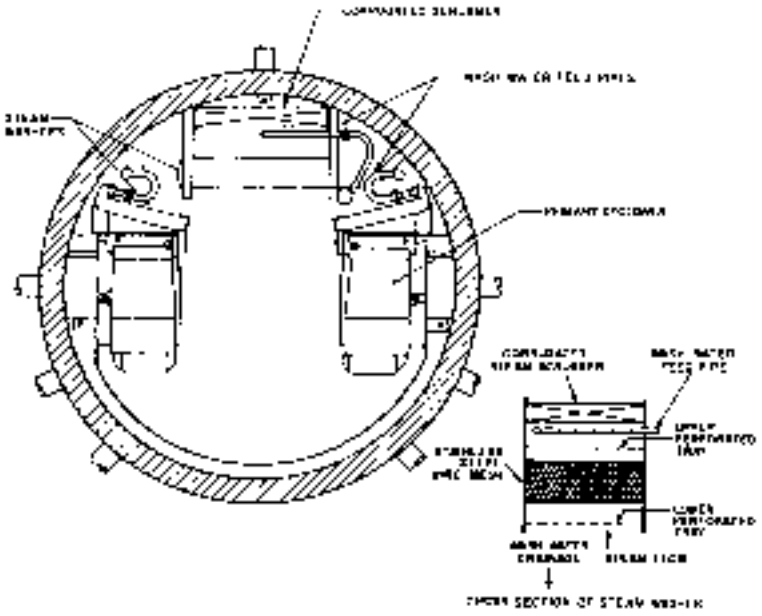
SiO_2	Silica
Na_2SiO_3	Sodium metasilicate
$Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$	Sodium metasilicate pentahydrate
$Na_2SiO_3 \cdot xH_2O$	Sodium metasilicate nonahydrate
$NaAlSiO_4$	Sodium aluminum silicate
$Na_4V_2Si_2O_{11} \cdot xH_2O$	Sodium aluminum silicate hydrate
$Na_2Al_2Si_3O_{10} \cdot SiO_2$	Sodium aluminum silicate silicate
$NaFeSi_2O_6$	Sodium iron silicate
$Na_2[Cl_2(SiO_3)_3]$	Sodium chloro hexa aluminum silicate
$KAlSi_2O_6$	Potassium aluminum silicate
$KNa_3(AlSiO_4)_4$	Potassium sodium aluminum silicate
$Mg_3(OH)_2Si_2O_5$	Magnesium metal hydride silicate
$Mg_2Si_3O_8 \cdot xOH_2$	Magnesium silicate hydrate
$CaSiO_3$	Calcium silicate
$Ca_2Al_2Si_2O_7 \cdot xOH_2$	Calcium aluminum silicate hydrate
$xAl_2O_3 \cdot yNa_2O \cdot zSiO_2 \cdot wH_2O$	Zeolite
$(Fe,Mg)_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Iron magnesium hydroxide silicate
$Na_2Al_2Si_2O_7Al_2O_3$	Sodium aluminum silicate aluminum oxide silicate



รูปที่ 10.44 วิธีการที่อนุภาคในไหน้ำเป็นละอองจริง



รูปที่ 10.45 เครื่องแยกน้ำจากไอน้ำชนิดรูปวีแบบต่าง ๆ



รูปที่ 10.46 แสดงเครื่องแยกน้ำจากไอน้ำชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิในดรัม

10.11 การป้องกันการพาสารและน้ำไปกับไอน้ำ

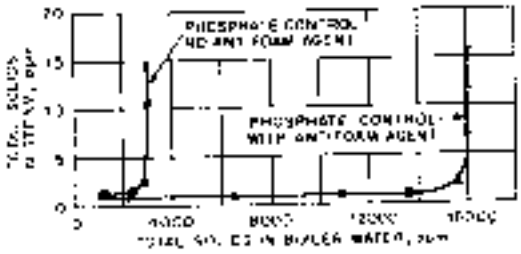
ในปัจจุบันนี้ยังไม่สามารถแยกน้ำออกจากไอน้ำที่ออกแบบมาให้ได้ผลดีและมีความคุ้มค่าในการลงทุนได้ 100% ไอน้ำที่ได้จากหม้อน้ำบางชนิดมีน้ำปนอยู่ 0.05-0.01 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการสำหรับการใช้ไอน้ำดูดอัดเข้าเครื่องจักรกังหันไอน้ำ ดังนั้นจึงต้องการไอน้ำที่มีความชื้นเพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการเกิดละอองน้ำ หลักนี้ใช้ได้กับการใช้งานในช่วงความดันต่ำ 300-1,500 psig เพื่อที่จะไม่ให้มีปัญหาทางด้านซุปเปอร์ฮีทเตอร์และเครื่องกังหันไอน้ำ โดยทั่วไปแล้วผู้ผลิตหม้อไอน้ำจะไม่รับประกันการผลิตไอน้ำที่มีความชื้นต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้งานบางครั้งก็ผลิตไอน้ำได้บริสุทธิ์ขึ้นมากกว่านี้ คือมีความชื้นต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ได้

การป้องกันแคริโอเวอร์ที่เกิดจากสาเหตุทางกลนั้นจะแก้ไขโดยการใช้ดรัมที่มีขนาดใหญ่พอและติดตั้งเครื่องแยกน้ำออกจากไอน้ำไว้ภายในดรัมด้วย ทั้งนี้เพราะความดันต่ำกว่า 300 psig การแยกน้ำออกจากไอน้ำจะเกิดขึ้นโดยอาศัยความหนาแน่นของโลก เพราะน้ำกับไอน้ำมีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก เช่น ที่ความดัน 900 psig และอุณหภูมิอิ่มตัว ความหนาแน่นของน้ำจะมีมากกว่าไอน้ำ 115 เท่า แต่เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นเท่าใดความแตกต่างของความหนาแน่นนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว เช่น ที่ 1,000 psig ความหนาแน่นของน้ำจะมากกว่าไอน้ำเพียง 80 เท่า ดังนั้น แรงที่จะทำให้เกิดการแยกตัวจะลดลง 30% ทุกๆ 200 psig จึงทำให้สารละลายน้ำติดไปกับไอน้ำที่ความดันสูงได้ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ต้องใช้เครื่องแยกน้ำออกจากไอน้ำ (Separator) ซึ่งมี 2 แบบคือ Primary Separator และ Secondary Separator

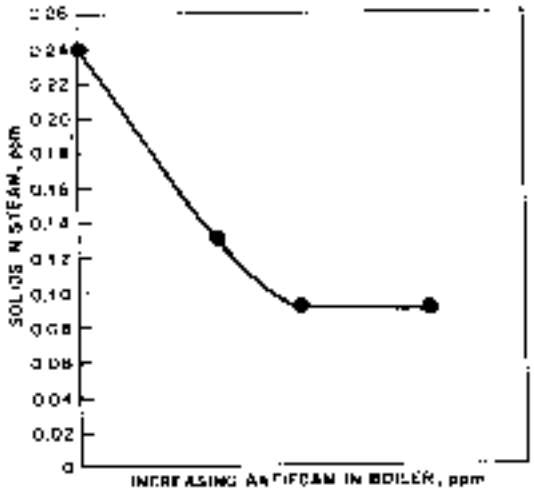
การป้องกันแคริโอเวอร์ที่เกิดจากสาเหตุทางเคมีนั้นต้องขจัดความกระด้าง ซิลิกา และน้ำมันในน้ำหม้อไอน้ำให้หมดไป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตารางที่ 10.10 ค่าความกระ

ในน้ำจะทำให้เกิดฟอง ที่จะขึ้นมาบนผิวน้ำที่ระดับของน้ำ ทำให้ผิวน้ำมีการปั่นป่วน ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำเนื่องจากสิ่งเจือปนน้ำเดือด หรือการเพิ่มของความชื้นในไอน้ำ สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดฟองน้ำ และมีการกำจัดน้ำเสียออกที่ส่วนของผิวน้ำด้านล่างมีผลกับสิ่งสกปรกที่ลอยอยู่ด้านบนผิวน้ำ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมากขึ้น การที่น้ำจะมีไอน้ำมีสารละลายอยู่มากจะทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ซึ่งมีผลในการสูญเสียน้ำหรือเพิ่มขึ้นก็ได้ แต่ก็จะมีการสูญเสียมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับ ชนิดของน้ำที่ใช้ ส่วนใหญ่ สารที่ใช้ในการกำจัดฟองน้ำ ก็จะมีการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิว (Surface Tension) ซึ่งจะทำให้เกิดโฟมได้ง่ายขึ้น สารที่ใช้ในการกำจัดฟองน้ำ ได้แก่ สารซิลิโคน (Silicones) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นน้ำมัน ซึ่งจะไม่ละลายน้ำ ทำให้น้ำมีการสิ้นเปลืองน้ำ ซึ่งจะเป็นการทำให้เกิดฟองน้ำมากขึ้น และมีการสูญเสียน้ำมากขึ้น ซึ่งฟองเหล่านี้จะลอยตัวขึ้นมาที่ผิวน้ำ และจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ฟองน้ำแตกได้ง่าย สารกำจัดฟองน้ำจะมีลักษณะเป็นสารจำพวก Surface Active Agents ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ สารจำพวก Silicones, Aliphatic Amino Compounds, Polyamides, Polyoxy Chemicals, Polyglycol, Polymerized Esters และ Alcohol ให้มีสารชื่อนี้ทำนี้ Silicone Oil, Polyoxyalkyleneglycols, Polypropyleneglycol-ethylene oxide, Amine-ethylene oxide Addition Products, Ethydroxypolyalkylene Ethers of Alkylenediols, Unsaturated Diacylated Polyamines, Formaldehyde amide Condensation Products, Wetting Agent - Isomyl Alcohol, Diamide of Ethylene Diamine, Diamide of Diethylenetriamine, Distearoyl Amide of Dibasic Acid, Distearoyl Amide of Alkylenediamine เป็นต้น

การใช้สารกำจัดฟองจะทำให้น้ำโมเลกุลของน้ำมีการรวมตัวกันแน่นขึ้น ไอน้ำจะมีน้ำติดไปกับไอน้ำน้อยลง หรือต้องระบายน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 10.41 สารกำจัดฟองจะทำให้น้ำในหม้อไอน้ำมีสารละลายอยู่ได้มากขึ้น โดย ไอ.ทิคเคอริอเกร์



รูปที่ 10.42 ผลการเพิ่มปริมาณสารกำจัดฟองจะทำให้ความเข้มข้นของปริมาณสาร ของไอน้ำ

10.12 การป้องกันตะกรันกาะจับในเครื่องกังหันไอน้ำโดยใช้สารเคมี

10.13 การวัดความบริสุทธิ์ของไอน้ำ

ตารางที่ 10.7 แนวโน้มการเกิดตะกรันเกาะจับ

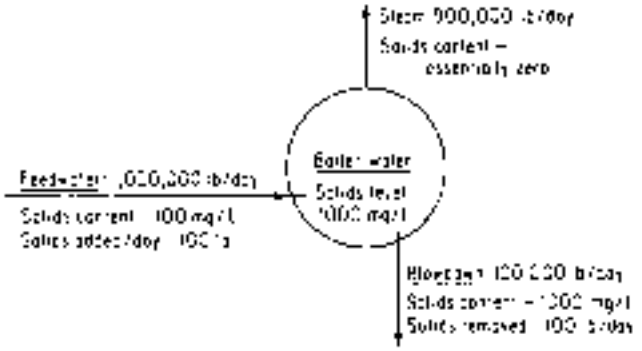
โซเดียม (Na) ที่ทนได้	เกิดตะกรันเกาะจับในเครื่องกังหันไอน้ำ	เกิดตะกรันเกาะจับในซุปเปอร์ฮีทเตอร์
[illegible]	ไม่มีเลย	ไม่มีเลย
[illegible]	[illegible]	ไม่มีเลย
[illegible]	มีบ้าง	[illegible]
[illegible]	มาก	มาก

การวัดปริมาณโซเดียมในไอน้ำนิยมใช้เครื่องมือ 2 ชนิด คือ

1. Sodium Ion Analyzer
2. Sodium Flame Spectrophotometry

10.14 การระบายน้ำทิ้ง (Blowdown)

[illegible] ดังกล่าวแล้วในข้อ 10.13 ว่าน้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำนั้นจะต้องมีการระเหยเป็นไอน้ำ ทำให้ของแข็งละลายน้ำในหม้อไอน้ำมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ของแข็งละลายน้ำมีความเข้มข้นสูงเกินไป จนเกิดตะกรันเกาะจับที่ผิวท่อน้ำ และเกิดฟองน้ำขึ้นในหม้อไอน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการระบายน้ำทิ้งออกจากหม้อไอน้ำเพื่อควบคุมความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำในหม้อไอน้ำ ดังรูปที่ 10.29 ปริมาณการระบายน้ำทิ้งที่ใช้ในหม้อไอน้ำที่จะกล่าวต่อไปนี้



รูปที่ 10.29 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำและสารเข้าและออกจากหม้อไอน้ำ

10.15 อัตราส่วนของความเข้มข้น (Cycle of Concentration)

[illegible] ดังกล่าวแล้วในข้อ 10.13 ว่าน้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำนั้นจะต้องมีการระเหยเป็นไอน้ำ ทำให้ของแข็งละลายน้ำในหม้อไอน้ำมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ของแข็งละลายน้ำมีความเข้มข้นสูงเกินไป จนเกิดตะกรันเกาะจับที่ผิวท่อน้ำ และเกิดฟองน้ำขึ้นในหม้อไอน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการระบายน้ำทิ้งออกจากหม้อไอน้ำเพื่อควบคุมความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำในหม้อไอน้ำ ดังรูปที่ 10.29 ปริมาณการระบายน้ำทิ้งที่ใช้ในหม้อไอน้ำที่จะกล่าวต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ ๑๑.๑ ถ้าหม้อน้ำเดินมีสิ่งต่างๆ ดังนี้ในหม้อน้ำตัวนี้

ซิลิกา	๑๕๐	พีพีเอ็ม
ของแข็งแขวนลอย (SS)	๑๐๐	พีพีเอ็ม
สารละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	๑,๐๐๒	พีพีเอ็ม
และน้ำหม้อน้ำตัวนี้มีคุณภาพดังนี้		
ซิลิกา	๒.๐	พีพีเอ็ม
ของแข็งแขวนลอย	๐.๗	พีพีเอ็ม
สารละลายน้ำทั้งหมด	๑๐๕	พีพีเอ็ม

ปัญจักรของความเข้มข้น = ปริมาณของสารชนิดหนึ่งในหม้อน้ำ / ปริมาณของสารนั้นในน้ำหม้อ

ปัญจักรของซิลิกา = ๑๕๐ / ๘.๙ = ๑๖.๘๕

ปัญจักรของของแข็งแขวนลอย = ๑๐๐ / ๐.๗ = ๑๔๒.๘๖

ปัญจักรของความเข้มข้นของสารละลายน้ำทั้งหมด = ๑,๐๐๐ / ๑๐๕ = ๙.๕๒

เมื่อเราคำนวณปัญจักรของความเข้มข้นทั้งสามค่านี้ ค่าที่มีค่าต่ำสุดในการใช้งานต่อเนื่องได้นานที่สุดคือ ๙.๕๒ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณต่อไป ในกรณีนี้ค่าปัญจักรของความเข้มข้นของสารละลายทั้งหมดเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขการใช้งานต่อไป ในกรณีนี้ค่าปัญจักรของความเข้มข้นของสารละลายทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็น ๙.๕๒ ซึ่งเป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการคำนวณต่อๆ ไป ที่เกี่ยวกับการระบายน้ำทิ้ง และปัญจักรของความเข้มข้นนี้ใช้ค่าต่างๆ ของน้ำเลี้ยงหม้อน้ำเพิ่มได้เรื่อยๆ ถ้าหากน้ำรอบสุดท้ายสะอาดแล้ว ค่าต่างๆ ในน้ำเลี้ยงก็จะมากขึ้นเรื่อยๆ

กำหนดให้

B = ปริมาณน้ำที่ระบายทิ้ง

F = ปริมาณน้ำเลี้ยง (Feed Water)

f = ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารนั้นในน้ำเลี้ยง

b = ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารนั้นในหม้อน้ำ

K = แอร์เรียนต์การระบายน้ำทิ้ง (ร้อยละ)

CC = ปัญจักรของความเข้มข้น

แอร์เรียนต์การระบายน้ำทิ้ง = ปริมาณน้ำที่ระบายทิ้ง / ปริมาณน้ำเลี้ยง × ๑๐๐

$$K = \frac{100\ B}{F}$$

ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารที่ทำให้เกิดและความเข้มข้นในน้ำการระบายน้ำทิ้ง

$$\text{ค่าคลอรีนตกค้างในน้ำ} = \frac{\text{ปริมาณคลอรีนที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำที่ใช้}}$$

$$\frac{\text{ปริมาณคลอรีนที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำที่ใช้}} = \frac{\text{ปริมาณคลอรีนตกค้างในน้ำ}}{\text{ปริมาณน้ำที่ใช้}}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad K = \frac{\text{ปริมาณคลอรีนที่ใช้}}{b}$$

ในการคำนวณหาปริมาณการระบายน้ำทิ้งนั้น นิยมใช้ปริมาณคลอรีนในน้ำเสียและน้ำที่ใช้ไปแล้วเป็นหลักในการคำนวณ เพราะการวิเคราะห์หาค่าคลอรีนนั้นให้ผลแม่นยำและถูกต้องกว่า และจะใช้ค่าอื่น ๆ เช่น อัลคาไลนิตี หรือความกระด้างมาใช้ร่วมด้วยไม่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาของคลอรีนกับน้ำเสียนั้นมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง

$$\text{การระบายน้ำทิ้ง} = \frac{\text{ปริมาณคลอรีนในน้ำเสีย}}{\text{ปริมาณคลอรีนตกค้างในน้ำที่ใช้ไปแล้ว}} \times 100$$

และ $B = \frac{P}{CC} \times K = \frac{100}{CC}$

เมื่อ CC คือ ความเข้มข้นของคลอรีนตกค้างในน้ำที่ใช้ไปแล้ว

$$CC = \frac{\text{ปริมาณคลอรีนในน้ำที่ใช้ไปแล้ว}}{\text{ปริมาณน้ำที่ใช้ไปแล้ว}}$$

การใช้คลอรีนในการคำนวณเพื่อหาการระบายน้ำทิ้งนี้ มีข้อจำกัดอยู่บางประการ คือ ปริมาณคลอรีนในน้ำเสียต่ำกว่าในช่วง 0.5–1.0 พีพีเอ็มแล้ว ความผิดพลาดที่เกิดจากการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนที่ตกค้างจะมีมากขึ้น ทำให้การคำนวณหาปริมาณการระบายน้ำทิ้งมีความคลาดเคลื่อนได้มาก

10.10 การหาปริมาณการระบายน้ำทิ้งจากกราฟ

วิธีการต่อไปนี้เป็นการหาปริมาณน้ำการระบายทิ้งแบบต่อเนื่อง (Continuous Blowdown) จากกราฟที่ได้จากการทดลอง

ให้ C = ปริมาณน้ำที่มีคลอรีนตกค้างในน้ำหมุนเวียนและน้ำที่ใช้ไปแล้ว มีหน่วยเป็น ppm

B = ปริมาณการระบายน้ำทิ้งต่อชั่วโมงของน้ำหมุนเวียน มีหน่วยเป็น ลบ.ม./ชั่วโมง

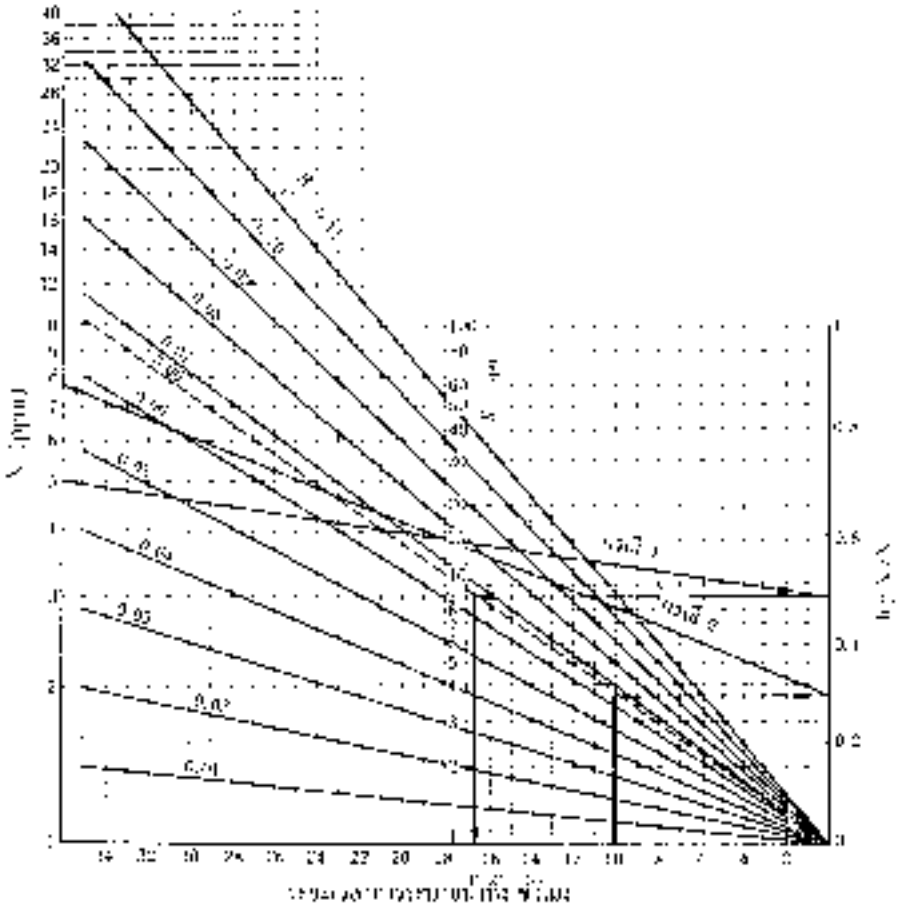
t = ระยะเวลาที่ใช้ในการระบายน้ำทิ้ง หน่วย ชั่วโมง

X_t = ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารเจือปนที่ต้องการกำจัดในน้ำหมุนเวียนที่ใช้ในหม้อไอน้ำหลังจากระบายน้ำทิ้งไปแล้วเป็นระยะเวลา t ชั่วโมง

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการระบายทิ้ง ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจากการระบายน้ำทิ้ง และระยะเวลาการระบายน้ำทิ้งจะเป็นไปตามสมการ

$$X_t = X_0 e^{-\frac{Bt}{V}}$$

ในเมื่อ e = Natural Logarithm



รูปที่ 13.10 กราฟหาความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำหม้อไอน้ำและระยะเวลาการระบายน้ำทิ้ง

ตัวอย่างที่ 13.2 หม้อไอน้ำลูกหนึ่งมีความจุน้ำประมาณ 45 ตัน มีการระบายน้ำทิ้งต่อเนื่องวันละ 3 ตัน ถ้าป้อนน้ำที่มีคลอไรด์ 15 พีพีเอ็ม

กรณีที่ 1 ถ้าต้องการให้น้ำในหม้อไอน้ำมีคลอไรด์ไม่เกิน 45 พีพีเอ็ม จะต้องระบายน้ำทิ้งเป็นระยะเวลานานเท่าใด ?

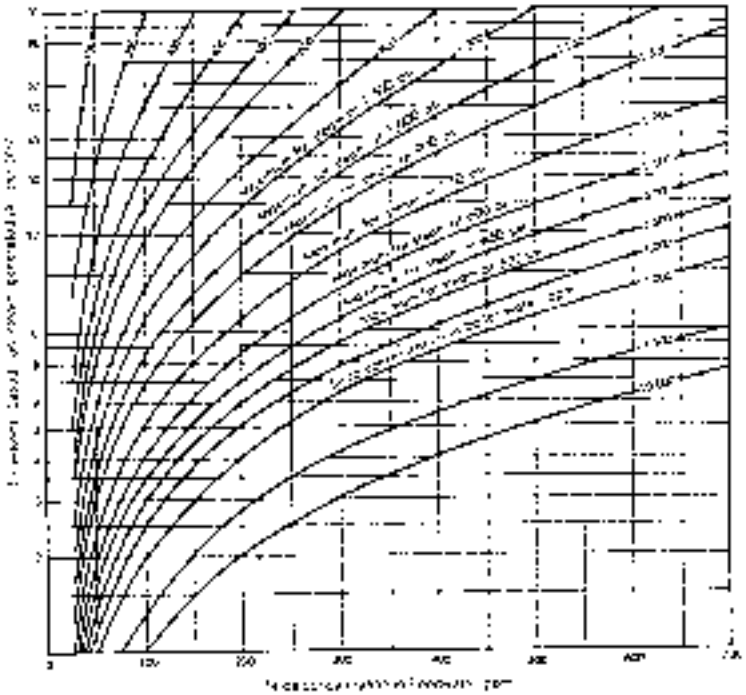
กรณีที่ 2 ถ้าหม้อไอน้ำมีคลอไรด์อยู่ 35 พีพีเอ็ม และมีการระบายน้ำทิ้งนาน 10 ชั่วโมง จะมีคลอไรด์เหลืออยู่ในน้ำหม้อไอน้ำเท่าใด ?

วิธีทำ 1. หาค่า $\frac{B}{C} = \frac{3}{45} = 0.067$

2. จากกราฟในรูปที่ 13.10 จะพบว่าเส้น $\frac{B}{C}$ ที่ใกล้ๆ อยู่เส้น 0.05 และเส้นประที่มีค่า $\frac{B}{C} = 0.067$

3. *กรณีที่ 1* จากค่า $X_1 = 5$ พีพีเอ็ม ลากเส้นตรงมาตัดกับเส้นที่มีค่า $X_2 = 45$ พีพีเอ็ม เส้นในแนวนอน ตรงกับตัวเลขแถวล่างที่บอกค่า $\text{Log}\ \frac{X_1}{X_2}$ จากจุดตัดนี้ลากเส้นตรงมาทางซ้ายมือจนตัดกับเส้นประ ($\frac{B}{C} = 0.067$) จากจุดตัดในแนวตั้งตรงกับตัวเลขแถวล่างสุด จะได้ค่า $t = 3.6$ ชั่วโมง ดังนั้น ถ้าระบายน้ำทิ้ง 3 ตันต่อชั่วโมง ติดต่อกันเป็นระยะเวลา 10.8 ชั่วโมง จึงจะลดปริมาณคลอไรด์ในน้ำหม้อไอน้ำจาก 15 พีพีเอ็ม เป็น 5 พีพีเอ็มได้

ง. ตัวอย่างที่ ๒ จงหาค่าของอัตราการระบายน้ำทิ้งที่ดูด ๑๕ ซม. ของท่อระบายน้ำใต้ดินที่ลึก ๑๐ ม. ซึ่งวางอยู่ในชั้นดินเหนียวปนทราย ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนือและใต้ท่อเท่ากับ ๐.๐๐๑๕ ซม./วินาที และ ๐.๐๐๒๕ ซม./วินาที ตามลำดับ ระยะห่างของท่อเท่ากับ ๓๐ ม. ความลึกของน้ำในท่อ X_1 = ๑.๕ ม. ความลึกของน้ำใต้ท่อ X_2 = ๗.๐ ม. ดังนั้น หน้าตัดของการไหลเข้าท่อทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ ๑๐ ม. น้ำหนักไหลเข้าท่อจะมีค่าเท่ากับ ๑๐ ซม./วินาที



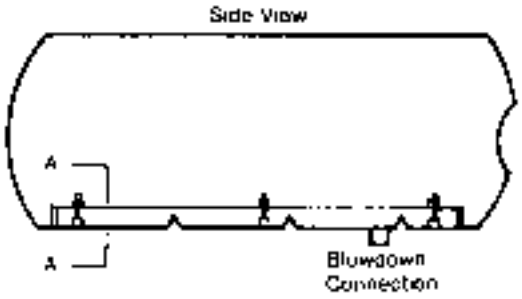
รูปที่ ๑๐.๑๐ กราฟอิสราการระบายน้ำทิ้งโดยใช้วิธีกราฟิกแก้ปัญหา

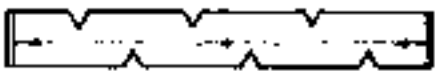
๑๐.๑๗ วิธีการระบายน้ำทิ้ง (Drainage Methods)

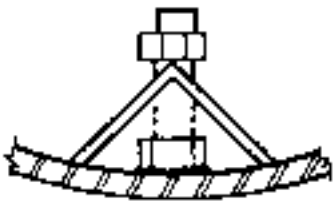
๑. การระบายน้ำทิ้งแบบครั้งคราว (Natural Drainage)

๒. การระบายน้ำทิ้งแบบต่อเนื่อง (Continuous Drainage)

๑. **แบบครั้งคราว** วิธีการระบายน้ำทิ้งแบบนี้ใช้กับพื้นที่ที่มีน้ำขังเป็นครั้งคราว ซึ่งน้ำที่ขังนี้ส่วนใหญ่เกิดจากน้ำฝนที่ตกลงมาในบริเวณนั้น ๆ ในขณะที่ฝนตกหนักหรือตกติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ ทำให้ดินในบริเวณนั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ ไม่สามารถรับน้ำฝนที่ตกลงมาได้ทัน จึงทำให้เกิดน้ำขังเป็นแอ่งหรือบริเวณที่ลุ่มต่ำ ๆ ในบริเวณนั้น ๆ ดังนั้น การระบายน้ำทิ้งแบบนี้จึงเป็นการระบายน้ำที่ขังในบริเวณที่ลุ่มต่ำ ๆ ดังกล่าวนี้ออกไป ซึ่งอาจจะทำได้โดยการขุดร่องระบายน้ำเปิดหรือวางท่อระบายน้ำใต้ดินก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความประหยัดเป็นสำคัญ ในการขุดร่องระบายน้ำเปิดนั้น ก้นร่องจะต้องลึกกว่าระดับน้ำใต้ดินเดิมประมาณ ๑ เมตร ขึ้นไป ส่วนการวางท่อระบายน้ำใต้ดินนั้น ก้นท่อจะต้องอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินเดิมประมาณ ๑.๕ เมตร ขึ้นไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่ปลูกด้วย ถ้าเป็นพืชที่ทนต่อน้ำขังได้ดี ก็อาจจะวางท่อระบายน้ำใต้ดินให้ตื้นกว่าพืชที่ไม่ทนต่อน้ำขังได้ดี หรือจะขุดร่องระบายน้ำเปิดให้ตื้นกว่าก็ได้ ทั้งนี้เพื่อให้พืชที่ปลูกสามารถเจริญเติบโตได้ดี





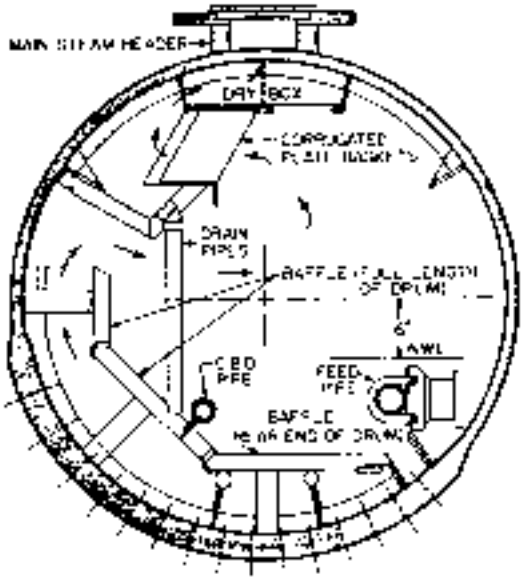


Diameter of Blowdown Line (in.)	Dimensions of Angle Iron (in.)	No. of Notches	Altitude of Notches (in.)
1	2 x 2 x 1/4	8	0.625
1½	3 x 3 x 1/4	8	0.875
2	4 x 4 x 3/8	8	1.125
2½	5 x 5 x 3/8	8	1.375
3	6 x 6 x 3/8	8	1.75
3½	7 x 7 x 1/2	8	2.00
4	8 x 8 x 1/2	8	2.25

1. The above table shows the recommended size angle iron for a given diameter of blowdown line.
2. Size the length of the angle iron to extend the total side length of the mud drum, so it extends across the tube bank.
3. Fit the ends of the angle iron with ¼ inch plates shaped to the curvature of the drum.
4. The tables also show the number of equilateral triangular notches and altitude of these notches.
5. Provide each end plate with one notch, and stagger the balance of the notches equidistantly on either side of the angle iron.
6. The angle iron should be bolted to the base of the mud drum and the bolts should be welded to the shell.

รูปที่ ๑๐.๑๐ การออกแบบเหล็กฉากสำหรับรองรับท่อระบายน้ำทิ้งของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ

๒. **แบบต่อเนื่อง** เป็นการระบายน้ำทิ้งแบบต่อเนื่อง วิธีการนี้ใช้กับโรงงานประเภทที่มีการผลิตแบบต่อเนื่อง ระบายน้ำทิ้งเป็นครั้งคราว ตัวอย่างได้แก่ การระบายน้ำทิ้งจากหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งมีการระบายน้ำทิ้งออกสม่ำเสมอ สิ่งต่อไปนี้ เป็นต้น วิธีการควบคุมมีตั้งแต่ใช้วาล์วปรับด้วยมือ ไปจนถึงระบบที่มีการควบคุมอัตโนมัติ ระบบต่อเนื่องนี้ใช้ได้ดีกับการระบายน้ำทิ้งที่มีปริมาณมาก และความต้องการที่จะลดปริมาณการสูญเสียความร้อนให้น้อยที่สุด ซึ่งจะไม่เหมาะกับการระบายน้ำทิ้งอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 10.33 แสดงตำแหน่งของการระบายน้ำทิ้งอย่างต่อเนื่องภายในหม้อ

10.18 การประหยัดพลังงานในการระบายน้ำทิ้ง

การระบายน้ำทิ้งเป็นครั้งคราวนั้นทำในเวลาสั้นๆ ในประหยัดพลังงาน ดูจากน้ำที่ระบายน้ำทิ้งจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา การใช้วาล์วปรับด้วยมือจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปโดยไม่จำเป็น ดังนี้

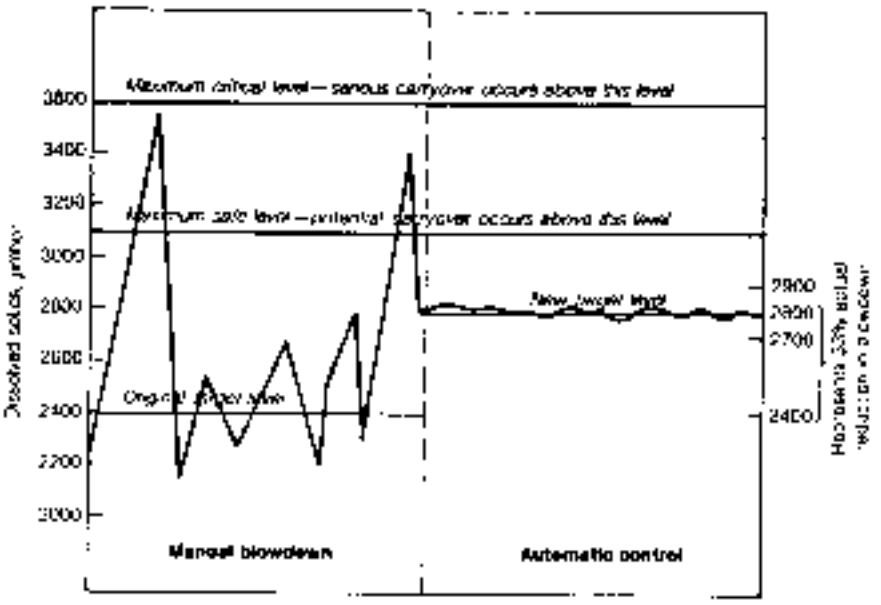
๑. เลือกใช้เชื้อเพลิงที่เหมาะสม

๒. เพิ่มการใช้ประโยชน์จากความร้อนที่ใช้ในการระบายน้ำทิ้งให้มากขึ้น

๓. เรียกค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในกรณีที่ต้องเติมน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำมากเกินไป

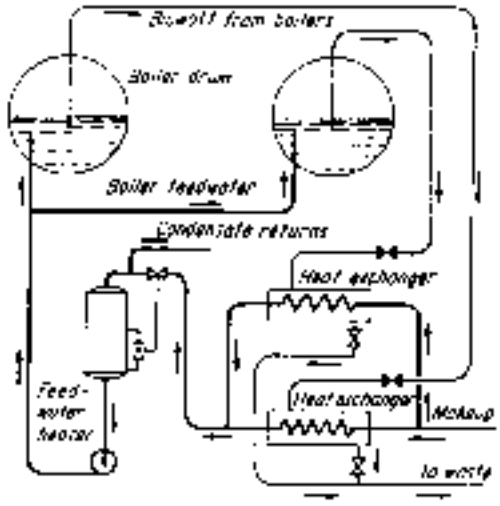
๔. มีน้ำสำหรับหม้อไอน้ำที่ต้องการอย่างเพียงพอ

จุดประสงค์หลักในการระบายน้ำทิ้งก็เพื่อควบคุมระดับของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TDS) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ โดยการใช้เครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (ค่าการ-) ควบคุมวาล์วปรับด้วยมือ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนได้ ดังแสดงในรูปที่ ๑๐.๓๔ ซึ่งจะต้องมีการควบคุมพลังงานที่จะสูญเสียไปกับน้ำ

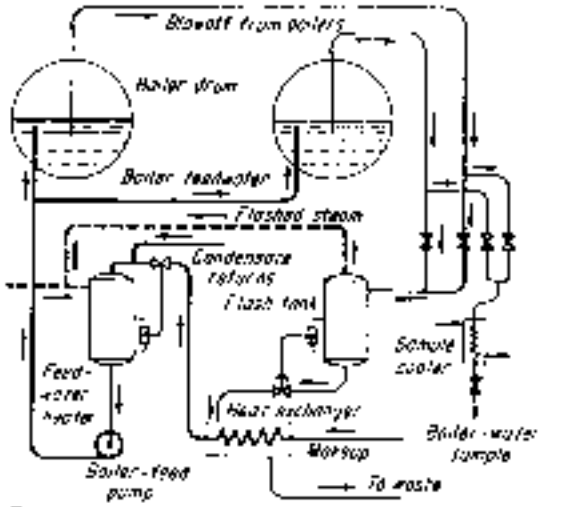


รูปที่ 10.54 ระบบอัตโนมัติจะช่วยให้ระดับริกาพการระบายน้ำทิ้งสูงขึ้น

ในปัจจุบันนี้ มีหลายบริษัทที่ได้ทำการออกแบบระบบระบายน้ำทิ้งแบบอัตโนมัติขึ้นมาใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ของการควบคุมการทำงาน ซึ่งมีทั้งแบบธรรมดาและชับซ้อน ขึ้นกับความต้องการที่จะนำความร้อนที่อยู่ในน้ำทิ้งนี้มาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด โดยให้น้ำที่ระบายทิ้งนี้ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เพื่ออุ่นน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ หรือไม่ก็ผ่านเข้าไปยัง Flash Tank เพื่อให้ได้ไอน้ำออกมาจำนวนหนึ่งซึ่งนำกลับไปใช้งานได้อีก

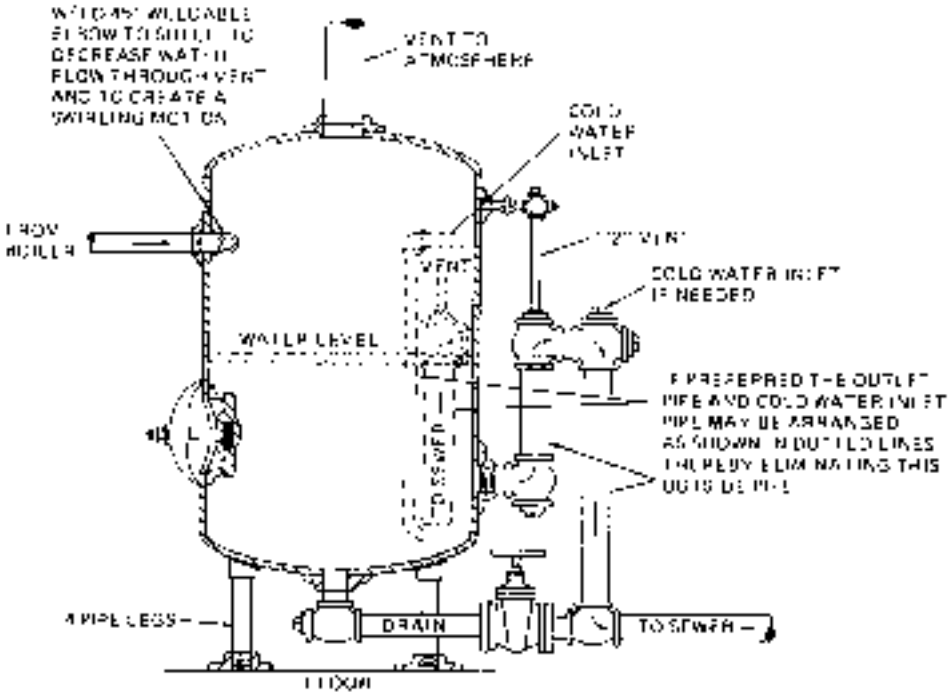


Continuous blowdown rate from each boiler is individually controlled. Heat is recovered in makeup line to feedwater heater. Generally applied to low-pressure boilers with small capacity.



Flash tank receives controlled amounts of blowdown from one or more boilers and produces flashed steam for feedwater heating. System is used where amount of blowdown may be substantial.

รูปที่ 10.55 การประหยัดพลังงานในการระบายน้ำทิ้ง (ก) โดยการนำความร้อนในน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (ข) โดยการผลิตไอน้ำขึ้นมาใช้ใหม่



รูปที่ ๑๐.๑๐ ข้อพิจารณาในการออกแบบถังเก็บ

บรรณานุกรม

1. Betz Handbook of Industrial Water Conditioning. 8th ed. Trevose : Betz Laboratories, 1980.
2. Blake, R.T. Water Treatment for HVAC and Potable Water Systems. New York : McGraw-Hill Book Co., 1986.
3. Brandwell, D.C. Water Treatment Industrial and Municipal. New York : Vantage Press, 1976.
4. Brayman, J.I. Corrosion Inhibitors. New York : The Macmillan Co., 1963.
5. Cunningham, G.W. "Effective Water Treatment : Proper Selection and Control Offers Saving." Paper Technology and Industry (April 1987).
6. Dorman, W.L. "Foaming in Boilers." Industrial and Engineering Chemistry (May 1964).
7. Drew. Principles of Industrial Water Treatment. New Jersey : Drew Chemical Corporation, 1977.
8. Fielden, T.R. "Recent Developments in Boiler Water Treatments." Effluent and Water Treatment Journal (July 1987).
9. Gilcreas, F. "Reversion of Molecularly Dehydrated Sodium Phosphates." Industrial and Engineering Chemistry (August 1956).
10. Rammler, P. Jackson, J. and Thurston, E.F. Industrial Water Treatment Practice. London : Butterworths & Co(Publishers), 1961.
11. Hatch, G.G. and Rice, O. "Corrosion Control and Scale Prevention with Glassy Phosphate." Industrial and Engineering Chemistry (August 1944).
12. Hendrix, W.A. and Hayes, G.H. "Conserving Boiler Energy." Chemical Engineering. (December 31, 1979).
13. Herman, K.W. Cause and Cures of Waterside Problems in Industrial Boiler Systems. U.S.A. : Drew Chemical Corporation.
14. Hicks, K.W. "Coping with Steam-Loop Impurities." Power (April 1990).
15. Hollands, H.E. "Boiler Water Conditioning : Reduction of Blowdown." Paper Technology and Industry (April 1986).
16. Howe, R.H.L. "Boiler Water Control for Efficient Steam Production." Chemical Engineering (February 24, 1975).

7. Japan Boiler Association. Lectures on Boiler Water Treatment. Vol. 1: Boiler Water Management. Tokyo: Kyoritsu Shuppan Co., 1977.

19. Jones, O. "Turbine Steam Purity." Combustion (December 1956).

20. Kemmer, F.N. The NALCO Water Handbook. McGraw-Hill Book Co., 1979.

20. Kurita Water Treatment Manual. Japan: Kurita Water Industries, 1978.

21. Lesser, M.A. Modern Chemical Specialties. New York: McLaurin-Jones Co., 1961.

22. Lewis, G. "Analysis of Boiler Deposits; Why They Form, How to Prevent Them." Pulp & Paper (October 1970).

23. Maddocks, A.G. "Boiler and Cooling Water Treatment." Effluent and Water Treatment Journal (April 1979).

24. McCoy, J.W. The Chemical Treatment of Boiler Water. New York: Chemical Publishing, 1981.

25. McWilliam, J.D. "Control of Iron and Copper Deposits in Modern High Pressure Boilers." Pulp and Paper Magazine of Canada (November 1961).

26. Metcalf, E.R., and Moore, R.C. "Relate Boiler Water Treatment to More Efficient Heat Transfer and Boiler Blowdown Rates." TAPPI (July 1976).

27. Moore, W.G., and Hayes, G.L. "Boiler Heat Recovery." Chemical Engineering (December 6, 1976).

28. Moore, J.E. "Consider Polymers for Control of Iron Oxide Deposition." Power (January 1982).

29. "New Boiler Chemical Treatment Reduces Corrosion and Scale Buildup." Paper Trade Journal (April 1, 1974).

30. New Trends in Boiler Scale Control. A Mercurex Research Report. Berluse Research Center.

31. Peelen, D.V., and Gebert, J.R. "How to Control Boiler Iron Deposits." Chemical Engineering (March 8, 1976).

32. Pierce, T.H. Practical Boiler Water Treatment. New York: McGraw-Hill Book Co., 1982.

33. Semmelbeck, E.J. "Analysis of Boiler Water Carryover: Its Effects, Causes, and Prevention." Pulp & Paper (November 1975).

34. Sohrt, L.S. "Cause and Cure for Scale Deposits in Steam Turbines." Hydrocarbon Processing (December 1975).

35. Steam/its Generation and Use. New York: The Babcock & Wilcox Co., 1972.

36. Strauss, S.D. "Water Treatment." Power (June 1974).

17. Szilard, L.V. Descaling Agents and Methods. New Jersey : Noyes Data Corporation, Co., 1972.

18. Bonura, G. "Iron Contamination of Boilers : The Sources, the Problems, and Its Control" Power (September 1973).

19. Virgil, G.R. and Owens, A.D. "Automation to Optimize Boiler Blowdown," Power (February 1981).

20. Wozniy, G.P. and White, head, A. "Effect of Steam Purity on Performance, Reliability and Maintenance of Industrial Steam Turbines." 1977 IMPI Engineering Conference, Atlanta.

21. Yamashita, M. Principle of Boiler Water Treatment – Internal Treatment. Tokyo : Kobelco Industries Co.

11 การล้างหม้อไอน้ำ

การล้างหม้อไอน้ำที่จะกล่าวถึงนี้จะครอบคลุมเรื่องการล้างด่างใช้งาน (Alkaline Boilout) ทำกับหม้อไอน้ำทุกชนิด ที่ติดตั้งเสร็จแล้วก่อนที่จะใช้งานให้ต้องล้างทำความสะอาดเพื่อขจัดพวก น้ำมัน ไขมัน และสารแปลกปลอมอื่น ๆ ที่ประกอบมาอยู่กับหม้อไอน้ำ สารเคมีที่นิยมใช้ในการล้างต้มหม้อครั้งนี้

1. โซเดียมฟอสเฟต ($Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$)	5,000	พีพีเอ็ม
โซดาไฟ (NaOH)	500	พีพีเอ็ม
2. โซเดียมคาร์บอเนต	2,500	พีพีเอ็ม
โซดาไฟ	2,500	พีพีเอ็ม
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์	1,500	พีพีเอ็ม
โซดาไฟ	1,500	พีพีเอ็ม
โซเดียมไนเตรต	1,500	พีพีเอ็ม

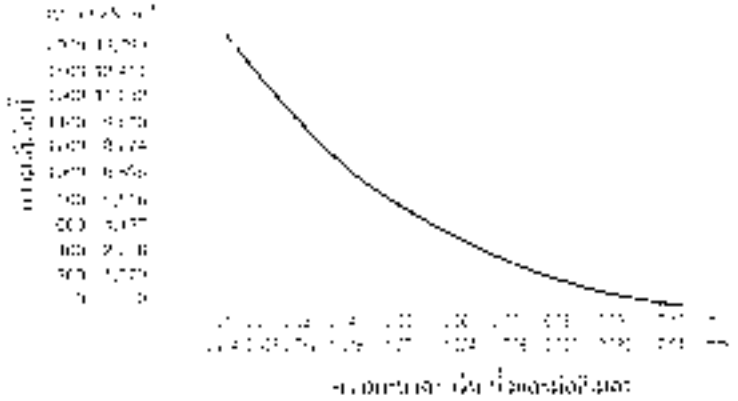
ถ้าจะใช้สารเสริมการเปียก (Wetting Agent) หรือสารซักฟอกผสมด้วยอีกประมาณ 250 พีพีเอ็ม ก็จะทำให้หม้อไอน้ำที่ใช้งานไม่เกิน 600 psi ใช้ดูดลงไปได้จะดีมาก

โซเดียมไตรฟอสเฟต	2,500	พีพีเอ็ม
โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3)	500	พีพีเอ็ม
โซดาไฟ	100	พีพีเอ็ม

ทำน้ำในหม้อไอน้ำลงจนเกือบหมด แล้วจึงเติมน้ำยาล้างลงไป หลังจากนั้นก็จุดไฟต้มน้ำให้เดือดขึ้น ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง ก็เป็นอันใช้ได้ ส่วนวิธีการต้มล้างนั้น จะต้องทำตามคู่มือของหม้อไอน้ำแต่ละชนิดไป

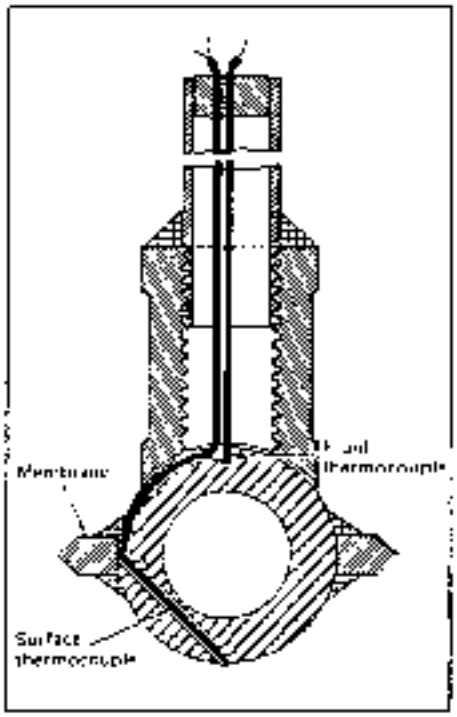
การล้างหม้อไอน้ำเพื่อขจัดตะกรันและสนิมต่าง ๆ หลังจากใช้งานมาแล้วระยะหนึ่ง นักเดินเรือจะทราบดีว่าการที่น้ำในหม้อไอน้ำนั้นมีความกระด้างสูง ก็ย่อมทำให้เกิดตะกรันได้มาก และมีสนิมเกาะอยู่ตามผิวโลหะด้านในของหม้อไอน้ำ หม้อไอน้ำนี้ถ้าใช้งานไปนาน ๆ ก็ต้องมีการล้างขจัดตะกรันและสนิมออกบ้างเป็นครั้งคราว มีการนัดแนะเพื่อลงไปเคาะล้างต่อไป การล้างตะกรันในหม้อไอน้ำนี้เรียกว่า Acid Cleaning ซึ่งอาจจะใช้กรดเกลือน้ำยาหรือกรดอื่น ๆ ล้างตะกรันให้หลุดออกมา แต่ที่จะทำการล้างต้องทราบปริมาณและชนิดของตะกรันให้แน่นอนเสียก่อน จึงจะได้ใช้สารเคมีในการล้างได้ถูกต้องและประหยัด การล้างด้วยกรดนี้ จะกล่าวถึงในโอกาสต่อไป

๓. ตรวจปริมาณละอองฝนโดยการวัดชั้นส่วนของท่อ เช่น หาปริมาณตกฝนรายหน่วยพื้นที่ เช่น ลิตรต่อตารางเซนติเมตร ... ดังแสดงในรูปที่ ๓.๓

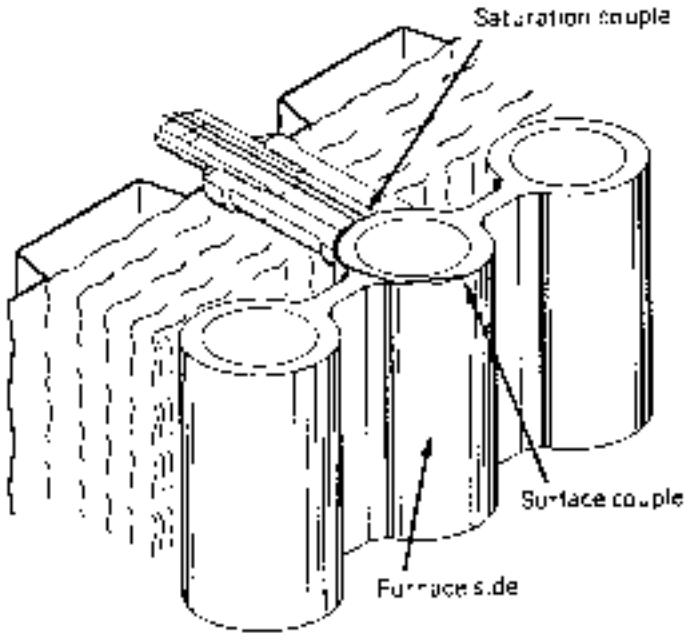


รูปที่ ๓.๓ พิกัดสูงสุดของความหนาของฝนที่ให้ได้ในหม้อไอน้ำความดันต่าง ๆ

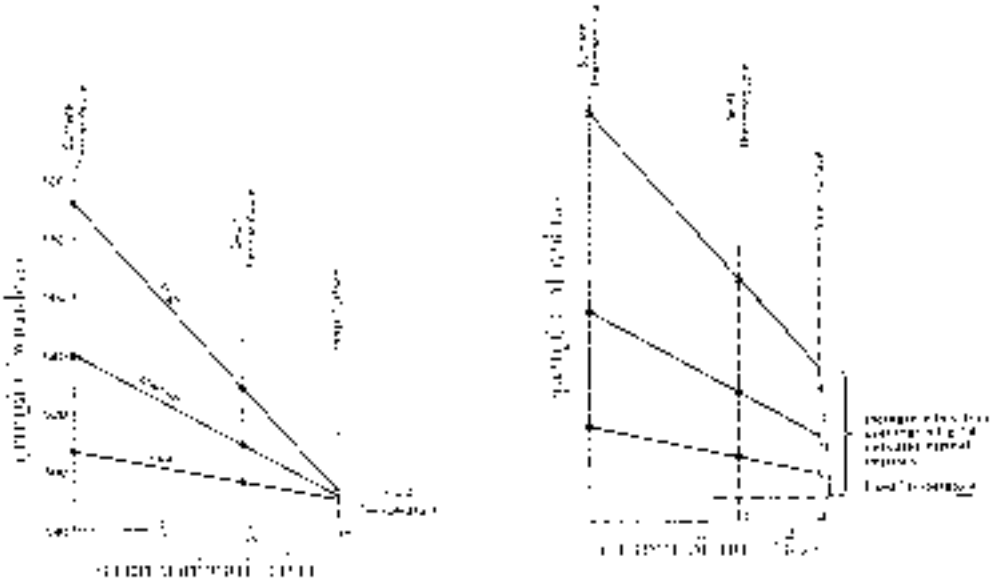
๔. ตรวจปริมาณละอองฝนโดยใช้ทอดมาสเทอร์โมคัปเปิล (Thermal Thermocouple) ... ดังแสดงในรูปที่ ๓.๔ โดยให้ปลายที่มีความร้อนสัมผัสกับผิวน้ำ ... ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำที่ความดันของหม้อไอน้ำนั้น ๆ ... ที่ท่อนั้นสะท้อนกระทบกระเทือนกับผิวน้ำ ... ที่ปลายเทียบกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ... ที่ปลายเทียบกับอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ ... ที่ปลายเทียบกับอุณหภูมิอิ่มตัว



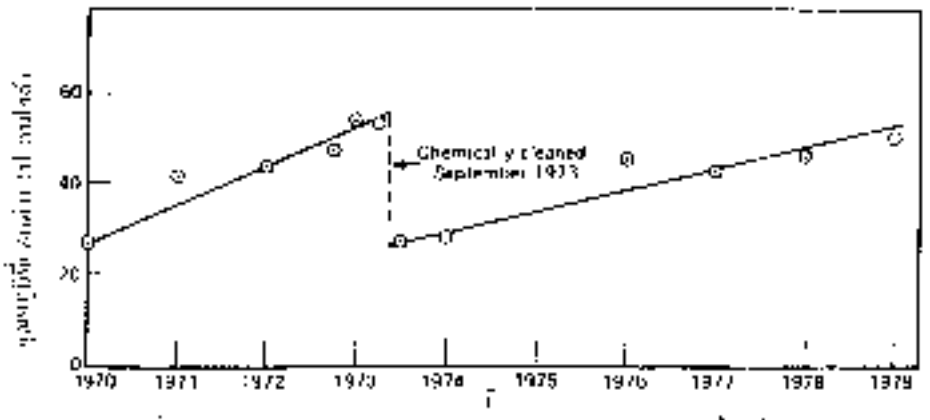
รูปที่ ๓.๔ ทอดมาสเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ ๑.๓ แสดงการฝังคอมเพนเซทโมคัปเปิลโพรบลงในน้ำ



รูปที่ ๑.๔ แสดงลักษณะอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล [illegible]



รูปที่ 11.1 ค่าอุณหภูมิแตกต่างของผลผลิตครั้งสุดท้ายของหม้อไอน้ำหนึ่งในปีหาย ๆ

ถ้าการแข็งตัวของน้ำ อุณหภูมิของผิวที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเร็วขึ้นและลดลง ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเร็วขึ้น

11.1 การวิเคราะห์ชนิดของตะกรัน

การวิเคราะห์ตะกรันนั้นมีความสำคัญ และมีประโยชน์ต่อการแก้ปัญหาตะกรัน ตัวอย่างเช่น ถ้าตะกรันเป็นซิลิเกต ซึ่งมีความแข็งมาก เช่น ซิลิกา ซิลิเกต ก็จะต้องใช้วิธีการที่แตกต่างกันในการขจัดตะกรันนี้ ถ้าเป็นตะกรันที่ละลายน้ำได้ง่าย ก็จะต้องใช้วิธีการที่แตกต่างกันในการขจัดตะกรันนี้ ดังนั้นจึงต้องทราบชนิดของตะกรันก่อนที่จะขจัดตะกรันนั้น ๆ ได้

11.2 สารเคมีล้างตะกรัน

สารเคมีล้างตะกรันที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีดังนี้

1. กรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid)
2. กรดอินทรีย์ (Organic Acid)
3. ด่าง (Alkalines)
4. ตัวทำละลาย (Solvent)
5. สารคีเลต (Chelating Agents or Sequestering Agents)

11.2.1 กรดอนินทรีย์

กรดอนินทรีย์ที่ใช้กันมาก ได้แก่ กรดเกลือ (HCl) กรดกำมะถัน (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

กรดเกลือ เป็นกรดที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการขจัดตะกรันได้ดี ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการล้างตะกรันอยู่ที่ 5-10%

กรดกำมะถัน เป็นกรดที่มีราคาถูกที่สุดในบรรดากรดทั้งหมด แต่มีข้อเสียตรงที่ เมื่อกรดกำมะถันทำปฏิกิริยากับตะกรันที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบจะเกิดแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ซึ่งไม่ละลายในกรดจึงทำให้

แม้ในกรณีที่ละลายได้ในน้ำกลั่นก็ตาม ถ้าเติมกรดลงไปเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ ในกรณีที่เป็นกรดเข้มข้น ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ซึ่งเรียกว่า Stress-corrosion Cracking ทำให้โลหะนั้นมีโอกาสที่จะแตกหักได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกระแทก

กรดไนตริก เป็นกรดที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสเตนเลสสตีล ออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) ที่ให้ความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี แต่ไม่ได้ผลกับเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของซิลิคอนสูง หรือกับเหล็กกล้าที่ผ่านการโอเวอร์เฮด ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นอะลูมิเนียม

กรดฟอสฟอริก ในช่วงอุณหภูมิห้องและที่ความเข้มข้นต่ำ จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ แต่ในกรณีที่มีความเข้มข้นสูงและที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องระมัดระวังในการใช้งาน

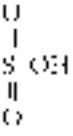
กรดอินทรีย์ส่วนใหญ่นั้นจะมีความปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดที่ละลายน้ำได้ จะมีความเป็นกรดต่ำ จึงมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนและทำให้เกิดสนิมได้น้อย จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่สูงมาก ๆ จึงจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น

๓.๒.๒ กรดอินทรีย์

โดยทั่วไปแล้ว กรดอินทรีย์จะมีความเป็นกรดต่ำ และมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนต่ำ ซึ่งเหมาะสมกับการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรม (Superficial) และมีประโยชน์ในการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ ก่อนการเคลือบผิวด้วยโลหะ และกรดอินทรีย์นี้ยังสามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable) ทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งาน และกรดอินทรีย์มีคุณสมบัติในการลดความตึงผิวได้ดี จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

กรดอินทรีย์ที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป ได้แก่ กรดซิตริก (Citric Acid) กรดออกซาลิก (Oxalic Acid) กรดซัลฟามิก (Sulfamic Acid), EDTA, กรดฟอร์มิก (Formic Acid) และกรดกลูโคนิก (Gluconic Acid) เป็นต้น

กรดซัลฟามิก เป็นกรดที่มีสูตรทางเคมีดังนี้ มีคุณสมบัติและการนำไปใช้งานคล้ายกับกรดซัลฟิวริก ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มีสูตรโครงสร้างดังนี้



กรดซัลฟามิกนี้ สามารถนำมาใช้ในการขจัดสนิมที่เกิดขึ้นบนสเตนเลสสตีล (Stainless Steel) ได้ โดยไม่มีผลกระทบกับเนื้อโลหะ และกรดซัลฟามิกนี้ ยังสามารถนำมาใช้ในการขจัดคราบหินปูนที่เกิดขึ้นในหม้อน้ำ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และในหอหล่อเย็น ได้ดีอีกด้วย เนื่องจากกรดซัลฟามิกนี้ มีความสามารถในการละลายได้ดีในน้ำ ที่อุณหภูมิห้อง และมีความเป็นกรดต่ำ ทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อนกับเนื้อโลหะ ในขณะที่ทำการขจัดคราบหินปูนที่เกิดขึ้นในหม้อน้ำ หรือในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากกรดนี้มีความสามารถในการใช้งานที่ดีกว่ากรดที่เป็นของเหลว กรดซัลฟามิกนี้จะมีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ระเหย และไม่ดูดความชื้นจากอากาศ ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการเก็บรักษา และการขนส่ง ในขณะที่ทำการขจัดคราบหินปูนที่เกิดขึ้นในหม้อน้ำ หรือในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งเป็นพิษและมีกลิ่นฉุนรุนแรง ถูกปล่อยออกมาด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันและระมัดระวังในการใช้งานเป็นอย่างมาก

[illegible] HSO_3NH_2 [illegible] NaCl [illegible] (Ferric oxide) [illegible] (Admiralty Brass) [illegible]

กรดซิตริก [illegible] (Chelate) [illegible] (Ca^{2+}) [illegible]

[illegible]

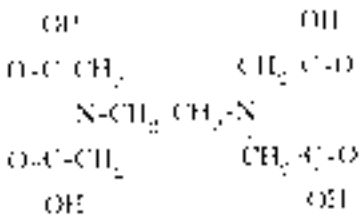
[illegible] (Corrosive) [illegible] pH [illegible] ($NaNO_2$) [illegible]

[illegible] pH [illegible] (Passivating or Inhibiting Effect) [illegible]

กรดออกซาลิก [illegible]

HO-C-C-OH [illegible] Reducing Agent [illegible] pH [illegible] MnO_2 [illegible] (Corrosion Inhibitor) [illegible] MnO_2 [illegible] MnO_2 [illegible]

EDTA (Ethylene-diamine-tetra-acetic-acid) [illegible]



ตารางที่ 11.1 ความสามารถในการจับอิออนโลหะ (Chelating Abilities) ของสารอินทรีย์ต่างๆ K_s

สารอินทรีย์ที่เป็นคีเลตเต้	Stability Constant, K_s					
	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cu^{2+}	Zn^{2+}
EDTA	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]			[illegible]	[illegible]		[illegible]

ค่า K_s ของไอออนโลหะชนิดใดที่มีค่าสูง แสดงว่าสารนั้นมีความสามารถในการจับอิออนโลหะชนิดนั้นได้ดี ตัวอย่างเช่น สารประกอบคีเลตที่มีความสำคัญในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ EDTA มีการนำมาใช้ในการจับอิออนโลหะที่ไม่ต้องการ เช่น Fe^{3+} ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ เช่น ในการผลิตน้ำมันพืช ซึ่งการใช้ EDTA ในการจับอิออนโลหะนี้ จะทำให้ประสิทธิภาพของสารกันหืน (Antioxidant) ดีขึ้น (Normann, Wening and Lauryson, 1982) นอกจากนี้ EDTA ยังมีประโยชน์ในการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของผลไม้ที่ผ่านการปอกเปลือกแล้ว (Enzymatic Browning) ซึ่งเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ Polyphenol oxidase ที่ต้องการ Cu^{2+} เป็นโคแฟคเตอร์ ในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกให้เป็นสารประกอบ Quinone ซึ่งสารประกอบ Quinone นี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นๆ ในเนื้อเยื่อของผลไม้ ทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น การใช้ EDTA ร่วมกับสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง เช่น สารละลายน้ำมะนาว หรือสารละลายกรดซิตริก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1-0.2 จะช่วยป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของผลไม้ได้ดีกว่าการใช้สารละลายกรดซิตริกเพียงอย่างเดียว (Sapers, Miller, Sondey-Allen, Ralston, Grohmann and Pondish, 1984) นอกจากนี้ EDTA ยังมีประโยชน์ในการป้องกันการเกิดสีเขียวของผักกระป๋องที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน (Thermal Processing) ซึ่งเกิดจากการที่ Mg^{2+} ในโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ถูกแทนที่ด้วย H^+ ทำให้เกิดสารประกอบฟีโอไฟติน (Pheophytin) ที่มีสีเขียวมะกอก ดังนั้นการใช้ EDTA ในการจับ Mg^{2+} ในคลอโรฟิลล์ จึงทำให้ผักกระป๋องที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนมีสีเขียวสดใสขึ้น (Arnold, 1980) ในการใช้ EDTA ร่วมกับโลหะเกลือ ยังมีประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสารกันเสีย (Preservative) บางชนิด เช่น สารกันเสียในกลุ่มไนไตรท์ (NO_2^-) ซึ่งการใช้ EDTA ร่วมกับไนไตรท์ในการถนอมอาหารจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของไนไตรท์ในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ดีขึ้น (Sofos, 1980) นอกจากนี้ EDTA ยังมีประโยชน์ในการป้องกันการเกิดกลิ่นหืนของน้ำมันพืช ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid) ที่มีพันธะคู่ (Double Bond) ในโมเลกุล ซึ่งการใช้ EDTA ในการจับ Fe^{3+} ที่เป็นโคแฟคเตอร์ของเอนไซม์ Lipoxygenase ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว จะช่วยลดการเกิดกลิ่นหืนของน้ำมันพืชได้ (Chan, 1983)

กรดไขมันอิสระชนิดต่างๆ ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุล เช่น กรดไขมันที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 12 ของกรดไขมันชนิด 18 คาร์บอน ที่มีพันธะคู่ 1 พันธะ (Ricinoleic acid) กรดไขมันที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของกรดไขมันชนิด 18 คาร์บอน ที่มีพันธะคู่ 2 พันธะ (Ricinelaidic acid) และกรดไขมันที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของกรดไขมันชนิด 18 คาร์บอน ที่มีพันธะคู่ 3 พันธะ (Ricinolenic acid) ซึ่งกรดไขมันอิสระชนิดต่างๆ ดังกล่าวนี้ จะมีประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำสลัด (Salad Dressing) ครีมเทียม (Coffee Whitener) และวิปปิ้งครีม (Whipping Cream) เป็นต้น

กรดไขมันอิสระชนิดต่างๆ ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุล เช่น กรดไขมันที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 12 ของกรดไขมันชนิด 18 คาร์บอน ที่มีพันธะคู่ 1 พันธะ (Ricinoleic acid) กรดไขมันที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของกรดไขมันชนิด 18 คาร์บอน ที่มีพันธะคู่ 2 พันธะ (Ricinelaidic acid) และกรดไขมันที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของกรดไขมันชนิด 18 คาร์บอน ที่มีพันธะคู่ 3 พันธะ (Ricinolenic acid) ซึ่งกรดไขมันอิสระชนิดต่างๆ ดังกล่าวนี้ จะมีประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำสลัด (Salad Dressing) ครีมเทียม (Coffee Whitener) และวิปปิ้งครีม (Whipping Cream) เป็นต้น

11.2.3 ด่าง

[illegible] (Passivating Film) [illegible]

[illegible] Surfactant [illegible] Emulsify หรือ Saponify [illegible] Emulsion [illegible] Emulsify ได้

11.2.4 ตัวทำละลาย

[illegible]

11.2.5 การคีเลต (Chelating, Sequestering หรือ Complex Forming Agents)

[illegible] เช่น Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+} [illegible] Chelating Agents ที่นิยมใช้ ได้แก่ EDTA [illegible] EDTA [illegible] EDTA, NTA, Sodium [illegible] glycine, Triethanolamine, Ammonia, Ethylenediamine [illegible] Diethylthiourea [illegible] Sodium Gluconate, Triethanolamine [illegible] pH [illegible]

11.3 การกัดกร่อนในการล้างหม้อไอน้ำ

[illegible] (H^+) [illegible] H^+ [illegible]

$$Fe + 2H^+ \longrightarrow Fe^{2+} + H_2\uparrow$$

[illegible] (Acid Inhibitor) [illegible] 95 - 99 [illegible]

[illegible] Fe, Cu [illegible]

$$Fe + 2Fe^{+3} \longrightarrow 3Fe^{+2} \quad (1)$$

$$Fe + Cu^{+2} \longrightarrow Fe^{+2} + Cu \quad (2)$$

$$2Fe^{+3} + 2Cu^{+} \longrightarrow 2Cu^{+2} + 2Fe^{+2}$$

ขณะที่มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นจะมีการสะสมของไฮโดรเจนที่ผิวโลหะ ซึ่งจะเป็นตัวต้านและป้องกันการกัดกร่อนต่อไป เพราะมีอนุภาคของไฮโดรเจนมาเคลือบผิวโลหะ (Fe) ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวโลหะ ดังนั้น สนิมจึงเกิดขึ้นที่บริเวณอื่นที่ไม่มีไฮโดรเจนมาเคลือบผิวโลหะ ดังสมการต่อไปนี้

$$FeO + 2HCl \longrightarrow FeCl_2 + H_2O$$

$$Fe_2O_3 + 6HCl \longrightarrow 2FeCl_3 + 3H_2O$$

$$Fe + 2HCl \longrightarrow FeCl_2 + H_2$$

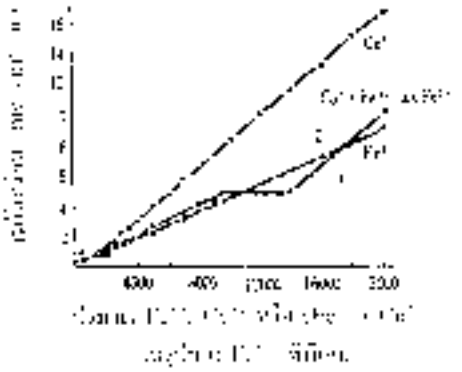
$$2FeCl_3 + H_2 \longrightarrow 2FeCl_2 + 2HCl$$

$$2FeCl_3 + Fe \longrightarrow 3FeCl_2$$

11.3.1 วิธีป้องกัน

การป้องกันอีกวิธีหนึ่งคือการใส่สารพวก Stannous Chloride ($SnCl_2 \cdot 2H_2O$) ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีออกซิเจนละลายอยู่ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Fe^{+3} ที่เกิดขึ้นแล้วเปลี่ยนเป็น Fe^{+2} ซึ่งไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนต่อไปอีก

$$2Fe^{+3} + Sn^{+2} \longrightarrow 2Fe^{+2} + Sn^{+4}$$



รูปที่ 11.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Fe^{+3}, Cu^{+2} กับปริมาณแผ่นโลหะที่ถูกกัดกร่อน
ในสารละลายกรดเกลือ 6% ที่ 25°C ภายในการทดลอง 24 ชั่วโมง

11.4 สารต้านการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors or Acid Inhibitors)

เมื่อมีการสัมผัสของสารละลายกรดกับโลหะ จะมีการเกิดปฏิกิริยาขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการใช้สารต้านการกัดกร่อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารต้านการกัดกร่อนจะมีขั้นตอนการทำงานที่ผิวโลหะ ที่เรียกว่า โมโนโมเลกุลาร์เลเยอร์ (Monomolecular Layer) ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการเติมไขมันด้วยสารประกอบต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น ยังสามารถนำไปทำปฏิกิริยาต่อเพื่อให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเฉพาะตามต้องการ ซึ่งสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ ได้แก่

1. Reducing Agents (Alcohols)
2. Nitrogen-containing Organic Compounds
3. Sulphur-containing Organic Compounds
4. Nitrogen and Sulphur-containing Organic Compounds

สารประกอบไนโตรเจน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ $C_{12}H_{25}$ ที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ดังนี้ เช่น Amphoteric Fatty Acid Derivatives, Imidazolines, Quaternaries

(1) Monoamines : RNH_2

(2) Diamines : $RNHCH_2CH_2CH_2NH_2$

(3) Amides : $RCONH_2$

(4) Polyethoxylated

(5) Amphoteric Compounds

สารที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีไนโตรเจนและซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Alkyl propylene diamine dipalmitate : $RNHCH_2CH_2CH_2NH_2 \cdot RHMH$ amine $NH_2CH_2CH_2NH(CH_2)_2NH_2$: Alkyldimethylbenzyl, Ethylenediamine, Polyamidoamine, Polyetheramine, Polyamino-Nichlorohydrin, Polyurethane, Fatty amine polyglycol ether

ปริมาณการเติมสารประกอบต่างๆ ลงในไขมันคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ปริมาณการเติมสารประกอบต่างๆ} = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \times 100$$

I_1 = ค่าไอโอดีนของไขมันก่อนการเติมสารประกอบต่างๆ

I_2 = ค่าไอโอดีนของไขมันหลังการเติมสารประกอบต่างๆ

ตารางที่ ๑๑.๒ ระดับชั้นคุณภาพของสารกันการกัดกร่อนชนิดหนึ่งที่มีธาตุหลักเหมือนกันในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ๒๔ ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส

ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ชนิดของสารกัดกร่อน	ระดับการกัดกร่อนและการสูญเสียน้ำหนัก	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิกรัม/ตารางเดซิเมตร/วัน)	ลักษณะที่เห็นด้วยตา
๑	[illegible]		[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
๑๐	[illegible]		[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
๒๐	[illegible]		[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

รูปที่ ๑๑.๗ การกัดกร่อนของเหล็กในกรดด่างและด่าง
[illegible]

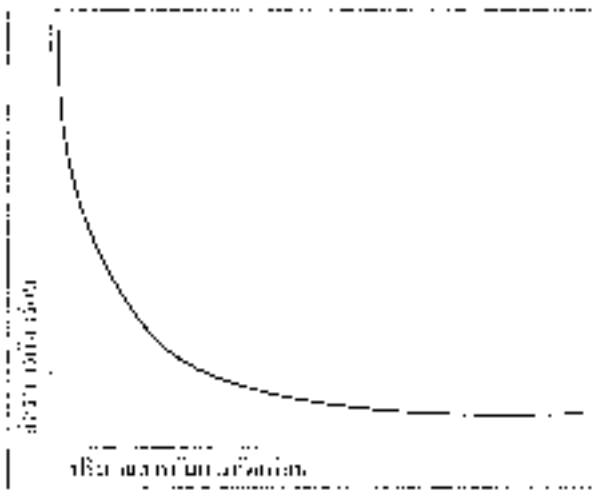
รูปที่ ๑๑.๘ การป้องกันการกัดกร่อนในกรดด่างและด่าง
[illegible]

11.4.1 การตรวจสอบเพื่อกำหนดอัตราการกัดกร่อน

ในการตรวจสอบเพื่อกำหนดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้งานในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ควรมีขั้นตอนการปฏิบัติงานดังนี้

1. เลือกแผ่นโลหะตัวอย่างที่มีพื้นที่เหมาะสมสำหรับโลหะที่ต้องการตรวจสอบ อย่างน้อย 2 ชิ้น ชิ้นละหนึ่งใบ
2. เตรียมสารละลายเคมีที่มีความเข้มข้นและคุณสมบัติตามที่กำหนดในการทดสอบ
3. ใส่สารละลายกัดกร่อนในอัตราส่วน 1 ลิตรต่อพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร ของโลหะที่ทดสอบ
4. จุ่มชิ้นโลหะลงในสารละลายตามวิธีที่กำหนด
5. ชั่งน้ำหนักของแผ่นโลหะหลังจากทำความสะอาดแล้ว

เมื่อทราบน้ำหนักที่หายไปของแผ่นโลหะแล้ว สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้ มีหน่วยเป็น g/cm^2-วัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความลึกที่กัดกร่อนและตัวอย่างที่ใช้ในประเทศไทยดังนี้ (ดูรูปที่ 11.9)



รูปที่ 11.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน

อัตราการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน และประเภทของการกัดกร่อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานดังนี้ (ดูตารางที่ 11.1)

ตารางที่ 11.1 แสดงอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้งานในสิ่งแวดล้อมต่างๆ

อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	อัตราการกัดกร่อน g/cm^2-วัน	ลักษณะที่เห็นด้วยตา
40	0.002-0.5	ไม่มีรอยกัดกร่อน
70	0.5-1.0	มีการกัดกร่อนเล็กน้อย
95	1.0-2.0	มีการกัดกร่อนปานกลาง

ตารางที่ 11.2 รายชื่อและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีผู้ศึกษาไว้ในการทำแบบจำลอง
(ทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กรดเข้มข้น 4.9 N เป็นเวลานาน 48 ชั่วโมง)

	Inhibitor	Source of Data	Wt % of Inhibitor at Protection of	
			90 %	50 %
1.	Butyl-(C⁵)-Je	F	0.003	.
2	o-Tolylthiourea	F	0.0034	...
3	p-Tolylthiourea	F	0.0046	.
4	Butyl disulfide	F	0.0049	
5.	Amyl mercaptan	F	0.006	..
6	Amyl selenium	F	0.0062	..
7	Propyl sulfide	F	0.009	.
8.	Phenylthiourea	F	0.009	
9	Quaternary ammonium	F	0.01	..
10	Butyl methyl sulfide	F	0.01	..
11	Thiourea	F	0.01	
12	Butyl mercaptan	F	0.011	..
13	p-Cresol	F	0.015	..
14	i-Butyl mercaptan	F	0.016	.
15.	Triacetylene	S	0.025	
16.	m-Phenylcresol	F	0.026	
17	Tetravinyl tin	2 C	0.027	...
18	Ethyl sulfide	F	0.027	
19	Valeraldehyde	C	0.038	
20	2-Phenylpropanol	F	0.042	.
21	o-Thiocresol	F	0.051	...
22.	Propyl mercaptan	F	0.061	
23	Methyl sulfide	F	0.067	
24	Crotonaldehyde	C	0.070	.
25.	Alkaline 2-021 Hantaldehyde	C	0.070	.
26.	Phenylmercaptan	F	0.094	0.014
27.	Furfuryl formate	C		0.012
28	Ethyl mercaptan	F	0.095	0.013
29	Commercial wetting agent (alkylated naphthalene sulfonic sulfonate)	F	0	.
30.	o-Tolualdehyde	C	0.13	0.014
31	m-Tolualdehyde	C	0.12	0.014
32	p-Tolualdehyde	C	0.12	0.014
33.	Pheronic (N-(CH₂)₃CH)	C		0.014
34	n-Butylaniline	F	0.42	0.021
35	Butraphenone	C	...	0.022
36.	Thiophenol	F	0.24	0.022
37	Propionaldehyde	C	0.17	0.029
38	Dibutylaniline	F	0.33	0.029
39	Betaine	C	...	0.030
40	Cresol	C		0.031
41	Dibutylaniline	S	0.17	0.033
42	Commercial wetting agent (sulfonated amine salt)	F	0.38	0.04
43	Dicyclohexylamine	Cr	1.9	0.043
44	Acetaldehyde	C		0.044
45	Butanol morpholine	C		0.045
46	Propyl thiophene	F	...	0.045

	Inhibitor	Source of Data†	Wt. % of Inhibitor at Precipitation of	
			90 %	50 %
45.	n-Naphthol-Laurate	S		[illegible]
46.	Diheptyl Laurate	DC	[illegible]	[illegible]
47.	Pentaerythritol	S	[illegible]	0.03
50.	Phenylbutazone	I		0.05
51.	Isopropyl Laurate	S	[illegible]	[illegible]
52.	Hexadecyldecyl	C	0.32	[illegible]
53.	Benzadefoxe	C	0.17	[illegible]
54.	Morpholine	I		0.012
55.	Cyclohexanone	C	0.24	0.109
56.	Commercial sodium decyl benzene sulfonate	S		0.08
57.	Methyl sulfone	D	0.11	0.082
58.	Dimethyl amine	I	0.04	0.081
59.	Diethylamine	I	[illegible]	0.08
60.	Acetophenone	C	0.20	0.06
61.	p-Phenetidine	D	0.01	[illegible]
62.	o-Toluidine	I		0.017
63.	Diheptyl Laurate	S	[illegible]	[illegible]
64.	Natural sodium oleate-ricinoleate	C		[illegible]
65.	Aminopropionyl-2-aminoacetic acid	C		[illegible]
66.	o-Xylidine	I	[illegible]	[illegible]
67.	Dimethylaniline	D		[illegible]
68.	Diisopropyl ketone	C	[illegible]	[illegible]
69.	Propyl sulfate		[illegible]	[illegible]
70.	2-Hydroxypyridine	[illegible]		0.16
71.	Natural methyl ketone	C	[illegible]	0.1
72.	Quinoline	I		0.13
73.	Lutidine	I	[illegible]	0.15
74.	Commercial sodium cetyl-oleyl alcohol sulfate,			
	0.1 % in water solution	D	[illegible]	[illegible]
75.	Commercial diethanolamine	I	[illegible]	[illegible]
76.	Ethylene glycol sulfate	I	[illegible]	[illegible]
77.	Natural sodium oleate		[illegible]	[illegible]
78.	Acetanilide	I		[illegible]
79.	Commercial sodium alkyl naphthalene sulfonate	I	[illegible]	[illegible]
80.	Diethyl carbonate	D		[illegible]
81.	Methyl propyl ketone	C		[illegible]
82.	Hexylamine	D	[illegible]	0.32
83.	Methyl sulfate			0.32
84.	Ethoxyl sulfate			0.31
85.	Commercial sodium cetyl-oleyl alcohol sulfate from			
	fatty acid esters	[illegible]	[illegible]	0.35
86.	Diethanolamine Methyl sulfate	I		0.36
87.	Ethylene diamine	I	[illegible]	0.37
88.	Dimethyl amine	I		0.38
89.	Dipropyl amine	S		0.38
90.	Commercial sodium cetyl-oleyl alcohol sulfate from natural and			
	dodecyl alcohol	D	[illegible]	0.40
91.	Commercial sodium cetyl-oleyl alcohol sulfate	I		0.40
92.	Butyl methyl ketone	C		0.41
93.	Diethyl methyl ketone	C	[illegible]	0.40
94.	Diethyl methyl ketone	C		0.40

	Inhibitor	Source of Data[a]	Wt. % of Inhibitor at Protection of	
			90 %	50 %
95	Piperidone	C	1.0	0.20
96	Triethanolamine	L	0.5	0.25
97	Ethylenediamine	L		0.59
98	Pyridine (4Me Pyridine)	L		0.62
99	N-Ethylpyridine	C	...	0.67
100	Acetylacetone	S	...	0.61
101	Hexylamine	L		0.65
102	Dimethylaniline	L		0.74
103	m-Propylaniline	L	2.1	0.77
104	Pyridine	L	...	0.96
105	Cyclohexylamine	LC		0.98
106	3,5-Xylidine	L		1.0
107	Diacetyl-Acetone	C	...	1.03
108	m-Ethylaniline	L	...	1.14
109	p-Toluidine	L		1.23
110	2,6-Xylidine	L	...	1.7
111	Phenylenediamine	L	...	1.8
112	m-Toluidine	C		1.8

[a] *The approximate accuracy of the cited method was ± 0.15%, Si 0.06% (Mn 0.3%, and P 0.03%). The sensitivity was ground for ground.*

[b] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[c] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[d] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[e] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[f] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[g] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[h] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[i] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[j] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[k] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[l] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[m] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[n] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[o] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[p] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[q] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[r] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[s] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[t] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[u] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[v] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[w] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[x] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[y] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

[z] *Key symbols: L = Lincoln, NE; C = Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; LC = Lincoln, NE; Cincinnati, OH; S = Sharon, PA; C = Cincinnati, OH; Chicago, IL; Cleveland, OH; and S = Sharon, PA. The symbol was ground for ground.*

11.4.2 ประเภทและชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน

สารยับยั้งการกัดกร่อนแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. แคโทดิก (Cathodic) สารยับยั้งปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดโดยการเคลือบผิวโลหะ
2. อโนดิก (Anodic) สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ขั้วแอโนดและทำให้เกิดฟิล์มบางๆ
3. ผู้ดูดซับ (General Adsorption) สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ดูดซับที่ผิวโลหะและลดพื้นที่

ตารางที่ 11.4 การแบ่งประเภทและชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน

ปฏิกิริยา	ชนิด	ตัวอย่าง
Alkylamines	Benzotriazole (1)	Aqueous Chromates
Benzotriazole (1)	Mercaptobenzo	Benzoic acid
Diphenylamine	Pyridine	Dibenzylsulfoxide
Thioureas (1)	Quinolines	Diphenylamine
	Thiols	Formaldehyde
	Thioureas (1)	

1. = ใช้ร่วมกับชนิดอื่น
11 = ใช้ร่วมกับชนิดอื่น

11.4.3 สารเพิ่มประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อน

ในกรณีที่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีไนโตรเจนอะตอมในโครงสร้าง เช่น Triazole, Pyridine, Quinoline, Acridine, Imidazoline เป็นต้น ถ้าผสมกับสารอินทรีย์พวก Acetylenic เช่น Propargyl Alcohol (Propyne-1-ol-3) $HC \equiv CH\text{-}CH_2OH$ และ 2-butyne 1, 4 diol, $CH_2OH - CCH_2OH$ จะช่วยลดการผิดผิวโลหะที่ใช้ขึ้นฟิล์มเพิ่มการยึดเกาะของสารยับยั้งการกัดกร่อนได้

ในกรณีที่ใช้ Mannich Bases ให้ใช้ร่วมกับไอโอไดด์ไอออน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนได้มากขึ้น

ตารางที่ 11.5 การเลือกสารยับยั้งการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับโลหะชนิดต่าง ๆ ในกรดไฮโดร-

โลหะ	กรด	สารยับยั้งการกัดกร่อน
เหล็กกล้าคาร์บอน Carbon Steel	กรดเกลือ HCl	Thiourea, Dibenzyl Sulfoxide, Quinoline, Propargyl Alcohol, Mannich Bases*, Thiourea- Dibenzyl Sulfoxide
	กรดไฮโดรฟลูออริก HF	Thiourea, Dibenzyl Sulfoxide
	กรดซัลฟิวริก H_2SO_4 กรดฟอสฟอริก H_3PO_4	
เหล็กกล้าไร้สนิม Stainless Steel	กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟามิก HSO_3NH_2 กรดอินทรีย์ต่าง ๆ**	Acetylenic Diphenylamines, Thiourea, Dibenzyl Sulfoxide, Quinolines
โลหะผสมทองแดง Copper Alloys	กรดไฮโดรคลอริก กรดไฮโดรฟลูออริก กรดซัลฟิวริก กรดอินทรีย์ต่าง ๆ**	Cyclohexylamines, Aniline, Pyridine, Formaldehyde Thiourea, Dibenzylsulfoxide
โลหะผสมนิกเกิล, Titanium	กรดเกลือ	Pyridine, Piperidine, Propargyl Alcohol, ใช้ในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง pH < 4
	กรดซิตริก Citric Acid	

* Mannich Bases คือ Condensation Product ของผู้ให้ H: Methylenation ของสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิล-หมู่คีโตน-หมู่ไทออล และฟอร์มัลดีไฮด์

** กรดอินทรีย์ต่าง ๆ ในที่นี้หมายถึง กรด Oxalic กรด Citric กรด Hydroxyacetic, กรด Formic

11.5 สารลดความตึงผิว (Surfactant or Wetting Agent)

การที่ใส่สารยับยั้งการกัดกร่อนลงไปในสารละลายกรดแล้วทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้จากการที่ฟองไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนโลหะมีขนาดเล็กลง และมีจำนวนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารยับยั้งการกัดกร่อนบางตัวที่ละลายน้ำได้ยากในกรดจะละลายได้ดีขึ้นเมื่อใส่ Wetting Agent บางตัวนำมาใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนได้ด้วย

หน้าที่ของ Wetting Agent ในการล้างคราบมัน

1. ช่วยเร่งอัตราการล้างคราบมันให้เร็วขึ้น
2. ช่วยป้องกันการตกตะกอนซ้ำของสิ่งสกปรกที่ละลายน้ำได้ (ion solubilise) ของสารละลายล้างคราบ ที่จะลอยกลับคืนสู่น้ำล้างคราบมัน
3. ช่วยให้การขจัดคราบมันล้างคราบมันเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

สารที่ทำหน้าที่เป็น Surfactant หรือ Wetting Agent ได้แก่ Alkyl sulfate, Alkylbenzene sulfonate, Fatty amine and Quaternaries, Ethoxylated alkylphenol, Fatty betaine ซึ่งมีทั้งพวก Cationic, Anionic และ Non-ionic

11.6 การล้างคราบมันพิเศษ

1. คราบมันจัดเฟส
2. คราบมันซีลแลค
3. คราบมันกระแทก
4. คราบมันเหม็นออกไซด์

1. **การล้างคราบมันจัดเฟส** คราบมันที่เกิดจากกรดเชื้อเพลิงนั้นจะมีกรดแก่ต่างๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น เกลือกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นปัญหาในการล้างคราบมันชนิดนี้ในหม้อไอน้ำ วิธีการล้างคราบมันจัดเฟสมีดังนี้

(1) *ใช้ด่าง* โดยการใช้ด่างไฮดรอกไซด์ เช่น NaOH หรือ KOH แช่คราบมันที่ไว้นานสักครู่ ซึ่งในขั้นตอนนี้ไม่ควรต้มคราบมันเพราะจะทำให้เกิดการเดือดสาดกระจายของ Wetting Agent ผสมด้วยเพื่อให้ด่างแทรกซึมเข้าไปในคราบมันได้ดีขึ้น และควรล้างคราบมันด้วยน้ำอุ่นอีกครั้ง

(2) *การล้างด้วยโครเมียม* เช่น Chromic acid, Chromic chloride, Chromic nitrate, Chromic bromide, Ammonium chromate, Ammonium dichromate, Sodium chromate โดยการให้สารละลายแช่คราบมันอยู่นาน 3-8 ชั่วโมง และอุ่นให้ร้อนไม่เกิน 82°C

ตารางที่ 11.1 การละลายของสารประกอบโครเมียม

สารละลาย	ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่จะละลายในสารละลาย 100 กรัม (กรัม)
0.05 Chromic chloride,	1.946
0.05 Chromic nitrate	2.031
0.05 Chromic bromide	2.701

(3) *ใช้ EDTA* ใช้ล้างคราบแคลเซียมซัลเฟตได้ดี แต่ต้องระมัดระวังอย่าให้โซเดียมไฮดรอกเข้าไปเกี่ยวข้อง เพื่อให้การล้างคราบมันเป็นไปอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้นควรใส่ Wetting Agent ลงในน้ำยาล้างคราบมันด้วย ซึ่งจะช่วยให้น้ำยาซึมเข้าไปในคราบมันได้อย่างรวดเร็ว

EDTA สามารถจับกับไอออนโลหะต่าง ๆ ได้ในปริมาณที่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของการรวมตัวเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะนั้นกับ EDTA ซึ่งสามารถบอกได้จากค่าคงที่การเกิดเชิงซ้อน (Stability Constant (K_f) หรือค่า K_f ของการจับเชิงซ้อนของ EDTA มีดังนี้

ที่ pH = 10 $Cu^{2+} > Ca^{2+} > Fe^{2+} > Zn^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}$

ตัวอย่างการนำไปใช้ EDTA ในการกำจัดที่มีอยู่ในน้ำ เช่น ซิลิกา ซัลเฟต และสารอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 11.7

ตารางที่ 11.7 ผลการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตโดยการระเหย (Evaporation) เมื่อเติม Na_2EDTA

	ขั้นตอนที่				
	1	2	3	4	5
Na_2EDTA เติม	0	20	20		0
Na_2EDTA ที่เหลือในน้ำ	0	0	0		0
NaOH เติม		0		0	
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	1500	1500	1500	1500	1500
ความเข้มข้นของแคลเซียม	72	54	31	5	5
ความเข้มข้นของซัลเฟต	1000	520			
ความเข้มข้นของซิลิกา	0	0	0	0	0
ปริมาณ Na_2EDTA ที่เหลือ	0		0		0

จะเห็นได้ว่าการใช้ EDTA จะช่วยลดปริมาณการใช้กรดและด่างในการปรับค่า pH ของน้ำ การใช้ร่วมกับสารอื่นจะทำให้ประหยัดได้มากขึ้น ข้อเสียของการใช้ EDTA คือ ราคาแพง ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องมีการนำ EDTA กลับมาใช้ใหม่ (Recovery Process) โดยใช้กรดกำมะถัน (Regeneration) ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้

ปฏิกิริยาการละลายตะกอนแคลเซียมซัลเฟต

$$CaSO_4 + EDTA^{4-} \rightleftharpoons CaEDTA^{2-} + SO_4^{2-}$$

จากสมการจะเห็นว่า EDTA สามารถนำไปใช้ในการละลายแคลเซียมซัลเฟตได้ในช่วง pH = 8.5 ถึง 10 ถ้าต้องการที่จะนำ EDTA กลับมาใช้ใหม่ ก็สามารถทำได้โดยการเติมกรดกำมะถันลงไป หลังจากนั้นปรับ pH เป็น 10-11 ดังสมการ (ปฏิกิริยาไฟฟ้า)

$$SO_4^{2-} + CaEDTA^{2-} + 4H^+ \longrightarrow CaSO_4 + H_4EDTA$$

ในเมื่อ H_4EDTA คือ EDTA ในรูปของกรด ดังนั้น EDTA จึงตกตะกอนออกมาได้ผลิตภัณฑ์ และสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก 15-20 ครั้ง เนื่องจากปริมาณที่สูญเสียไปในแต่ละครั้งมีน้อยมาก EDTA กลับมาใช้ใหม่ได้

2. **การกำจัดซิลิกา** โดยปกติแล้วการกำจัดซิลิกาออกจากน้ำ นิยมใช้การเติมสารประกอบแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4HF_2) หรือโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) หรือกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ลงในน้ำ ปฏิกิริยาฟลูออไรด์จะทำให้ประจุของซิลิกาในน้ำเป็นกลาง ซึ่งในน้ำจะมีซิลิกาคอลลอยด์ ดังนั้นจึงสามารถกำจัดออกได้ง่ายด้วยวิธีการตกตะกอนทั่วไป

4. การล้างสะกรัมทองแดงและทองแดงออกไซด์ ถ้าสะกรัมมีปริมาณน้อย วิธีการที่ง่ายที่สุดคือการล้างด้วยน้ำ ซึ่งมีปริมาณมากพอ ถ้าสะกรัมมีปริมาณมาก ควรล้างด้วยน้ำที่มีไอออนของโลหะ (Cu^{2+}, Ca^{2+}) ต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนของไอออนเหล่านี้ในหม้อต้มน้ำ และเนื่องจากมีปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของหม้อต้มน้ำด้วย วิธีการล้างมีดังนี้ คือ

(1) *ใช้กรด* กรดที่ใช้มีทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ที่ใช้ได้ผล เช่น กรดซิตริก กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟามิก กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก กรดซิตริก กรดมาลิก หรือ glycolic โดยกรดซิตริก (2-hydroxypropane-1,2,3-tricarboxylic acid) หรือ 2-hydroxyethyl ethylenediaminetriacetic acid หรือ 1,2-dihydroxyethyl ethylenediaminediacetic acid

(2) *โดยการเติมสารจับทองแดง (Copper Complexors)* เช่น กรดอะมิโนโพลีคาร์บอกซิลิก (aminopolycarboxylic acid) โดยน้ำหนัก 5 ส่วนต่อน้ำหนัก 95 ส่วน ที่ความเข้มข้นของกรดนี้ pH ของสารละลายจะต่ำกว่า 2 ดังนั้นจึงต้องเติมด่างลงไปเพื่อปรับ pH ให้อยู่ในช่วงที่ 3 ถึง 4 ด่างที่ใช้ได้ผลดีคือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ซึ่งมีปริมาณที่ pH สูงพอที่จะทำให้สารละลายมีสภาพเป็นด่างได้ ถ้าไม่มีแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ก็สามารถใช้ด่างอื่นแทนได้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), แอมโมเนียมคาร์บอเนต ($(NH_4)_2CO_3$) หรือแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (NH_4HCO_3) แต่ด่างเหล่านี้ไม่ค่อยนิยมใช้ เพราะ ทองแดงที่ถูกชะล้างออกมาจากสะกรัมจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ ดังนั้น การแยกทองแดงเข้าสู่กระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าจึงทำได้ยาก ซึ่งมีสารเคมีหลายชนิดที่ใช้เป็นสารจับทองแดงได้ดี (Complexing Agent) ตัวอย่างเช่น กรดซิตริก กรดไนโตรไตรอะซิติก (Nitrilotriacetic acid) กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซิติก (Ethylenediaminetetraacetic acid) กรดไฮดรอกซีเอทิลเอทิลีนไดอะมีนไตรอะซิติก (Hydroxyethylethylenediaminetriacetic acid) กรดไดไฮดรอกซีเอทิลเอทิลีนไดอะมีนไดอะซิติก (Dihydroxyethylethylenediaminediacetic acid) กรดไดเอทิลีนไตรอะมีนเพนตาอะซิติก (Diethylenetriaminepentaacetic acid) กรดไฮดรอกซีเอทิลไอมิโนไดอะซิติก (Hydroxyethyliminodiacetic acid) กรดไตรเอทิลีนเตตรามีนเฮกซาอะซิติก (Triethylenetetraminehexaacetic acid) กรดไดไฮดรอกซีเอทิลไกลซีน (Dihydroxyethylglycine) กรดไนโตรโลไตรโพรพิโอนิก (Nitrilotripropionic acid) กรดไฮดรอกซีเอทิลไอมิโนไดโพรพิโอนิก (Hydroxyethyliminodipropionic acid) กรดไดไฮดรอกซีเอทิลไกลซีนไดโพรพิโอนิก (Dihydroxyethylglycinedipropionic acid) กรดไตรเอทิลีนเตตรามีนเฮกซาโพรพิโอนิก (Triethylenetetraminehexapropionic acid) กรดไดเอทิลีนไตรอะมีนเพนตาโพรพิโอนิก (Diethylenetriaminepentapropionic acid) กรดไฮดรอกซีเอทิลไอมิโนไดโพรพิโอนิก (Hydroxyethyliminodipropionic acid) กรดไดไฮดรอกซีเอทิลไกลซีนไดโพรพิโอนิก (Dihydroxyethylglycinedipropionic acid) กรดไตรเอทิลีนเตตรามีนเฮกซาโพรพิโอนิก (Triethylenetetraminehexapropionic acid) กรดไดเอทิลีนไตรอะมีนเพนตาโพรพิโอนิก (Diethylenetriaminepentapropionic acid) เป็นต้น

3. *ออกซิเดชัน* ในการล้างสะกรัมทองแดงและทองแดงออกไซด์ ถ้าสะกรัมมีปริมาณมาก ๆ ก็สามารถใช้วิธีการล้างด้วยน้ำได้ผลดี ดังนั้น ถ้าสะกรัมมีปริมาณมาก ๆ ก็ควรใช้วิธีการล้างด้วยน้ำก่อน แล้วจึงตามด้วยการล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ประมาณ 0.5 ถึง 1.0 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 70 ถึง 80 °C ซึ่งมีการเติมสารออกซิไดซ์ เช่น แอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.5 ถึง 1.0 % โดยน้ำหนัก ลงไปในสารละลายด้วย ขั้นตอนนี้ก็ใช้เวลาประมาณ 4 ถึง 8 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความหนาของสะกรัม ซึ่งวิธีนี้ก็ใช้ได้ผลดีกับสะกรัมที่มีทองแดงและทองแดงออกไซด์ปนอยู่ด้วย

4. *ใช้กรดซิตริกผสมแอมโมเนีย* เป็นการใช้ Citrosol ผสมกับแอมโมเนียมซิเตรต (ammonium citrate) ในน้ำ ที่ pH ประมาณ 8 ถึง 10 โดยสารละลายนี้จะมีปริมาณของแอมโมเนียมไนไตรต์ ($NaNO_2$) ประมาณ 1 ถึง 2 % โดยน้ำหนัก ซึ่งจะช่วยในการกัดกร่อนของทองแดงและทองแดงออกไซด์ ในขณะที่ทองแดงที่ถูกละลายออกมาจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมโมเนีย ($Cu(NH_3)_4^{2+}$)

หลังจากใช้วิธีการนี้แล้ว ควรล้างด้วยน้ำ pH ประมาณ 8.5 ที่มีแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ผสมอยู่ด้วย ประมาณ 0.5 % โดยน้ำหนัก ที่มีโซเดียมไนไตรต์ ($NaNO_2$) ผสมอยู่ประมาณ 1 ถึง 2 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 70 ถึง 80 °C ประมาณ 4 ถึง 8 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความหนาของสะกรัม ซึ่งวิธีนี้ก็ใช้ได้ผลดีกับสะกรัมที่มีทองแดงและทองแดงออกไซด์ปนอยู่ด้วย

5. *Alkaline Copper Removal Process (ACR)* เป็นวิธีที่ใช้ในการล้างสะกรัมทองแดงในหม้อต้มน้ำ ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศอังกฤษ

6. *ใช้ไฮโดรเจน* การใช้ไฮโดรเจนในการล้างสะกรัมนี้ จะต้องมีการควบคุมการเกิดกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบคลอไรด์ในสะกรัมด้วย ซึ่งไฮโดรเจนจะทำปฏิ

เกาะตามผนังท่อไอน้ำจะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting) การใช้สารไฮดราซีนและอนุพันธ์ของสารนี้จะไม่มีปัญหาการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting) การใช้สารไฮดราซีนและอนุพันธ์ของสารนี้จะไม่มีปัญหาการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting) ทำให้ท่อรีดิวส์โดยเคมีดังนี้

เมื่อมีการล้างสะเก็ดทองแดงชนิด Cupric oxide ด้วยกรดแล้ว ทองแดงออกไซด์จะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นชั้นของทองแดงที่ร่วนซุยบนผิวเหล็ก และในขณะเดียวกันสะเก็ดนี้จะถูกกัดกร่อนเช่นกัน อธิบายตามสมการดังนี้

$$CuO + 2H^{+} \rightarrow Cu^{++} + H_2O \quad (1)$$

$$Cu^{++} + Fe \rightarrow Cu + Fe^{++} \quad (2)$$

ปฏิกิริยาการกัดเนื้อเหล็กตามสมการ (2) นี้ สามารถป้องกันได้โดยการเติมสารไฮดราซีนลงไปในระบบก่อนเพื่อรีดิวส์คิวปริกออกไปเป็นคิวปรัสออกไซด์ซึ่งจะไปจับตัวกับสารไฮดราซีนที่มีอยู่ ปฏิกิริยารีดิวส์คิวปริกออกไปเป็นไฮดราซีน เป็นดังนี้

$$2Cu^{++} + CS(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2Cu^{+} + CO(NH_2)_2 + S + 2H^{+} \quad (3)$$

การลดระดับออกซิเดชันของไฮดราซีนตามสมการนี้จะมีสาร

$$Cu^{+} + Cl^{-} + CS(NH_2)_2 \rightarrow CuCS(NH_2)_2Cl \quad (4)$$

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไทโอยูเรียดังสมการ

$$Cu^{+} + 3CS(NH_2)_2 \rightarrow Cu[CS(NH_2)_2]_3^{+} \quad (5)$$

การเกิดปฏิกิริยา Demerization ของไฮดราซีน

$$2Cu[CS(NH_2)_2]_3^{+} \rightarrow Cu_2[CS(NH_2)_2]_6^{++} \quad (6)$$

ถ้ามีไทโอยูเรียอยู่มากเกินพอก็จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนตัวที่สองดังนี้

$$Cu^{+} + 4CS(NH_2)_2 \rightarrow Cu[CS(NH_2)_2]_4^{+} \quad (7)$$

ในการใช้ไทโอยูเรียจะต้องใส่ในปริมาณมากจนกระทั่งส่วนที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วยังมีเหลืออยู่มากพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดเกลือไฮไดรเจนซัลไฟด์ตามสมการ (4) แต่จากสมการ (6) แสดงให้เห็นว่าจะต้องใช้ไทโอยูเรีย 3 โมเลกุลเป็นอย่างต่ำต่อคิวปริกไอออน 1 โมเลกุล เพื่อให้ละลายน้ำได้ดีไม่ตกตะกอนตามหลักปฏิบัติจะต้องใช้ไทโอยูเรีย 3.5 ถึง 4 โมเลกุลต่อคิวปริกไอออน 1 กิโลกรัม แต่เพื่อความมั่นใจในการทำปฏิกิริยาต้องเติมไทโอยูเรียให้มากเกินพอไว้ เพื่อจะไปชดเชยไทโอยูเรียส่วนที่ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นยูเรียตามสมการ (3)

ถ้าในระบบหล่อเย็นมีสนิมเหล็กเจือปนมาและมีไฮดรัสออกไซด์ของทองแดงถูกรีดิวส์ไปเป็นคิวปริกไอออน

$$Fe_3O_4 + Cu + 8H^{+} \rightarrow 3Fe^{++} + Cu^{++} + 4H_2O \quad (8)$$

ถ้าหากในกระบวนการมีสารไฮดราซีนไม่เพียงพอแล้ว คิวปรัสไอออนที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้นก็จะถูกออกซิไดซ์ตามสมการ (5) สมการ (6) และสมการ (7) ได้ แต่ถ้าไม่มีไฮดราซีนแล้วคิวปริกไอออนที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนกลับไปเป็นทองแดงและคิวปริกไอออน

$$2Cu^{+} \rightarrow Cu^{++} + Cu$$

โดยปกติแล้วกระบวนการล้างสนิมเหล็กในหม้อน้ำจะมีความเข้มข้นของกรดมากกว่าที่แสดงไว้ในสมการ (8) ซึ่งเป็นความต้องการขั้นต่ำ

สูตรน้ำยาล้างตะกรันทองแดงจะเป็นดังนี้

แอมโมเนีย 5 %

ไทโอยูเรีย 2 %

สารกันการกัดกร่อน 0.4 - 0.6 % หรือตามผู้ผลิตแนะนำ

ให้ละลายไทโอยูเรียในน้ำก่อนแล้วค่อยๆ เติมแอมโมเนียลงไปในขณะที่ยังคงหมุนเวียนอยู่ เมื่อล้างตะกรันเสร็จแล้วก็ต้องตรวจดูว่าผิวโลหะมีตะกรันทองแดงหลุดออกหมดหรือไม่ ถ้าหากยังไม่หลุดออกจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื้อเหล็ก เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะสองชนิดที่เชื่อมติดกัน วิธีการล้างตะกรันทองแดงนี้จะได้ผลดีถ้ามีทองแดงไม่เกิน 120 กิโลกรัม แต่วิธีการล้างนี้ไม่ควรใช้กับโลหะผสมทองแดง

4. **การล้างตะกรันเหล็กออกไซด์** ในหม้อไอน้ำจะเกิดสนิมเหล็กออกไซด์ได้ 2 ชนิด คือ เฟอร์ริกออกไซด์หรือสนิมเหล็ก (Fe_2O_3) และแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) แมกนีไทต์จะทำปฏิกิริยากับกรดเกลือได้โดยเสมือนหนึ่งเป็นสารผสมของเฟอร์รัสออกไซด์ (FeO) และเฟอร์ริกออกไซด์

$$Fe_2O_3 + FeO + 8 HCl \longrightarrow FeCl_2 + H_2O$$

$$Fe_2O_3 + 6 HCl \longrightarrow 2 FeCl_3 + 3 H_2O$$

จากสมการข้างต้นนี้ จะเห็นว่าในสารละลายกรดจะมีเหล็กในรูปเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) อยู่ด้วย แต่ความเป็นจริงจะพบว่าส่วนใหญ่อยู่ในรูปเฟอร์รัสคลอไรด์ ($FeCl_2$) ทั้งนี้เพราะเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

$$2FeCl_3 + Fe \longrightarrow 3 FeCl_2$$

ปฏิกิริยากัดกร่อนนี้แก้ไขได้โดยการใช้ไอออนสแตนนัส ในกรณีที่มีสารละลายเหล็กในรูปของเฟอร์ริกเป็นเฟอร์รัสก่อนที่จะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะในหม้อไอน้ำ

ตารางที่ 11.4 ความสามารถในการละลายตะกรันเหล็กออกไซด์ของสารละลายชนิดต่าง ๆ

สารละลายที่ใช้ล้างตะกรัน	การละลายตะกรัน ปอนด์ Fe_3O_4/แกลลอน ของสารละลาย
กรดเกลือเข้มข้น 5%	0.101
กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 5%	0.034
กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 15%	0.031
5% Ammonium di hydrogen citrate	0.070
3% EDTA (Ammonium salt)	0.025
6% EDTA (Ammonium salt)	0.050
10% EDTA (Sodium salt)	0.090

มีการเกิดขึ้นดังนี้

(1) ***ใช้กรดซิตริกผสมแอมโมเนีย*** โดยที่กรดซิตริกจะทำปฏิกิริยากับเหล็กออกไซด์ ดังนี้

$$Fe_2O_3 + 2\ H_3\ citrate \quad = \quad 2\ Fe\ citrate + 3\ H_2O$$

กรดซิตริก — เฟอริกซิเตรต

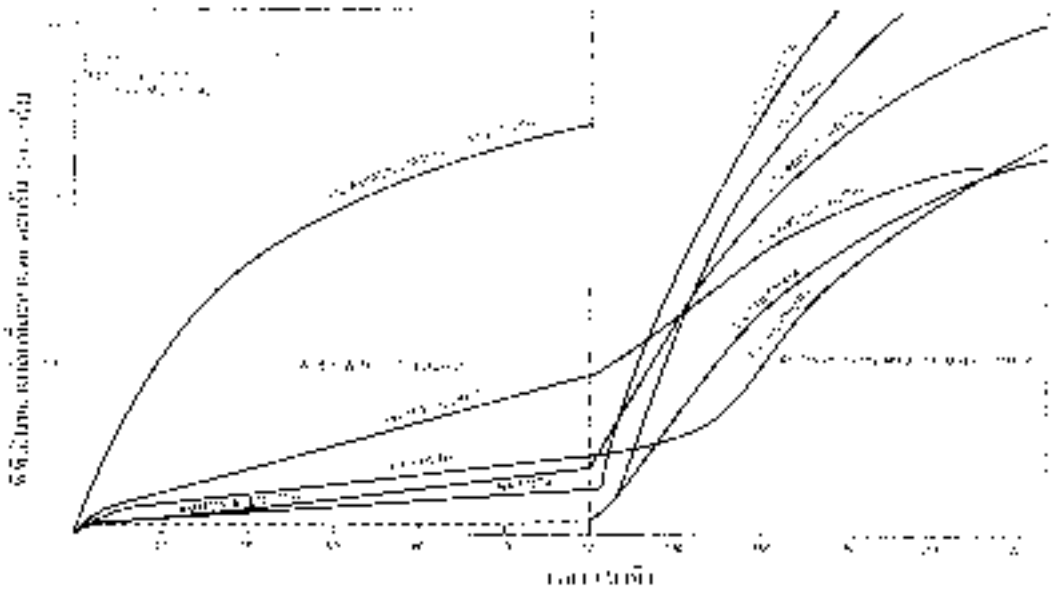
หลังจากนั้นจึงเติมแอมโมเนียลงไปเพื่อปรับ pH ที่ 8.5–9.0 ซึ่งจะทำให้ Fe และ citrate ตกตะกอนได้ดีขึ้น เพราะไปเพิ่มปริมาณเหล็กเข้าไปในวงจรด้วย

$$Fe_2O_3 + 3\ NH_4\ H_3\ citrate \longrightarrow NH_4\ Fe\ citrate + 2\ NH_4(Fe\ citrate)\ OH + H_2O$$

แอมโมเนียมไฮโดรเจนซิเตรต — มีเฉพาะเมื่อใช้ — ตกตะกอนเฟอริก

(2) ***สารละลายที่ผสมฟลูออไรด์*** การใส่ฟลูออไรด์ลงไปในสารละลายกรดจะทำให้ละลายออกมาได้ Fe$_2$O$_3$ ได้

- กรดซิตริกเข้มข้น 8%
- กรดออกซาลิกเข้มข้น 4%
- กรดซิตริกเข้มข้น 8% ปรับ pH ด้วยแอมโมเนียเป็น 8.5
- กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 8%
- สารละลายโซเดียมอีดีทีเอ (EDTA) เข้มข้น 8%



รูปที่ 11.9 การละลายออกของ Fe$_2$O$_3$ ในสารละลายต่าง ๆ และเมื่อมีและไม่มีแอมโมเนียมไบฟลูออไรด์

(3) ใช้กรดซิตริก,สะเก็ดกรดฟอร์มิก (Formic acid) ใช้ในการล้างทำความสะอาดเครื่องที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ในการล้างทำความสะอาดครั้งแรก ๆ ควรใช้น้ำหนักสารเคมีที่ใช้ประมาณ 4% ที่อุณหภูมิประมาณ 90 °C นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภท Washing Agent ต่าง ๆ

(4) *Alkaline Copper Removal Process (ACR)* วิธีนี้ใช้กำจัดสิ่งสกปรกและคราบตะกรันที่ประกอบด้วย EDTA ผสมกับแอมโมเนีย ซึ่งมีคุณสมบัติในการไล่ออกซิเจนในน้ำได้ดี ทำให้ผิวโลหะที่ถูกขจัดคราบสกปรกแล้วมีความเป็นด่างเล็กน้อย ที่ความเข้มข้นของ EDTA ตามที่กำหนดไว้ ในการใช้งานจริงนั้นจะเติมสารเคมีประเภทกำจัดคราบตะกรันลงไปด้วย เพื่อให้การกำจัดคราบตะกรันที่เกิดจาก EDTA ทำงานได้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในขณะเดียวกันก็ยังคงคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของผิวโลหะที่ดีอยู่ด้วย

ในการเตรียมน้ำยาล้างที่ประกอบด้วยแอมโมเนียและ EDTA จนกระทั่งมีค่า pH ประมาณ 9.0 ถึง 9.5 ซึ่งในขณะที่ทำการผสมน้ำยาล้างนี้ค่า pH จะต่ำกว่า 7 ก็ได้ แต่จะต้องปรับค่า pH ให้ได้ตามที่กำหนดไว้ก่อนนำไปใช้งานจริง

ในการล้างทำความสะอาดคราบตะกรันที่เกิดจากออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ ที่ประกอบด้วย

ผิวโลหะที่จะถูกขจัดคราบสกปรกประกอบด้วย

FeO	Fe_2O_3	85 - 95%
	Fe_3O_4	0 - 15%
Cu		5 - 15%
Cu_2O		1 - 5%

ในการล้างทำความสะอาดนี้จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$FeO \cdot Fe_2O_3 + 3\ EDTA^{4-} + 4\ H_2O \longrightarrow 2\ Fe^{2+}EDTA^{4-} + Fe^{3+}EDTA^{5-} + 8\ OH^-$$

$$Fe_3O_4 + 2\ EDTA^{4-} + 3\ H_2O \longrightarrow 2Fe^{3+}EDTA^{5-}$$

$$Cu_2O + 2\ EDTA^{4-} + H_2O \longrightarrow 2\ Cu^{2+}EDTA^{6-} + 2\ OH^-$$

ต่อจาก Fe^{2+} และ Cu^{2+} จะทำปฏิกิริยาต่อดังนี้

Fe^{2+} ที่เกิดจากการล้าง Cu_2O นี้จะอยู่ในสภาพที่เป็นอันตรายต่อโลหะที่ใช้งาน

$$Cu_2O + 2\ Fe^{2+} + EDTA^{4-} + EDTA^{6-} \longrightarrow 2\ Fe^{3+}EDTA^{5-} + Cu^{2+}EDTA^{6-}$$

Fe^{2+} ที่เหลือจากปฏิกิริยาข้างต้น (Fe^{2+} ในสภาพที่ละลายน้ำ)

$$2\ Fe^{2+}EDTA^{4-} + Fe \longrightarrow 2\ Fe^{3+}EDTA^{5-}$$

Cu^{2+} ที่เหลือจากปฏิกิริยาข้างต้น (Cu^{2+} ในสภาพที่ละลายน้ำ)

$$2\ Cu^{2+}EDTA^{6-} + Fe \longrightarrow Cu + Fe^{3+}EDTA^{5-} + EDTA^{6-}$$

จากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นได้ว่าในขณะที่ทำการล้างทำความสะอาดนั้นจะมีการกัดกร่อนของผิวโลหะเกิดขึ้นด้วย

$$Cu^{2+}EDTA^{6-} + Fe \longrightarrow Cu + Fe^{3+}EDTA^{5-}$$

$$FeO \cdot Fe_2O_3 + Fe + 4\ H_2O + 4\ EDTA^{4-} \longrightarrow 4\ Fe^{2+}EDTA^{5-} + 8\ OH^-$$

จากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นได้ว่าในน้ำยาล้างทำความสะอาดนี้จะประกอบด้วย Fe^{2+}, Fe^{3+}, Cu^{2+}, Cu^{+} ซึ่งมีค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ประมาณ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามี Fe^{3+} ของปฏิกิริยาต่อ ๆ ไปจะทำให้ Fe^{2+}, Cu^{2+}, Cu^{+} ทำปฏิกิริยาต่อกับเหล็กในระบบทำความเย็น (Cu^{2+} จะตกตะกอนเป็นโลหะทองแดง) ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเป็นหลุมลึกได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการล้างทำความสะอาดนี้จะต้องวิเคราะห์ Fe^{2+}, Fe^{3+}, Cu^{2+}, Cu^{+} จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ด้วย

ซึ่ง Cu^{+1} และ Cu^{+2} จะตกตะกอนออกมาเป็นโลหะทองแดงเกาะที่ผิวโลหะ ส่วนเหล็ก Fe^{+2} จะถูกออกซิไดซ์ต่อมาเป็น Fe^{+3} ซึ่งทำให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีปริมาณคงที่

กลไกที่ทำให้ทองแดงนั้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและการจับเป็นสารเชิงซ้อนของโลหะทองแดงนี้ได้จากปฏิกิริยาข้างล่างซึ่งจะไม่เกิดขึ้นเลยถ้าไม่มีน้ำอยู่ ซึ่งจำเป็นต้องมีความชื้นเพื่อละลายตะกอนออกไปได้ด้วยวิธีการเติมกรดที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีออกซิเดชันและรีดักชันของโลหะทองแดงดังนี้

$$Fe^{+2}\,EDTA^{-2} + \tfrac{1}{2}O_2 + H_2O \longrightarrow 2\,Fe^{+3}\,EDTA^{-1} + 2\,OH^-$$

$$Fe^{+3}\,EDTA^{-1} - Cu - EDTA^{+} \rightarrow 3\,Fe^{+2}\,EDTA^{-2} + Cu^{+2}\,EDTA^{-2}$$

ออกซิเดชันจะไปลดเลขออกซิไดส์ Fe^{+2} ให้เป็น Fe^{+3} ซึ่ง Fe^{+3} กับ EDTA จะไปจับโลหะทองแดงเกิดเป็นสารเชิงซ้อนขึ้น

ก่อนจะเตรียมการล้างต้องมีการวิเคราะห์ตะกรันให้ทราบหินหินปูนและหินของตะกรันอย่างละเอียดว่าเป็นตะกรันชนิดใด ตะกรันของแคลเซียมคาร์บอเนต จะต้องเตรียมน้ำยา EDTA ให้เหมาะสมกับปริมาณและชนิดแต่ละตะกรัน ในการเตรียมน้ำยาล้างผสมสารกันการกัดกร่อนลงไปด้วยและน้ำยา EDTA ที่ใช้ในการเตรียมนั้นจะมีความเข้มข้นประมาณ 5% โดยน้ำหนัก ถ้าเข้มข้นมากกว่านี้จะทำให้สารกันการกัดกร่อนมีประสิทธิภาพลดลง ไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ ในขณะที่ล้างจะต้องสังเกตอุณหภูมิน้ำในหม้อไอน้ำด้วยเสมอ ประมาณ 60°C เพราะถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้น้ำยาจะสลายตัวเกิดเป็นกรดอินทรีย์ขึ้นมาแทน ทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื้อโลหะ ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นได้ ในขณะที่ล้างจะต้องสังเกตอุณหภูมิน้ำในหม้อไอน้ำด้วยเสมอ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ น้ำยาจะสลายตัวเกิดเป็นกรดอินทรีย์ขึ้นมาแทน ทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื้อโลหะ ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นได้ ในขณะที่ล้างจะต้องสังเกตอุณหภูมิน้ำในหม้อไอน้ำด้วยเสมอ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ น้ำยาจะสลายตัวเกิดเป็นกรดอินทรีย์ขึ้นมาแทน ทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื้อโลหะ ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นได้

ข้อจำกัดของการใช้แอมโมเนียมสม EDTA

1. ในขณะที่ล้างจะมีคาร์บอเนตและไฮโดรเจนละลายอยู่ด้วยในหม้อไอน้ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนหรือติดไฟ หรือเกิดระเบิดได้

2. มีปัญหาเรื่องวิธีการของน้ำที่จะทิ้งออกมาด้วย

3. ในการใช้งานต้องให้มีความเข้มข้นของสารกันการกัดกร่อนไม่ต่ำกว่า 1 หุ้นส่วนที่จะล้างตะกรันออกได้ก็ยังมีน้อย

11.7 การต้มด้วยด่าง (Alkaline Boilout)

การล้างตะกรันด้วยด่างนั้นจะใช้ในกรณีที่ไม่สามารถล้างด้วยกรดได้ เช่น ตะกรันที่เกิดจากการใช้สารประเภท Filming Amine และนิยมใช้ล้างเพื่อให้เกิดตะกรันอ่อนที่เป็นส่วนประกอบของตะกรันแข็ง ตะกรันแคลเซียมซัลเฟตหรือซิลิเกต วิธีการใช้ด่างต้มนั้นอาจจะไปละลายหรือทำให้ตะกรันที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์อ่อนตัวได้ ในกรณีนี้จำเป็นต้องใช้สารละลายโซเดียมเปอร์แมงกาเนตที่มีสภาพเป็นด่างแทน ส่วนสารที่จะล้างตะกรันซิลิกาสามารถนิยมใช้ได้ เช่น Acrylic Acid Analogue หลังจากล้างแล้วต้องล้างด้วยน้ำจนสะอาดเสียก่อน เพื่อขจัดโซเดียมเปอร์แมงกาเนตที่ตกค้างหลงเหลืออยู่ในหม้อไอน้ำ ซึ่งจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นตะกรันแมงกานีสออกไซด์ได้

ถ้าหากพบว่าในเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง (Economizer) นั้นมีตะกรันจำพวกตะกั่วหรือทองแดงที่ไม่สามารถสลายตัวจะต้องใช้ผสมกับวิธีล้างที่ดีที่สุดให้ใช้น้ำมันก๊าดช่วยประสิทธิภาพดีกว่าการต้มด้วยด่าง

11.7.1 สูตรสารคีเลตล้างหม้อไอน้ำที่เป็นกรด

	ร้อยละโดยน้ำหนัก
1. Sulfamic acid	17.2
Citric acid	20.0
Boric acid	20.0
1-hydroxy ethyl 1 benzyl-2-heptadecimidazolinium chloride	2.75
Methyl violet	0.05
2. Citric acid	60
Sulfamic acid	40
3. Sulfamic acid	50
Gluconic acid	50
4. Lactic acid	25
Sulfamic acid	75
5. Maleic acid	10
Sulfamic acid	90

11.7.2 วิธีการล้างหม้อไอน้ำ

ขั้นตอนใหญ่ ๆ ในการล้างหม้อไอน้ำ มีดังนี้

1. ล้างด้วยด่าง (Alkali Boilout) ขั้นตอนนี้จะทำละลายสิ่งต่างๆ ที่ติดอยู่ตามผิวของท่อน้ำมัน ไขมัน และอาจจะมีซิลิกาแข็งอยู่ในหม้อไอน้ำ

2. ล้างด้วยกรดชนิดต่าง ๆ ที่จะกัดเอาตะกรันออก

3. ล้างด้วยกรดที่ผสมสารยับยั้งการกัดกร่อนน้ำ เพื่อให้ละลายตะกรันส่วนที่ไม่ละลายในกรดหรือมีการกัดกร่อนน้อยที่สุด และน้ำยาล้างตะกรันที่ตกค้างอยู่ในที่ต่าง ๆ ภายในหม้อไอน้ำ น้ำยาล้างแทนที่ด้วยสารบางชนิดที่เป็นเหตุให้เกิดการตกตะกอน หรือการกัดกร่อนได้ยากมาก

4. ทำการสะเทิน (Neutralize) และทำให้มีสภาพเฉื่อย (Passivate) ให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ ที่ผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในภายหลัง

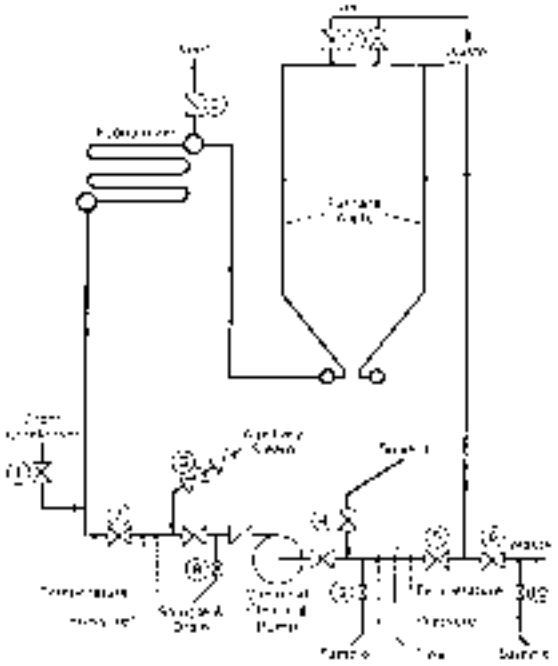
5. ล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อไล่ตะกรันและน้ำยาล้างต่าง ๆ ที่ตกค้างอยู่

ในการล้างขั้นตอนนี้สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

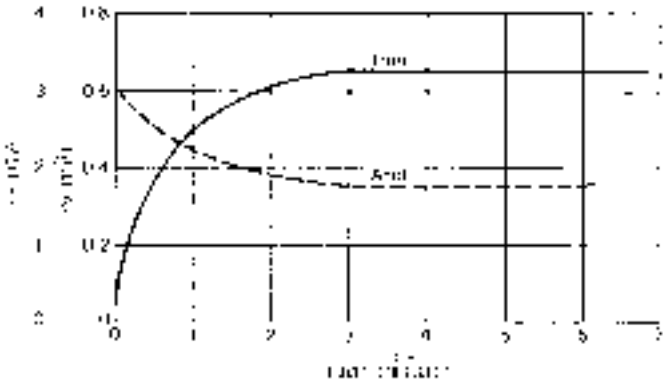
ก. โดยการหมุนเวียน (Circulation)

ข. การแช่ (Soaking)

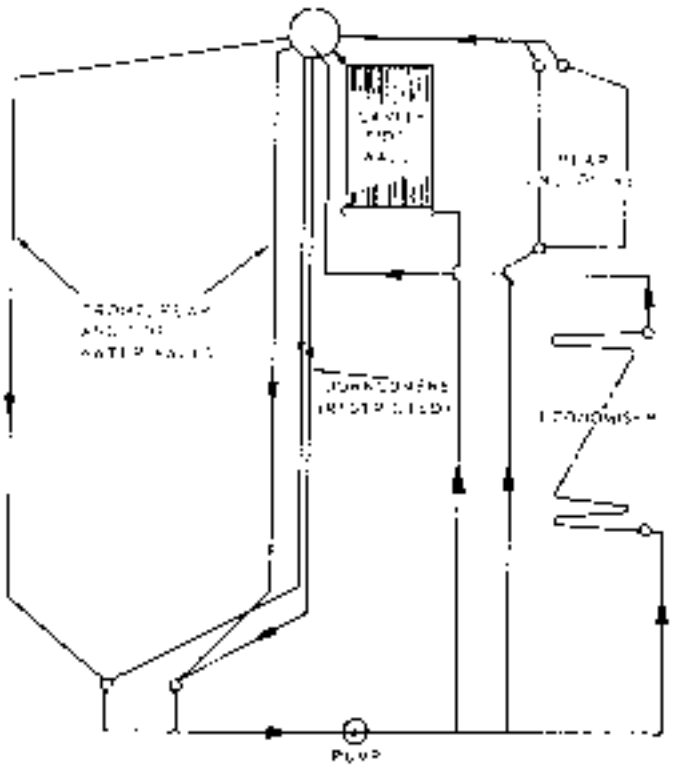
ก. แบบไหลหมุนเวียน



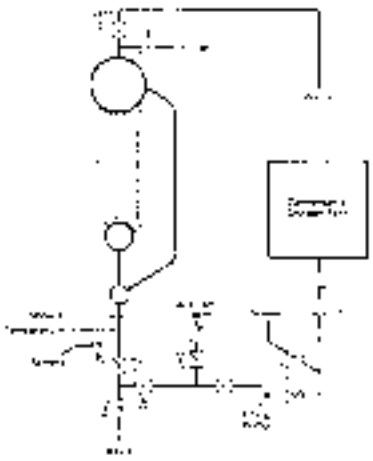
รูปที่ ก.๑ ระบบการย้างแบบไหลหมุนเวียน



รูปที่ ก.๒ ความเข้มข้นของก๊าซและของเหลวที่ขอบเขตสถานะ ๑



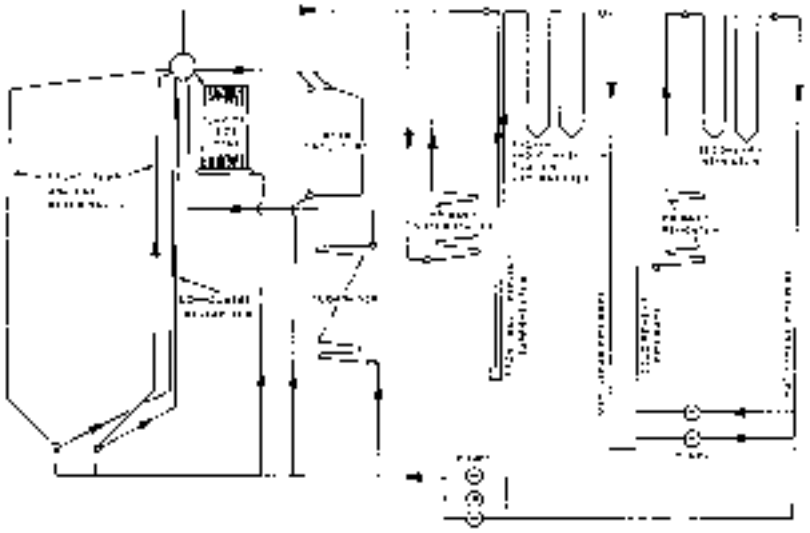
รูปที่ 11.13 การติดตั้งเครื่องผสมอิมัลชันแบบไหลหมุนเวียน



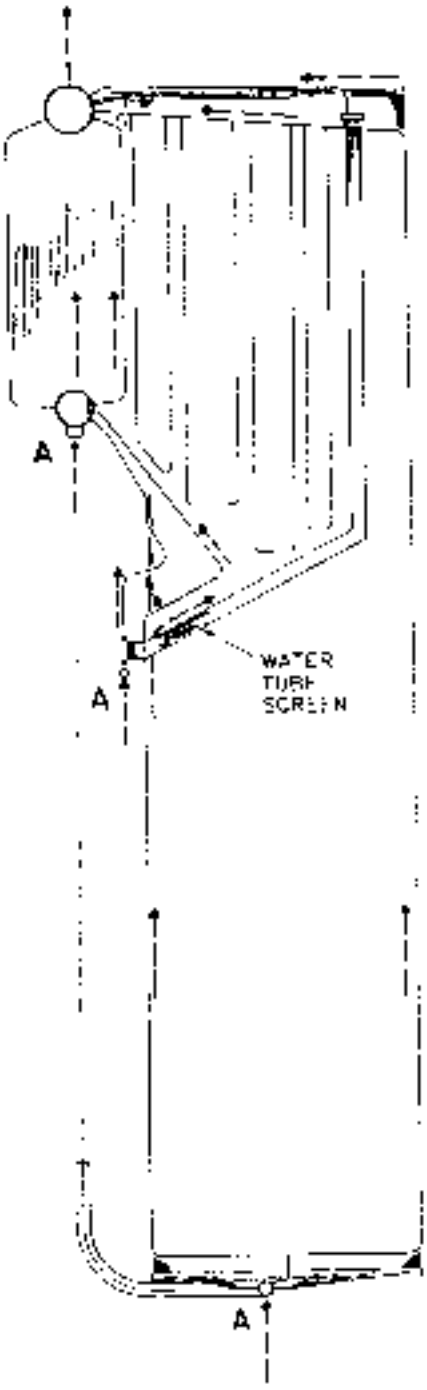
รูปที่ ๑.๑๘ การล้างแบบกลับ

ข. แบบแช่

การล้างแบบแช่นั้นจะใส่น้ำยาในถังแช่ตามและแช่ทิ้งไว้นาน ๑-๘ ชั่วโมง ขึ้นกับสนิมและชนิดของตะกรัน น้ำยาที่ใช้ล้างอุ่นให้ร้อนพอควร ซึ่งจะช่วยล้างตะกรันออกได้ดีขึ้น วิธีการล้างแบบแช่นี้ ควรพิจารณาโดยละเอียดก่อนที่จะนำมาใช้ เพราะถ้าไม่มีการควบคุมที่ดีพอ อาจเกิดการกัดกร่อนของเนื้อโลหะได้ การล้างแบบนี้ต้องใช้ความชำนาญพิเศษ และจุดที่ไม่เหมาะสมที่สุดของน้ำยาในระบบก็คือ การล้างแบบนี้ต้องใช้ความชำนาญพิเศษ และจุดที่ไม่เหมาะสมที่สุดของน้ำยาในระบบก็คือ การล้างแบบไหลหมุนเวียน ที่ต้องเพื่อความเข้มข้นของกรดที่ลดลงจากการทำปฏิกิริยากับสนิมและตะกรันในขณะล้าง จะได้ผลไม่เท่าที่ การล้างแบบแช่นี้มีข้อดีคือ ล้างง่าย ไม่ต้องดัดแปลงหรือต่อท่อมาก ทุกส่วนที่ในถังจะถูกกับน้ำยาล้างที่เข้มข้นและการควบคุมก็ได้ง่ายกว่า



รูปที่ ๑.๑๙ การล้างด้วยกรดซิตริกแบบไหลหมุนเวียน



รูปที่ [illegible] ภาพตัดขวางแสดงไอน้ำแบบหลอดน้ำไฟตรงภายในมีการผสมเข้าไปในส่วน เช่น
การติดตั้ง [illegible] ตำแหน่งที่ผสมเข้าไปที่ลูกศรชี้ (A)

11.7.3 โปรแกรมการล้าง

1. **ล้างด้วยน้ำ** โดยการฉีดน้ำเพื่อให้ผู้ป่วยได้รับการล้าง ความดันของน้ำที่ฉีดไม่ควรสูงเกินไป และควรมีการป้องกันการปนเปื้อนจากแหล่งอื่น ๆ ที่อาจทำให้เกิดการติดเชื้อขึ้นได้

2. **ต้มด้วยด่าง** เพื่อล้างคราบน้ำมัน ขนาดที่ใช้โซดาไฟ แคลิโดรไซเดียมฟอสเฟต ผสมสารช่วย Wetting Agent ให้ใช้น้ำยาเข้มข้น ๑๐ โดยน้ำหนัก ผู้ป่วยที่มีอุณหภูมิสูงสุดก่อนที่จะทำให้เย็นในคราวเดียวอยู่นาน ๑ ชั่วโมง

3. **ล้างด้วยกรดหรือสารละลายอื่นที่ต้องการใช้ในการขจัดคราบกรด** การล้างจะให้ถูกต้องหมดจดเรียบร้อยนั้นจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อป้องกันไม่ให้ความเข้มข้นของสารที่ใช้ขจัดคราบกรดนั้นมีมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะได้ ดังนั้นการล้างจึงต้องทำอย่างถูกต้อง ให้ใช้อัตราการไหลของน้ำล้างอย่างน้อย ๑-๒ ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ต่อไปอีกประมาณ ๑ ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง เพราะจะเสียเวลาในการล้างมากขึ้น ในการใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ๑-๑๐ โดยน้ำหนัก พร้อมด้วยสารยับยั้งการกัดกร่อน Wetting Agent และสารอื่นที่จำเป็น ผู้ป่วยที่มีอุณหภูมิสูงสุดก่อนที่จะทำให้เย็นในคราวเดียวอยู่นาน ๑ ชั่วโมง

ตารางที่ 11.3 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่มีต่อการขจัดคราบกรดของสารเคมีชนิดต่าง ๆ

สารเคมีที่ใช้ล้างคราบกรดและสภาวะในการล้าง	ค่าความเป็น พีเอชที่					
	หยุดน้ำ	๐.๕	๐.๗	๑	๒	๓
กรดไฮโดรคลอริก ๕๐	๐	๐	๐	๐	๐	๐
ผสมด้วย ๐.๑ ปริมาตรของสารยับยั้ง						
กรดไฮโดรคลอริก ๑๐	๐		๐	๐	๐	
ผสมด้วย ๐.๑ ปริมาตรของสารยับยั้ง						
Ammonium Citrate ๒๐	X	X	X	๐	๐	๐
ผสมด้วย ๐.๑ ปริมาตรของสารยับยั้ง						
Ethylene Diaminetetraacetic Acid ๒๐	๐	X	X	๐	๐	๐
ผสมด้วย ๐.๑ ปริมาตรของสารยับยั้ง						
Ammonium EDTA ๒๐		X	X	๐	๐	๐
ผสมด้วย ๐.๑ ปริมาตรของสารยับยั้ง						

หมายเหตุ X หมายถึง ไม่สามารถขจัดคราบกรดได้หมดจด

๐ หมายถึง ขจัดคราบกรดได้หมดจด

การล้างด้วยสารเคมีจะต้องมีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารเคมี (ดูตารางที่ ๑๑.๓) และต้องมีการวัดค่าความเป็นกรดด่างของน้ำล้างที่ไหลออกมาด้วย ซึ่งอาจทำได้โดยใช้กระดาษลิตมัส หรือใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH Meter) ในการล้างจะต้องมีการหมุนเวียนน้ำล้างผ่านเครื่องกรองน้ำ (Demineralizer) ที่ใช้ในระบบด้วย เพื่อให้แน่ใจว่าสารเคมีที่ใช้ล้างจะถูกขจัดออกไปจากระบบจนหมดสิ้น ในการล้างนี้ควรจะมีการใช้ความร้อนช่วยด้วย โดยการต้มน้ำล้างในถังต้มน้ำ (Low Pressure Heater) ก่อนที่จะนำน้ำร้อนนี้ไปใช้ในการล้าง ถังต้มน้ำ High Pressure ระบบท่อน้ำ ปั๊มน้ำ ผสมสารเคมี ท่อน้ำ ถังกรองน้ำ (Demineralizer) ท่อน้ำในระบบล้างทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เป็นท่อน้ำร้อน ควรจะต้องมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนไว้ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ในการล้างนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวางแผนการล้างให้ดีก่อนที่จะลงมือปฏิบัติงานจริง

(Austenitic) ชนิด Austenitic ที่ผ่านการหลอมละลายในน้ำ น้ำยาที่ใช้ในการล้างจะต้องไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ เพราะจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ดังนั้นจึงใช้กรดอินทรีย์ล้างแทน

กรดที่นิยมใช้กันมากเป็นพวกกรดอินทรีย์ผสม เช่น

1. กรดไฮโดรฟลูออริกและกรดฟอร์มิก
2. กรดซิตริก

เนื่องจากกรดอินทรีย์เหล่านี้ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายมาก จึงต้องมีการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitor) ผสมลงไปด้วย ในการล้างจะต้องปั๊มกรดขึ้นมาหมุนเวียนในระบบ ประมาณ 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C จึงจะถือว่าสะอาดพอ (ในกรณีที่ใช้กรดอินทรีย์ล้างเพียงอย่างเดียวจะใช้เวลานานถึง 8 ชั่วโมง)

สำหรับขั้นตอนต่าง ๆ ในหม้อไอน้ำ มีรายละเอียดสรุปดังนี้

1. **ล้างด้วยน้ำ (Water Rinse)** ก่อนการล้างด้วยกรดอินทรีย์ ให้ล้างด้วยน้ำสะอาดก่อน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมากับหม้อไอน้ำ เช่น ตะกรัน ตะกอน ฯลฯ ออกให้หมด ในการล้างจะต้องปั๊มน้ำขึ้นมาหมุนเวียนในระบบประมาณ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C จึงจะถือว่าสะอาดพอ (ในกรณีที่ใช้กรดอินทรีย์ล้างเพียงอย่างเดียวจะใช้เวลานานถึง 8 ชั่วโมง)

2. **ล้างด้วยด่าง (Alkaline Rinse)** ก่อนการล้างด้วยกรดอินทรีย์ ให้ล้างด้วยด่างก่อน เพื่อกำจัดน้ำมันและไขมันที่ปนเปื้อนมากับน้ำป้อน ซึ่งน้ำมันและไขมันเหล่านี้จะทำให้เกิดฟองในขณะล้างด้วยกรด ทำให้ประสิทธิภาพในการล้างลดลง ด่างที่นิยมนำมาใช้ล้างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาแอช (Na_2CO_3) ใช้ประมาณ 1% ผสมกับน้ำ ปั๊มขึ้นมาหมุนเวียนในระบบ ประมาณ 4-6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C

3. **ล้างด้วยกรด (Acid Rinse)** ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด ในการล้างจะต้องปั๊มกรดขึ้นมาหมุนเวียนในระบบ ประมาณ 4-8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C ดังนี้

กรดฟอร์มิก	1 %
กรดไฮโดรคลอริก	2 %
สารยับยั้งการกัดกร่อน	0.25-0.5 %
Wetting Agent	0.05 %

ให้อุณหภูมิของสารละลายกรดอยู่ที่ 100 ถึง 110 °C เมื่อปั๊มให้หมุนเวียนในระบบประมาณ 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะปล่อยทิ้งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย

4. **ล้างด้วยกรด (Acid Rinse)** หลังจากล้างหมุนเวียนด้วยกรดอินทรีย์แล้ว ให้ล้างด้วยกรดซ้ำอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้แน่ใจว่าสิ่งสกปรกที่ติดมากับหม้อไอน้ำได้ถูกกำจัดออกไปหมดแล้ว ให้ใช้กรดซิตริกความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก ล้างหมุนเวียนในระบบประมาณ 4 ชั่วโมง ถ้าไม่ได้ล้างด้วยกรดอินทรีย์ก่อน ให้ใช้น้ำล้างออกก่อนที่จะล้างด้วยกรดซิตริก

5. **การสร้างฟิล์มเฉื่อย (Passivation)** โดยการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวเหล็กเนื้อในเกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ ขึ้นมาป้องกันการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นต่อไป ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้กันมากคือ ไฮดราซีน (N_2H_4) ที่ความเข้มข้น 200 ppm ที่อุณหภูมิ 120 °C ปั๊มหมุนเวียนในระบบประมาณ 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะปล่อยทิ้งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย

เริ่มสูญเสียเสถียรภาพเมื่ออุณหภูมิใกล้ 1,455 °C จะเริ่มเปลี่ยนเป็นเฟอร์รัสออกไซด์ ในกรณีที่มีอุณหภูมิ
ปกติ และอากาศมีความชื้นสูงก็จะทำให้เกิดสนิมได้ง่ายขึ้นด้วย วิธีทำให้เกิดชั้นป้องกันการกัดกร่อนโดยวิธี
หลักที่ใช้งานได้ต่างกัน ต่อมาได้มีการใช้โซเดียมฟอสเฟตร่วมด้วย [๑๙] วิธีใช้ไฮดราซีนและฟอสเฟตจึงเป็นส่วน
ผสมหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากออกซิเจน

การใช้ไฮดราซีนกำจัดออกซิเจนที่ใช้ปริมาณ 300-600 พีพีบี และปรับค่า pH ด้วยแอมโมเนีย
ปริมาณ 50-100 พีพีเอ็ม หลังจากนั้นอุ่นสารละลายให้ร้อนขึ้นโดยเพิ่มความดันเป็น 200-600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
และให้น้ำอยู่ในระบบเวียนอยู่นานราว 24 ชั่วโมง เพื่อให้มีเวลานานพอที่ไฮดราซีนจะทำปฏิกิริยากับออก
ซิเจนได้สมบูรณ์

$$6\,Fe_2O_3 + N_2H_4 \rightarrow 4\,Fe_3O_4 + N_2 + 2\,H_2O$$

อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นราว 300 °C ปฏิกิริยาของไฮดราซีนจะเกิดได้ในเวลาสั้น ๆ ถ้าต้องการให้
ไฮดราซีนในไดเจน (NaNO$_2$) เพราะ

นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอีกหลายชนิดที่ใช้สร้างฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนได้ เช่น ด่างไฮดรอกไซ
ไฮดราซีน (ไฮดราซีนไฮเดรต) ฟอสฟอริกแอซิด ซิลิเคต เช่น Na_2PO_4, Na_2HPO_4, NaH_2PO_4 ไตรเอทา
นอลเอมีน Triethanolamine ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่เป็นสนิม เช่น Fe_2O_3, CuO, ZnO และ
ซิลิกอน

11.8 การล้างตะกรันทองแดงในเครื่องกังหันไอน้ำ

ตะกรันทองแดงมักจะอยู่ในรูปของไดแอมมีนคอปเปอร์ไดไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของ
เครื่องกังหันไอน้ำลดลงได้มาก วิธีการล้างตะกรันทองแดงออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำให้ผู้ใช้
ทำงานนั้นมักใช้ตะกรันซึ่งประกอบด้วย 10% Ethylenediamine และ 7.5 % Hydroxylamine
Hydrosulfate ทั้งนี้ควรปรับค่าให้เป็นด่างด้วย Ethylenediamine เป็นสารประกอบเชิงซ้อน

$$Cu^{+} + 2NH_2CH_2CH_2NH_2 \rightarrow Cu[NH_2CH_2CH_2NH_2]^{+} \qquad K = 4.0 \times 10^{10}$$

$$Cu^{++} + 2NH_2CH_2CH_2NH_2 \rightarrow Cu[NH_2CH_2CH_2NH_2]^{++} \qquad K = 1.0 \times 10^{20}$$

บรรณานุกรม

1. Acid Cleaning of Iron and Steel, **Metal Handbook**. Vol.2. Ohio : American Society of Metals, 1964
2. **BETZ Handbook** of Industrial Water Conditioning. 9th ed. Betz Laboratories, Trevose, 1980.
3. Bregman, J.I. **Corrosion Inhibitors**. New York : The MacmillanCo., 1963.
4. CEGB. **Modern Power Station Practice-Vol.5 Chemistry and Metallurgy**. Oxford : Pergamon Press, 1971.
5. Chaberek, S. and Martell, A.E. **Organic Sequestering Agents**. New York : John Wiley & Sons, 1959.
6. "Corrosion Inhibition : Principles and Practice." in **Corrosion Vol. 2 Corrosion Control**. ed. by L.L. Shreir, Newnes - Butterworths. London, 1977.
7. "Corrosion Inhibitors." in the **Encyclopedia of Electrochemistry**. ed. by C.A. Hampel. New York : Reinhold Publishing Corp., 1964.
8. Eldredge, G.G. and Warner, J.C. "Inhibitors and Passivators." in **Corrosion Handbook** edited by H.H. Uhlig. New York : John Wiley & Sons, 1948.
9. Engle, J.P. "Cleaning Boiler Tube Chemically." **Chemical Engineering**. (October 16, 1972)
10. Jean W. McCoy. **Industrial Chemical Cleaning**. Chemical Publishing Co., 1984
11. Loucks C.M. "Chemical Cleaning." in **the Encyclopedia of Chemical Process Equipment**. ed. by W.J. Mead. New York : Reinhold Publishing Corp., 1964
12. Metal Finishing Clean-up-Symposium Paper. Australian Institute of Metal Finishing, 1977.
13. Murphy, V.P. "Chemical Cleaning Industrial Steam Generators." **Combustion**. (May 1979).
14. Nathan, C.C. "Corrosion Inhibitors." in **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**. New York : John Wiley & Sons, 1966.
15. Navitsky, G.J. and Gabrielli, F. "Boiler Water Treatment, Feedwater Treatment and Chemical Cleaning of Drum Type Utility Steam Generators." **Combustion** (August 1980)

16. Rudnick, A.H. "Safe Chemical Cleaning the Organic Way." **Chemical Engineering.** (July 31, 1975).

17. **Steam/its Generation and Use.** New York : The Babcock & Wilcox Co., 1972

18. Strachill, M. **Modern Practice in the Pickling of Metals and Related Process.** Teddington : Robert Draper, 1968.

19. Swift, R. "Chemical Cleaning of Heat Transfer Surfaces Reduce Losses." in **The Chartered Mechanical Engineer.** London.

20. Weeks, R.H. "Boiler Cleaning : Knowing When and How is Important." **Pulp and Paper** (November 1970)

12 การเก็บรักษาหม้อไอน้ำที่หยุดใช้งาน

ในการหยุดเดินเครื่องหม้อไอน้ำเป็นระยะเวลานาน อาจจะไม่มีวิธีการใดที่จะรักษาหม้อไอน้ำในช่วงที่หยุดใช้งานได้ดีเท่ากับการนำหม้อไอน้ำขึ้นใช้งานอีกครั้ง ซึ่งเป็นการขจัดสาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนต่างๆ ภายในหม้อไอน้ำออกไปได้ เช่น ออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และตะกอนต่างๆ ที่ติดค้างอยู่ภายในหม้อไอน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนและสึกหรอได้ง่าย การจัดเก็บรักษาหม้อไอน้ำที่หยุดใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ นั้น จำเป็นต้องมีการป้องกันการกัดกร่อนภายในหม้อไอน้ำ ซึ่งเกิดจากสาเหตุต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. หยุดชั่วคราว (Intermittent Standby) คือการหยุดใช้งานหม้อไอน้ำในช่วงเวลาสั้นๆ หม้อไอน้ำยังคงมีสภาพพร้อมที่จะใช้งานได้ตลอดเวลา

2. หยุดเป็นเวลานาน (Prolonged Standby) คือการหยุดใช้งานเป็นระยะเวลานาน

12.1 การหยุดชั่วคราว

เมื่อจะหยุดใช้งานต้องทำน้ำในหม้อไอน้ำลดอยู่ระดับปกติหรือค่อนข้างสูงเล็กน้อย เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำในหม้อไอน้ำอยู่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส ในขณะน้ำยังมีสภาพร้อนอยู่บ้าง น้ำในหม้อไอน้ำควรมีค่า pH ประมาณ 10-11 เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด ถ้าหากค่า pH ลดต่ำกว่านี้ต้องเติมสารเคมีประเภทด่างเพื่อเพิ่มค่า pH ให้สูงขึ้น ระดับน้ำในหม้อไอน้ำต้องเต็มจนเกือบจะล้นออกทางจุดจ่าย ซึ่งต้องคอยเติมน้ำอยู่เสมอเพื่อรักษาระดับน้ำดังกล่าวไว้ ทั้งนี้

มีละลายน้ำแล้วจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ ในกรณีที่น้ำที่เติมเข้าไปมีสภาพเป็นกรดจนกระทั่งค่า pH ต่ำกว่าที่ต้องการจะไม่เกิดการกัดกร่อน แต่น้ำที่เติมมีสภาพเป็นด่างหรือมีค่า pH สูงกว่าที่กำหนด จะทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นในบางแห่งหรือทั่วไป ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมค่า pH ของน้ำให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้สารเคมีพวกโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) โดยใส่ลงไปในน้ำจนมีสภาพเป็นด่างประมาณ 8.5 ถึง 9.0 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสม

ในกรณีที่มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นแล้ว แต่สภาพน้ำที่เติมเข้าไปมีการกัดกร่อนต่ำมาก หรือไม่มีเลย เช่น กรณีที่มีน้ำมันรั่วไหลเข้าไปในน้ำที่เติมเข้าไป ซึ่งน้ำมันจะเคลือบผิวโลหะไว้ ทำให้น้ำที่เติมเข้าไปไม่สามารถสัมผัสกับผิวโลหะได้ ดังนั้นจึงไม่มีการกัดกร่อนเกิดขึ้น

12.2 การหยุดเป็นเวลานาน

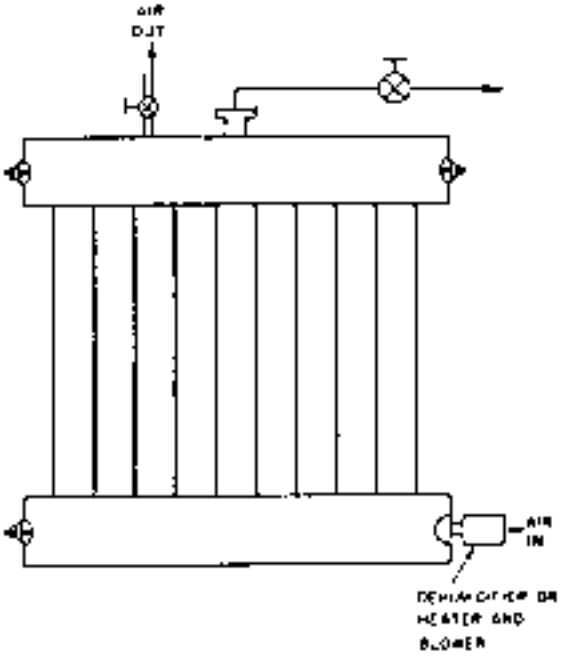
มีวิธีการดังนี้ 2 วิธีคือ

1. เก็บแบบแห้ง
2. เก็บแบบเปียก

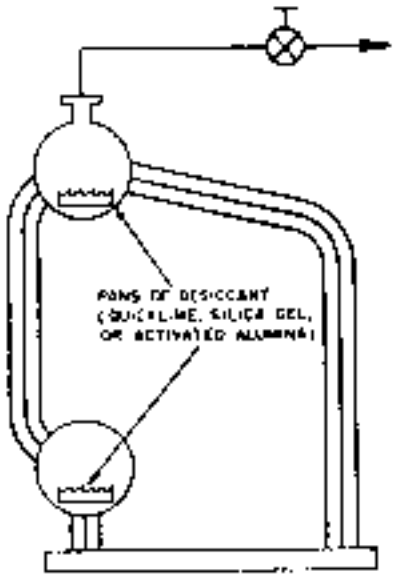
12.2.1 การเก็บรักษาแบบแห้ง

1. **ใช้ความร้อน** ก่อนอื่นต้องนำหม้อน้ำออกมาให้หมดและใช้น้ำที่มีแรงดันสูงฉีดล้างสิ่งสกปรกต่างๆ ออกมาให้หมด หลังจากนั้นต้องไล่น้ำและความชื้นออกให้หมดสิ้น โดยการต้มน้ำออกอย่างน้อยครึ่งหนึ่ง เพื่อไม่ให้ตะกอนหรือแคลเซียมต่างๆ (Dissolved Solids) ที่มีอยู่ในน้ำตกค้างอยู่บนผิวหม้อน้ำได้ เพราะจะเป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อนได้ เมื่อต้มน้ำทิ้งแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง จนความดันภายในลดลงเหลือ 0.7-1 kg/cm² (10-15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) หลังจากนี้จึงเติมโซเดียมซัลไฟต์เข้าไปในหม้อน้ำ ส่วนร้อยนี้จะมีปริมาณอยู่ประมาณ 10% ของความจุของหม้อน้ำ ความร้อนที่มีอยู่ในหม้อน้ำจะทำให้โซเดียมซัลไฟต์ละลายน้ำได้ดีขึ้น และจะทำน้ำจะสร้างสนิมขึ้นมาทดแทนสนิมเดิมที่ถูกกัดกร่อนไปแล้ว ดังนั้นจึงต้องมีการเติมโซเดียมซัลไฟต์ลงไปในน้ำให้ได้ปริมาณ 40 ppm ตลอดเวลา หลังจากนี้ให้หยุดต้มร้อน และปล่อยความร้อนออกจากหม้อน้ำให้เย็นลงตามธรรมชาติ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศต้องมีความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 40 ตัววิธีการดังกล่าวข้างต้นนี้จะเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการเก็บรักษาหม้อน้ำได้ 2 แบบคือ

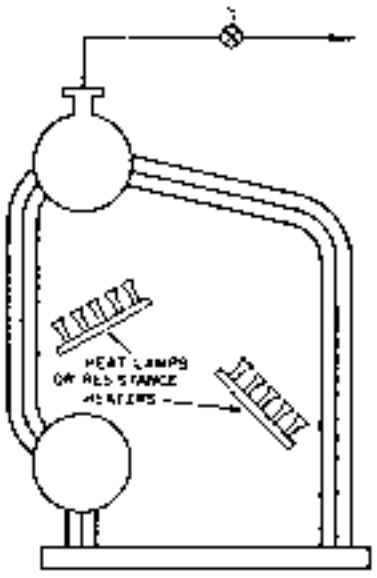
ก) ใส่สารดูดความชื้นคือ Silica gel และ Activated alumina ในปริมาณ 50 ปอนด์ต่อ 1,000 ลูกบาศก์ฟุตของการหักไอน้ำที่ใช้ในครั้ง ถ้าใช้ Calcium chloride ก็จะดีที่ใส่จะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะใส่ได้ปริมาณ 3 เท่าของที่ใช้ ทั้งนี้เพราะเมื่อแคลเซียมคลอไรด์ดูดความชื้นแล้วจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจะต้องเผื่อความจุมากๆ ขณะที่ใส่ให้ระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพราะถ้าแคลเซียมคลอไรด์สัมผัสกับผิวโลหะจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเป็นหลุมเป็นบ่อได้ เมื่อเติมสารดูดความชื้นแล้วต้องปิดฝาหม้อน้ำให้สนิท ไม่ให้มีอากาศภายนอกเข้าไปได้ และควรมีการเปิดดูเป็นครั้งคราวประมาณเดือนละครั้ง เพื่อดูการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นด้วย



รูปที่ 12.1 การเก็บรักษาแบบแห้งโดยใช้ลมร้อน



รูปที่ 12.2 การเก็บรักษาแบบแห้งโดยใส่สารดูดความชื้น



รูปที่ 12.3 การเก็บรักษาแบบแห้งโดยใช้ความร้อนจากหลอดไฟ

ตารางที่ ... ปริมาณการดูดความชื้นที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

ชนิดของการดูดความชื้น	ปริมาณที่ใช้ kg ต่อ m³
Lime (Quick Lime)	0.5
Silica gel	1.5
Activated alumina	1.8
Calcium chloride	1.0
Molecular	1.5

(2) *ใช้อากาศแห้งที่อุณหภูมิปกติ* โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 60 เป่าเข้าไปในหม้อไอน้ำ ระหว่างเวลาที่หยุดใช้งาน

เมื่อจะเริ่มเดินเครื่องใช้งานหม้อน้ำต้องจะต้องเติมน้ำเข้าไป ซึ่งน้ำเลี้ยงที่เข้าไปนี้จะมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซอยู่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากออกซิเจนได้ โดยเติมไฮดราซีน (N_2H_4) เข้าไปในน้ำเลี้ยงในอัตรา 100 มิลลิลิตรต่อลิตรของน้ำเลี้ยง

2. **ใช้ก๊าซแอมโมเนีย** วิธีนี้จะใช้สำหรับหม้อไอน้ำที่ต้องจ่ายน้ำทั้งหมดหรือเพียงบางส่วน และในกรณีที่จะเหยน้ำกลับในหม้อไอน้ำออกไปหมด ในกรณีนี้ให้จ่ายน้ำออกจากหม้อไอน้ำตรงบริเวณที่ลึกสุด และในขณะเดียวกันก็เติมก๊าซแอมโมเนียจากจุดที่อยู่สูงสุดของหม้อไอน้ำ ขณะที่เครื่องกำเนิดไอน้ำเดินเครื่องอยู่ และเชื่อมต่อที่เข้าน้ำซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของหม้อไอน้ำ หลังจากนั้นความดันน้ำเลี้ยงที่เติมแอมโมเนียต่อจนกระทั่งความดันภายในหม้อไอน้ำประมาณ 0.1–0.5 kg/cm² และต้องมั่นใจให้ความดันอยู่ในช่วงนี้ตลอดระยะเวลาการหยุดใช้งาน

หลักการเบื้องต้นของวิธีนี้คือ ธรรมชาติแอมโมเนียที่อยู่ภายในหม้อไอน้ำจะมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ดังนั้นจึงจะดูดได้ดีในน้ำ ทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ไม่หมด น้ำจะมีสภาพเป็นด่าง น้ำที่มีแอมโมเนียและออกซิเจนละลายอยู่จะกัดกร่อนอุปกรณ์ที่เป็นโลหะผสมทองแดง โลหะผสมของทองแดงและนิกเกิลได้ ฉะนั้นถ้าหากจะใช้วิธีการนี้ต้องไม่อุปกรณ์ที่มีโลหะเหล่านี้ออกไปก่อน ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งก็คือ เมื่อแอมโมเนียผสมกับอากาศ ถ้ามีก๊าซแอมโมเนียอยู่ร้อยละ 16–27 โดยปริมาตร ส่วนผสมนี้จะมีคุณสมบัติระเบิดได้ง่าย ดังนั้น ในการดำเนินการด้วยวิธีนี้ต้องระมัดระวังอย่าให้มีไฟหรือแสงสว่างที่จะทำให้เกิดการระเบิดได้เข้าไปในหม้อไอน้ำ เมื่อต้องการจะใช้งานหม้อไอน้ำอีก ต้องไล่ก๊าซแอมโมเนียออกให้หมดโดยการเป่าลมเข้าไปตามวิธีการที่กล่าวมาแล้ว

3. **ใช้ก๊าซไนโตรเจน** จุดประสงค์ในการใช้ก๊าซไนโตรเจนก็เพื่อขจัดก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศภายในหม้อไอน้ำออกไปให้หมดสิ้น ก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูง คือเป็นไนโตรเจนที่มีออกซิเจนผสมอยู่ไม่มากกว่าร้อยละ 0.1 การกับรักษาด้วยก๊าซไนโตรเจนนี้ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ไม่ได้ติดตั้งที่ดูเปอร์ฮีทเตอร์ และ Preheater เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่านี้ยังมีราคาแพงมาก เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย จึงลดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ต้องใช้ให้เหลือเพียงน้ำหนักน้ำที่ป้องกันการออกซิเจนก่อนและไล่น้ำออกโดยอัดก๊าซไนโตรเจนประมาณ 0.1 ไปในขณะที่น้ำกำลังอยู่นั้น จะต้องให้ไนโตรเจนมีความดันประมาณ 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

๑๒.๒.๒ การเก็บรักษาแบบเปียก

การเก็บแบบเปียก คือการเก็บโดยมีน้ำแทรกอยู่ตลอดเวลา และการป้องกันการผุกร่อนนั้นให้ทำขึ้นในขั้นตอนที่ใช้งาน โดยวิธีการทางเคมี และการใช้การเคลือบเพื่อกันออกซิเจนไม่ให้ไปทำปฏิกิริยากับเหล็กได้ ถ้าต้องมีการเก็บหม้อไอน้ำทั้งสองวิธีผสมกัน

๑. วิธีการป้องกันไม่ให้มีออกซิเจนค้าง ถ้าต้องการเก็บไว้เพียงไม่กี่วันก็ให้ระบายน้ำออกจากหม้อไอน้ำในระดับไว้จากเกจน้ำ โดยยังอุ่นให้ร้อนและให้มีความดัน ๒-๕ kg/cm² ข้อดีของวิธีนี้ที่ใช้กับหม้อไอน้ำที่มีการไหลเวียนตามธรรมชาติและแบบไหลตลอด (Continuous Flow) ข้อเสียคือเสียค่าใช้จ่ายสูง

ในกรณีที่ต้องเก็บไว้นาน ๆ เป็นสัปดาห์หรือเป็นเดือน ให้ใช้วิธีการต่อไปนี้ ซึ่งจะต้องใช้ต่อเมื่อได้ทำความสะอาดหม้อไอน้ำแล้ว ต้องเติมน้ำที่ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized water) และทำการอุ่น ๆ เข้าไปในหม้อซูเปอร์ฮีท โดยที่ในหม้อไอน้ำจะต้องมีความดันประมาณ ๑ kg/cm² เพื่อขับไล่น้ำที่เป็นตัวออกซิเจน ๑๒๐ องศาเซลเซียส จะต้องเติมน้ำเข้าทางหม้อน้ำเลี้ยงหรือท่อต่อพ่วงเติมเข้าหม้อซูเปอร์ฮีท ทั้งนี้เพื่อรักษาความดันให้อยู่ประมาณ ๒-๕ kg/cm² ในขณะเดียวกันก็ต้องปล่อยน้ำออกจากหม้อไอน้ำทางเกจวัดระดับน้ำด้วย ๒-๕ kg/cm² ตลอดเวลาต้องอัดก๊าซไนโตรเจนหรือไอน้ำเข้าไปเพื่อให้มีความดันอยู่ด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้มีออกซิเจนซึมเข้าไปในหม้อไอน้ำได้

เมื่อจะเริ่มใช้งานหม้อไอน้ำก็ต้องพยายามป้องกันมิให้ออกซิเจนเข้าไปในหม้อไอน้ำได้ โดยอาจจะใช้น้ำเลี้ยงที่ปราศจากออกซิเจน หรือสำหรับหม้อไอน้ำทางแบบ จะต้องลดระดับน้ำในถังพักน้ำจนพอดีกับเกจน้ำ ที่ใช้ต่อจะต้องมีออกซิเจนแล้วออกไปได้ ในขณะที่เริ่มจุดเตาเข้าไปนั้น การที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ จะทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการผุกร่อนได้มาก วิธีกระทำก็โดยไม่ให้มีออกซิเจนซึมเข้าไปได้นั่น ทำได้โดยต้มน้ำออกจากหม้อไอน้ำจนได้ระดับตามที่ต้องการ หรือโดยการต้มน้ำจากถังพักน้ำให้เดือดโดยใช้ไอน้ำหรือน้ำเลี้ยงที่มีอุณหภูมิประมาณ ๑๐๐ องศาเซลเซียสก็ได้ อีกวิธีหนึ่งก็โดยใช้ไฮดราซีน (N_2H_4) ใส่ลงในน้ำหม้อไอน้ำในปริมาณ ๑๐๐ มิลลิกรัม ต่อน้ำ ๑ ลิตร ซึ่งวิธีนี้จะได้ผลเฉพาะบริเวณที่น้ำที่มีสภาพเป็นไฮดรอนเท่านั้น

๒. ใช้สารเคมี ในกรณีที่ที่ระบบหม้อไอน้ำของตนมีถังพักน้ำป้อนซึ่งมีไฟฟ้าเพื่อกำจัดออกซิเจนในน้ำ และต้องเติมด่างเพื่อปรับค่า pH ด้วย

$$2\,Na_2SO_3 + O_2 \longrightarrow 2\,Na_2SO_4$$

โซเดียมซัลไฟต์มีข้อเสียคือ ให้ตะกอนของโซเดียมซัลเฟตซึ่งละลายในน้ำและจะทำให้เพิ่มปริมาณของเนื้อในน้ำหม้อไอน้ำ ถ้าใช้ไฮดราซีนจะไม่มีตะกอนยกเว้นแต่มีอยู่ เพราะมีสภาพเป็นไฮดรอนเท่านั้น ปฏิกิริยาที่ออกซิเจนจะกลายเป็นน้ำและก๊าซไนโตรเจน

$$N_2H_4 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + N_2\uparrow$$

ถ้าอุณหภูมิสูงจะกลายเป็นแอมโมเนีย การใช้ไฮดราซีนกับรักษาหม้อไอน้ำจะเก็บได้ตั้งแต่ ๑ ปีขึ้นไป ในขณะที่ต้มหม้อไอน้ำจนได้ที่ ต้องป้องกันมิให้ออกซิเจนซึมเข้าไปในหม้อไอน้ำได้ ถ้าจะเติมหม้อไอน้ำด้วยน้ำควรจะเติมเสีย หรือน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากแก๊สต่าง ๆ การเติมไฮดราซีนก็ใช้ในอัตรา

เช่นไปในหม้อไอน้ำของเรา เป็นเหตุให้เหล็กในท่อระเหยเกิดการกัดกร่อนได้ และในช่วงนี้ต้องควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วง 10 ถึง 11 ด้วย ซึ่งสามารถใช้สารเคมีได้ดังนี้

ช่วงเวลาที่เก็บรักษา	มัลติฟอสเฟตต่อลิตรน้ำ
30 วันขึ้นไป	40-60
1 เดือน	30-40
2 เดือน	20-30 หรือมากกว่า

ในกรณีที่ไม่ได้ใช้น้ำบริสุทธิ์เติม ให้น้ำก่อนหรือน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเข้าสู่หม้อไอน้ำ จะต้องเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไฮดราซีนเป็น 200 ppm ขึ้นไป ในช่วงที่ปล่อยน้ำทิ้งออกจากหม้อไอน้ำไม่ต่ำกว่า 1 ไฮดราซีนจะทำปฏิกิริยาบางส่วน ดังนั้นจึงต้องเติมไฮดราซีนเข้าไปให้มากเกินพอในขั้นตอนนี้ด้วย และการเติมไฮดราซีนมากๆ จะทำให้เกิดปัญหาในการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงมีการใช้ไฮดราซีนมีเทลีนอยู่เป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมต่างๆ ปัจจุบันพบว่าปริมาณที่มีอยู่ลดน้อยลงมากกว่าครึ่งหนึ่งของเมื่อเริ่มแรกแล้ว ก็ยังคงมีไฮดราซีนเพิ่มขึ้นอีก และให้มีการกระจายอย่างทั่วถึงด้วย โดยใช้ปั๊มฉีดให้มีการไหลหมุนวนเวียน หรือใช้ระบบน้ำพ่นเข้าไปที่จุดต่ำสุดของหม้อน้ำ ถ้าหากจะมีการระบายน้ำออกจากหม้อไอน้ำบางส่วนหรือหมดเลยก็ตาม ก็ยังมีความจำเป็นที่จะต้องให้มีปริมาณไฮดราซีนคงอยู่ในน้ำอย่างน้อย 100 ppm เป็นอย่างน้อยด้วยเช่นกัน ในการเติมไฮดราซีนจะสามารถเติมได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบเป็นช่วงๆ ก็ได้ แต่ต้องมั่นใจว่าจะมีการผสมกันอย่างดีกับน้ำในหม้อไอน้ำ การเติมควรจะเติมในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ไฮดราซีนสลายตัวได้ดี เพื่อป้องกันมิให้มีการปนเปื้อนของแอมโมเนียเข้าไปในไอน้ำ ซึ่งต้องใช้ท่อจ่ายที่ออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับการนี้โดยเฉพาะ

2. **ใช้ Inhibitors** โดยใช้สารเคมีที่ทำให้เกิดเป็นชั้นป้องกันโลหะกันการกัดกร่อน (Protective Layer) และชั้นการกัดที่ดีขึ้น (Passivation) ตัวอย่างเช่น ดังนี้ คือทำให้ผิวเหล็กมีภูมิต้านทานต่อปฏิกิริยาการกัดกร่อน โดยทั่วไปนิยมใช้ฟอสเฟต ซิลิเกต ไนไตรต์ และ ฯลฯ ซึ่งมีความสามารถต่างกันไปตามคุณสมบัติ สารเคมีที่ใช้มีดังนี้

โซดาไฟ (NaOH)

โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4)

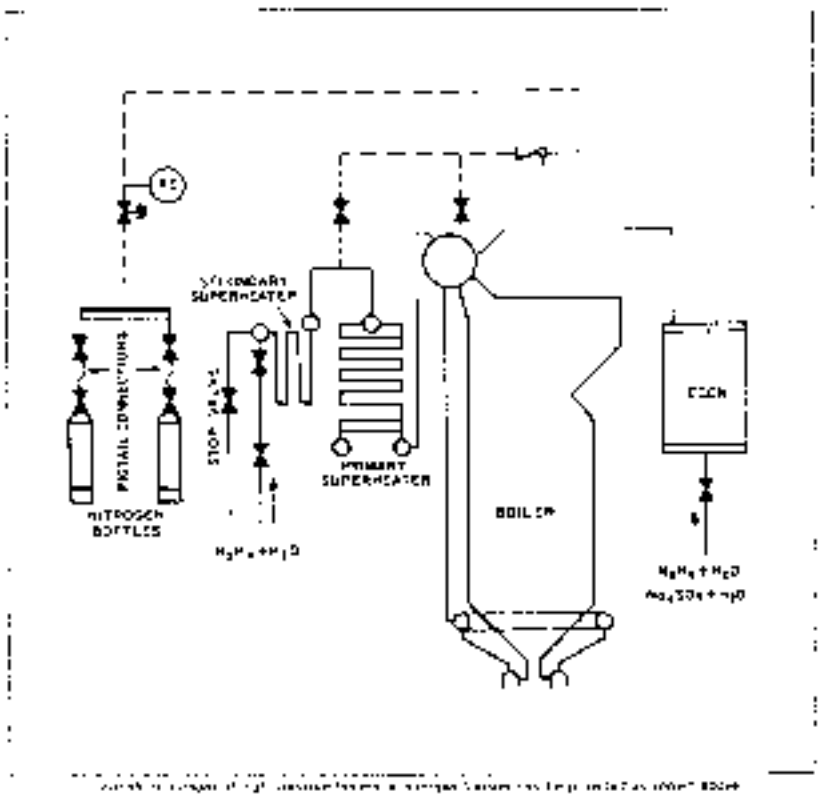
โพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4)

โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

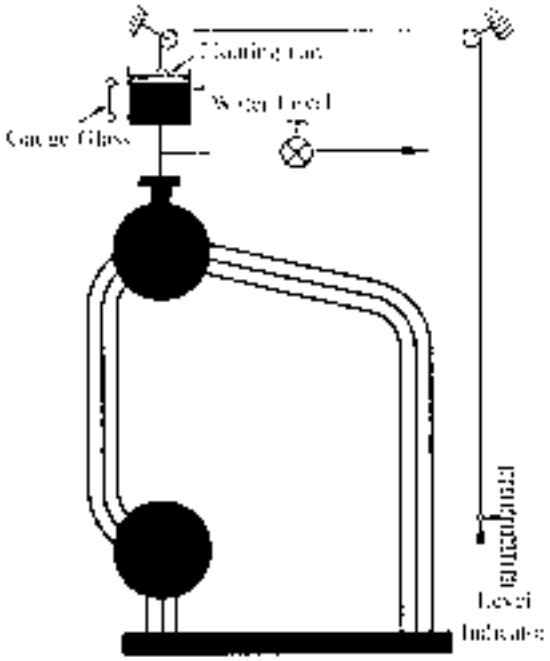
โซเดียมไนไตรท์ ($NaNO_2$)

โซดาไฟและโซเดียมฟอสเฟต เป็นสารที่ทำหน้าที่ให้เกิดเป็นชั้นป้องกันโลหะ ส่วนโครเมตและไนไตรท์ เป็น Passivator โพแทสเซียมโครเมตและโพแทสเซียมไดโครเมต เป็นให้ที่ระบบไอน้ำ ทั้งสองระบบนี้ ขึ้นกับสภาพแวดล้อม

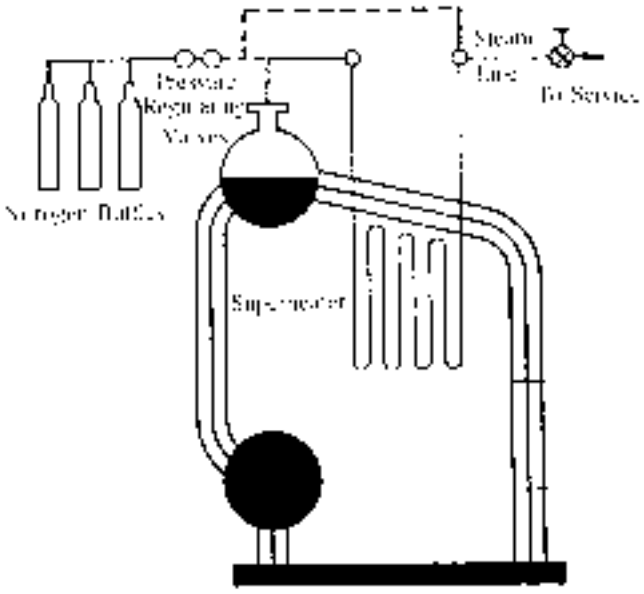
ถ้าน้ำโซดาไฟเข้าไปในหม้อไอน้ำ จะต้องมีความเข้มข้นเกิน 100 พีพีเอ็ม เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ถ้าความเข้มข้นต่ำกว่า 100 พีพีเอ็ม จะเกิดการกัดกร่อนได้ ดังนั้นจึงต้องรักษาความเข้มข้นนี้ไว้ตลอดเวลา โซดาไฟจะทำปฏิกิริยากับไม้ก่อให้เกิดแผ่นเคลือบ magnetite (Fe_3O_4) ที่เหล็กจะผุกร่อนได้ยาก วิธีที่จะรักษาระดับน้ำในหม้อไอน้ำ เมื่อเติมโซดาไฟเข้าไปนี้จะต้องมั่นใจว่าน้ำอยู่เสมอ จำได้ว่าแต่ละครั้งที่มีการเติมประมาณ 500 ppm ก็ให้ไหลเข้าหม้อไอน้ำ ในขณะนี้จะมีน้ำที่มีโซดาไฟและโซเดียมฟอสเฟตให้ตลอดเวลา



รูปที่ 11.4 การเริ่มจักรกลแบบใช้ความร้อนจากเคมี



รูปที่ 12.5 การเก็บรักษาแบบเปียกโดยการเติมน้ำให้ท่วม



รูปที่ 12.6 การเก็บรักษาแบบเปียกโดยการเติมน้ำและอัดก๊าซไนโตรเจน

12.8 การดับรักษาด้านที่สัมผัสไฟ

เมื่อมีการหกรดไม่ว่าจะเป็นไขมันหรือน้ำมันร้อนก็ตาม ให้รีบใช้ [illegible] ในการดับก่อนที่จะเกิดพุพองจากด้านที่ถูกผิวหนังด้านสัมผัสน้ำที่ใช้ล้างจะต้องเย็น โดยเฉพาะบริเวณที่สัมผัสกับก๊าซร้อน เช่น เครื่องดูดน้ำแข็ง เครื่องดูดควันดำ และรักษาดับอยู่ในกรณีนี้ ปกติจะมีสภาพเปียกชื้นอยู่เสมอ ถ้าเมื่อไรที่อุณหภูมิของผิวโลหะต่ำกว่าจุดน้ำค้าง จะมีการแข่งตัวเป็นหยดน้ำเกิดขึ้น และถ้าละอองเกาะอยู่เหล่านี้มีสภาพเป็นกรดอยู่แล้ว ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ วิธีป้องกันที่ดีที่สุดคือการล้างทำความสะอาดด้านสัมผัสไฟให้ทั่วถึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการต่อเกลียวหรือโลหะต่างชนิดกัน เช่น เครื่องดูดน้ำเดี่ยวและเครื่องดูดควันแฟฟหม้อ และที่สำคัญต้องมีการเช็ดด้านสัมผัสไฟให้แห้งในขณะที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างโดยการใช้ความร้อนหรือลมเป่าเย็น

การล้างทำความสะอาดบริเวณที่สัมผัสไฟนี้จะต้องล้าง (Rinse) ด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกรด (pH – ต่ำ) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสบู่ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Gel) ในขณะที่ล้างจับ ซึ่งจะทำให้การขจัดคราบยากขึ้นเพราะทำให้เกิดเป็นฟิล์มเหนียวขึ้น หลังจากนั้นจึงใช้น้ำที่มีสภาพเป็นด่างที่ความเข้มข้นสูง หลังจากนั้นล้างให้สะอาดอีกครั้งหนึ่งด้วยน้ำสะอาด หรือใช้ผงขาวบริเวณที่สัมผัสไฟ ในกรณีที่ต้องการป้องกันไม่ให้เกิดสนิมหรือคราบน้ำมันเกาะ เพื่อดูดน้ำที่หลงเหลืออยู่และจะถูกดันตัวเป็นหยดน้ำต่อไป คือการใช้น้ำมันเครื่อง Light Oil เช่น Castrol OC ทาบนพื้นผิวโลหะ ถ้าในกรณีที่สัมผัสไฟน้ำมันร้อนจัดจนเข้าลึกได้ ก็ต้องนำตามาทำให้อุณหภูมิของโลหะอยู่เหนือจุดน้ำค้างโดยการใช้ความอุ่นหรือวัสดุที่ทนไฟ

บรรณานุกรม

1. Association of Owners of Large Boilers. Instruction Leaflet No. 14 The Prevention of Standstill Corrosion on the Waterside in Boiler Plants. VGB Dampfkessel-Gmbh ESSEN, 1981.
2. **BETZ Handbook of Industial Water Conditioning.** 8th Edition Betz Laboratories, 1980.
3. Kurita Technical Bulletin QEC BC-001. Water Treatment for Boiler Systems. Kurita Water Industries.
4. Welder, S.Q. **Water Conditioning.** U.S.A. : Hall Laboratories

ภาคผนวก ตารางและกราฟต่าง ๆ

ตารางที่ ... ของสารละลายน้ำแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ของสารประกอบต่าง ๆ

	Formula	Molecular weight	Equivalent weight	Substance to react with 1 equivalent of $CaCO_3$	$CaCO_3$ equivalent to 1 substance (multiplier)
Barium	Ba^{2+}	137.34	68.67	0.73	1.37
Calcium	Ca^{2+}	40.08	20.04	0.5	2.50
Copper	Cu^{2+}	63.54	31.77	1	1.57
Hydrogen	H^+	1.01	1.01	50.05	49.5
Ferrous iron	Fe^{2+}	55.85	27.92	0.9	1.79
Ferric iron	Fe^{3+}	55.85	18.62	0.54	2.69
Magnesium	Mg^{2+}	24.31	12.16	0.411	4.11
Manganous	Mn^{2+}	54.94	27.47	1.82	0.55
Potassium	K^+	39.10	39.10	0.26	1.28
Sodium	Na^+	22.99	22.99	0.44	2.18
Strontium	Sr^{2+}	87.62	43.81	0.571	1.75
Zinc	Zn^{2+}	65.38	32.69	0.765	1.31
Negative Ions					
Bicarbonate	HCO_3^-	61.01	61.01	0.82	0.82
Carbonate	CO_3^{2-}	60.01	30.00	1	1.00
Chloride	Cl^-	35.45	35.45	1.41	0.71
Chromate	CrO_4^{2-}	116.01	58.00	0.862	1.16
Fluoride	F^-	19.00	19.00	2.63	0.38
Iodide	I^-	126.90	126.90	0.394	2.54
Hydroxy	OH^-	17.01	17.00	2.941	0.34
Nitrate	NO_3^-	62.01	62.00	0.81	1.24
Phosphate (ortho)	PO_4^{3-}	94.97	31.66	0.527	1.58
Phosphate (diortho)	HPO_4^{2-}	95.98	47.99	1.042	1.04
Phosphate (monobasic)	$H_2PO_4^-$	96.99	96.99	2.069	0.48
Sulfate	SO_4^{2-}	96.06	48.03	1.041	0.96
Bisulfite	HSO_3^-	81.07	81.07	1.232	0.81
Sulfite	SO_3^{2-}	80.06	40.03	1.249	0.80
Bisulfide	HS^-	33.08	33.08	3.027	0.33
Sulfide	S^{2-}	32.06	16.03	3.121	0.32

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนค่าของสารต่างๆ ให้เป็นค่าเทียบเท่าแคลเซียมคาร์บอเนต

Substance	Formula	Atomic or Molecular weight	Equivalent weight	Conversion Factor Using molecular wt. of $CaCO_3$ as 100	
				Substance to $CaCO_3$ equivalent	$CaCO_3$ equivalent to substance
Aluminum	Al	26.97	8.99	5.56	0.18
Aluminum Chloride	$AlCl_3$	133.3	44.43	2.25	0.44
Aluminum Chloride	$AlCl_3 \cdot 6H_2O$	241.4	80.47	1.24	0.81
Aluminum Hydrate	$Al(OH)_3$	78.00	26.00	3.85	0.26
Aluminum Sulfate	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666.4		1.50	0.67
Aluminum Sulfate	$Al_2(SO_4)_3$ anhydrous	342.2	57.0	2.93	0.34
Alum	$AlCl$	133.4	133.4	0.75	1.33
Sodium Aluminate	$Na_2Al_2O_4$	164.0	54.7	1.83	0.55
Alum Ammonium	$Al_2(SO_4)_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$	906.6	113.33	0.88	0.92
Alum Potassium	$Al_2(SO_4)_3K_2SO_4 \cdot 24H_2O$	948.8	158.13	0.63	1.58
Ammonia	NH_3	17.03	17.03	2.94	0.34
Ammonium Hydroxide	NH_4OH	35.05	35.05	1.43	0.70
Ammonium Chloride	NH_4Cl	53.5	53.5	0.93	1.07
Ammonium Hydroxide	NH_4OH	35.04	35.04	1.43	0.70
Ammonium Sulfate	$(NH_4)_2SO_4$	132.1	66.1	0.76	1.32
Barium	Ba	137.4	68.7	0.73	1.37
Barium Carbonate	$BaCO_3$	197.4	98.7	0.51	1.97
Barium Chloride	$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	244.3	122.15	0.41	2.44
Barium Hydroxide	$Ba(OH)_2$	171.4	85.7	0.58	1.71
Barium Nitrate	$Ba(NO_3)_2$	261.4	130.7	0.38	2.61
Barium Oxide	BaO	153.4	76.7	0.65	1.53
Barium Sulfate	$BaSO_4$	233.5	116.7	0.43	2.33
Calcium	Ca	40.08	20.04	2.50	0.40
Calcium Bicarbonate	$Ca(HCO_3)_2$	162.1	81.05	1.23	0.81
Calcium Carbonate	$CaCO_3$	100.09	50.04	1.00	1.00
Calcium Chloride	$CaCl_2$	111.0	55.50	0.90	1.11
Calcium Hydroxide	$Ca(OH)_2$	74.10	37.05	1.35	0.74
Calcium Hypochlorite	$Ca(OCl)_2$	143.0	71.5	0.70	1.43
Calcium Nitrate	$Ca(NO_3)_2$	164.1	82.05	0.61	1.64
Calcium Oxide	CaO	56.1	28.05	1.79	0.56
Calcium Phosphate	$Ca_3(PO_4)_2$	310.3	51.7	1.94	0.52
Calcium Sulfate	$CaSO_4$ anhydrous	136.1	68.1	0.74	1.36
Calcium Sulfate	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ gypsum	172.2	86.1	0.58	1.72
Carbon	C	12.0	6.0	16.67	0.12
Chlorine	Cl	35.5	35.5	1.4	0.71
Copper	Cu	63.5	31.8	1.57	0.64
Copper Sulfate Anhydrous	$CuSO_4$	159.6	79.8	0.63	1.60

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบความกระด้างของสารต่างๆ ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต (ต่อ)

Substance	Formula	Atomic or Molecular weight	Equivalent weight	Conversion Factor Using molecular wt. of $CaCO_3$ as 100	
				Substance to $CaCO_3$ equivalent	$CaCO_3$ equivalent to substance
Copper Sulfate (Cupric	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Iron (Ferrous)	Fe^{++}	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Iron (Ferric)	Fe^{+++}	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferrous Carbonate	$FeCO_3$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferrous Hydroxide	$Fe(OH)_2$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferrous Oxide	FeO	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferrous Sulfate	$FeSO_4$ (anhydrous)	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferrous Sulfate	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferrous Sulfate	$FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$	[illegible]	[illegible]	oxidation	
Ferric Chloride	$FeCl_3$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferric Chloride	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferric Hydroxide	$Fe(OH)_3$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferric Oxide	Fe_2O_3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferric Sulfate (Ferric)	$Fe_2(SO_4)_3$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Ferrous or Ferric	Fe or Fe^{+++}	[illegible]	[illegible]	oxidation	
Fluoride	F	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Hydrogen Gas	H_2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Iodine	I	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Lead	Pb	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium	Mg^{++}	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium Bicarbonate	$Mg(HCO_3)_2$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium Carbonate	$MgCO_3$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium Chloride	$MgCl_2$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium Hydroxide	$Mg(OH)_2$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium Nitrate	$Mg(NO_3)_2$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium Oxide	MgO	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium Phosphate	$Mg_3(PO_4)_2$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Magnesium Sulfate	$MgSO_4$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Manganese (Manganous)	Mn^{++}	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Manganese (Manganic)	Mn^{+++}	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Manganese Chloride	$MnCl_2$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Manganese Dioxide	MnO_2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Manganese Hydroxide	$Mn(OH)_2$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Manganese Oxide	Mn_2O_3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Manganous Oxide	MnO	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Nitrate (Nitrate Ion)	NO_3^-	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Nitrite (Nitrite Ion)	NO_2^-	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

ตารางที่ 3 การแปลงค่าระหว่างสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิกับสารละลายมาตรฐาน (ต่อ)

Substance	Formula	Atomic or Molecular weight	Equivalent weight	Conversion Factor Using molecular wt. of $CaCO_3$ as 100	
				Substance to $CaCO_3$ equivalent	$CaCO_3$ equivalent to substance
Oxygen	O	16.0	8.00	6.25	0.160
Phosphorus (Valence 3)	P^{+3}	31.0	10.3	9.70	0.103
Phosphorus (Valence 5)	P^{+5}	31.0	6.20	16.1	0.062
Potassium	K	39.1	39.1	2.56	0.391
Potassium Carbonate	K_2CO_3	138	69.1	1.45	0.691
Potassium Chloride	KCl	74.6	74.6	1.34	0.746
Potassium Hydroxide	KOH	56.1	56.1	1.78	0.561
Silver Chloride	AgCl	143.3	143.3	0.698	0.717
Silver Nitrate	$AgNO_3$	169.9	169.9	0.589	0.849
Silica	SiO_2	60.1	30.0	1.66	0.300
Silicon	Si	28.1	7.03	3.56	0.070
Sodium	Na	23.0	23.0	4.35	0.230
Sodium Bicarbonate	$NaHCO_3$	84.0	84.0	1.19	0.840
Sodium Bisulfate	$NaHSO_4$	120.0	120.0	0.832	1.20
Sodium Bisulfite	$NaHSO_3$	104	104	0.962	1.04
Sodium Carbonate (anhydrous)	Na_2CO_3	106	53.0	0.943	0.530
Sodium Carbonate (monohydrate)	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$	124	62.0	0.806	0.620
Sodium Chloride	NaCl	58.5	58.5	1.71	0.585
Sodium Hypochlorite	NaClO	74.5	74.5	1.34	0.745
Sodium Hydroxide	NaOH	40.0	40.0	2.50	0.400
Sodium Nitrate	$NaNO_3$	85.0	85.0	1.18	0.850
Sodium Nitrite	$NaNO_2$	69.0	69.0	1.45	0.690
Sodium Oxide	Na_2O	62.0	31.0	3.23	0.310
Trisodium Phosphate	$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ (or $Na_3PO_4 \cdot 8H_2O$)	380	95.0	1.05	0.950
Trisodium Phosphate (anhydrous)	Na_3PO_4	164	54.7	1.83	0.547
Disodium Phosphate	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ (or $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$)	358	71.6	1.40	0.716
Disodium Phosphate (anhydrous)	Na_2HPO_4	142	47.3	2.11	0.473
Monosodium Phosphate	$NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ (or NaH_2PO_4)	138	46.0	2.17	0.460
Monosodium Phosphate (anhydrous)	NaH_2PO_4	120	40.0	2.50	0.400
Metaphosphate (anhydrous)	$NaPO_3$	102	34.0	2.94	0.340
Sodium Sulfite (anhydrous)	Na_2SO_3	126	63.0	1.59	0.630
Sodium Sulfite	$Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$	252	63.0	1.59	0.630
Sodium Thiosulfate	$Na_2S_2O_3$	158	158	0.633	1.58
Sodium Tetrathionate	$Na_2S_4O_6$	270	135	0.741	1.35
Sodium Sulfide	Na_2S	120	60.0	1.66	0.600
Sulfur (Valence 2)	S^{-2}	32.1	16.0	6.25	0.160
Sulfur (Valence 4)	S^{+4}	32.1	8.02	12.5	0.080

ตารางที่ ... การแปลงค่าของความกระด้างและความเป็นด่างเป็นมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO3)

Substance	Formula	Atomic or Molecular weight	Equivalent weight	Conversion Factor Using molecular wt. of $CaCO_3$ as 100	
				Substance to $CaCO_3$ Equivalent	$CaCO_3$ Equivalent to Substance
Sulfur (Sulfurous)	S	32.1	16.04	3.06	0.33
Sulfur Dioxide	SO_2	64.1	32.0		
Tin	Sn	118.7			
Water	H_2O	18.0	9.0	5.56	0.18
Zinc	Zn	65.4	32.7	3.06	0.33
ACID RADICALS					
Bicarbonate	HCO_3	61.0	61.0	1.64	0.6
Carbonate	CO_3	60.0	30.0	3.33	0.3
Carbon Dioxide	CO_2	44.0	22.0	4.54	0.22
Chloride	Cl	35.5	35.5	2.82	0.35
Iodide	I	126.9	126.9	0.79	2.54
Nitrate	NO_3	62.0	62.0	1.61	1.24
Hydroxyl	OH	17.0	17.0	5.91	0.34
Phosphate	PO_4	95.0	31.7	3.2	0.63
Phosphorous Oxide	P_2O_5	142.0	28.4	3.51	0.47
Sulfide	S	32.1	16.0	6.24	0.16
Sulfate	SO_4	96.1	48.0	1.91	0.52
Sulfur Trioxide	SO_3	80.1	40.0	2.24	0.45
ACIDS					
Hydrogen	H	1.0	1.0	50.00	0.02
Acetic Acid	$HC_2H_3O_2$	60.1	60.1	1.66	0.60
Carbonic Acid	H_2CO_3	62.0	31.0	3.23	0.31
Hydrochloric Acid	HCl	36.5	36.5	1.37	0.73
Nitric Acid	HNO_3	63.0	63.0	0.79	1.26
Phosphoric Acid	H_3PO_4	98.0	32.7	3.06	0.33
Sulfurous Acid	H_2SO_3	82.1	41.1	2.43	0.82
Sulfuric Acid	H_2SO_4	98.1	49.0	2.02	0.98
Hydrogen Sulfide	H_2S	34.1	17.05	2.93	0.34
Manganous Acid	H_2MnO_2	104.9	52.5	1.91	1.05

* In reacting with acids, 1 ppm of carbonate or bicarbonate equals 1 ppm of calcium carbonate.

ตารางที่ 3 ตารางการเปลี่ยนหน่วยการวิเคราะห์น้ำ

CONVERSION TABLE	Parts $CaCO_3$ per Million (ppm)	Parts $CaCO_3$ per Hundred Thousand (pts. per hundr.)	Grains $CaCO_3$ per U.S. Gallon (gpg)	English Degrees or Clark	French Degrees or French	German Degrees or German	Milli-equivalents per Liter or Equivalents per Million
1 Part per Million =	1	0.01	0.0583	0.07	0.1	0.0560	0.020
1 Part per Hundred Thousand =	100	1	5.83	7.0	10	5.60	0.20
1 Grain per U.S. Gallon =	17.1	0.171	1	1.2	1.71	0.960	0.0343
1 English or Clark Degree =	14.3	0.143	0.833	1	1.43	0.800	0.0286
1 French Degree =	10.0	0.1	0.583	0.7	1	0.560	0.020
1 German Degree =	17.9	0.179	1.04	1.25	1.79	1	0.0357
1 Milli-equivalent per Liter or 1 Equivalent per Million =	50.0	5.0	2.92	3.50		2.80	1

ตารางที่ 4 ตารางการเปลี่ยนหน่วยการวิเคราะห์น้ำเป็นหน่วยอเมริกัน

WATER ANALYSIS UNITS CONVERSION TABLE (Expressed to 3 Significant Figures)	Parts per Million (ppm)	Milligrams per Liter (mg/l)	Grams per Liter (grms/L)	Parts per Hundred Thousand Pts	Grains U.S. Gallon (grs. U.S.gal)	Grains per British Imp Gallon	Kilograms per Cubic Foot (Kgr/cu ft)
1 Part per Million =	1.0	1.0	0.001	0.1	0.0584	0.07	0.000
1 Milligram per Liter =	1.0	1.0	0.001	0.1	0.0584	0.07	0.000
1 Gram per Liter =	1000	1000	1.0	100.0	58.3	70.0	0.062
1 Part per Hundred Thousand =	10.0	10.0	0.01	1.0	0.583	0.7	0.000
1 Grain per U.S. Gallon =	17.1	17.1	0.017	1.71	1.0	1.2	0.000
1 Grain per British Imp Gallon =	14.3	14.3	0.014	1.43	0.833	1.0	0.000
1 Kilogram per Cubic Foot =	22940	22940	22.94	2294	1337	1606	1.0

หมายเหตุ: ตารางนี้ใช้สำหรับการแปลงหน่วยการวิเคราะห์น้ำ ไม่ใช่สำหรับการแปลงหน่วยทั่วไป

ตารางที่ 5 ข้อมูลทางเทคนิคของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำ

Chemical	Common name	Typical species	Equiv. weight	Bulk density, lb/cu ft or lb/gal	Approx. pH 1% solution	Solubility
Aluminum sulfate $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$	Alum	Lump 17% Al_2O_3 Liquid 8.5% Al_2O_3	9.09	60 11	3.4	4.3 lb/gal at 60°F
Bentonite $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$	Bentonite			60		Insoluble
Calcium carbonate $CaCO_3$	Limestone	96% $CaCO_3$	50	80	9	Insoluble
Calcium hydroxide $Ca(OH)_2$	Hydrated lime, slaked lime	94% $Ca(OH)_2$	37	40	12	Insoluble
Calcium hypochlorite $Ca(OCl)_2$	HTH	70% Cl_2	143	55	6–8	5% at 68°F
Calcium oxide CaO	Burnt lime, quicklime	90% CaO	56	60	12	Slakes at 0.2%
Calcium sulfate $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Gypsum	95% gypsum	86	55	5.6	Insoluble
Chlorine Cl_2	Chlorine	Gas 99.8% Cl_2	35.5	gas		0.57 lb/gal at 60°F
Copper sulfate $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Blue vitriol	99% $CuSO_4$	124.7	75	5.0	3 lb/gal at 60°F
Dolomite lime $CaMg(CO_3)_2$	Dolomitic lime	95–98% $MgCO_3$	92	80	12.4	Insoluble
Ferric chloride $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	Ferric chloride	Lump 20% Fe Liquid 12% Fe	90.1	70 13	3.4	43% at 60°F
Ferric sulfate $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 3H_2O$	Ferric sulfate	18.5% Fe	51.9	90	2.4	70% at 60°F
Ferrous sulfate $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Copperas	20% Fe	139	70	3.4	1 lb/gal at 60°F
Hydrochloric acid HCl	Muriatic acid	31.5% HCl 37% Baume	36.5	9.6	1.2	35% at 60°F
Sodium aluminate $NaAlO_2$	Aluminate	Flake 46% Al_2O_3 Liquid 20% Al_2O_3	164	50 15	11–12	40% at 60°F
Sodium chloride $NaCl$	Rock salt, salt	98% Pure	58.5	50	6–8	26 lb/gal at 60°F
Sodium carbonate Na_2CO_3	Soda ash	99% Pure 58% Na_2O	53	63	11	2 lb/gal at 60°F
Sodium hydroxide NaOH	Caustic, lye	Flake 76% Na_2O Liquid 50%	40	65 12	12.8	50% at 60°F
Sodium phosphate Na_3PO_4	Trisodium phosphate	44% P_2O_5	47.3	55	12	9% at 60°F
Sodium metaphosphate NaPO	Hexametaphosphate	68% P_2O_5	34	62	6.5	1 lb/gal at 60°F
Sulfuric acid H_2SO_4	Oil of vitriol	93.6% 66° Baume	49	15	1.2	Infinite

[1] Effective equivalent weight for coagulation and softening.

[2] Effective equivalent weight for oxidation and disinfection.

ตารางที่ ๑ การแปลงหน่วยของอัตราการไหล ความเร็วในการไหล ปริมาณน้ำและการ
และอัตราการกรอง

Flow Rate

litres per h	litres/min	U.S. Gallons/ min	Gallons per min	Gallons per h	Cu.ft/sec	Cu.ft/min	Metres^3 per h	Litres per sec

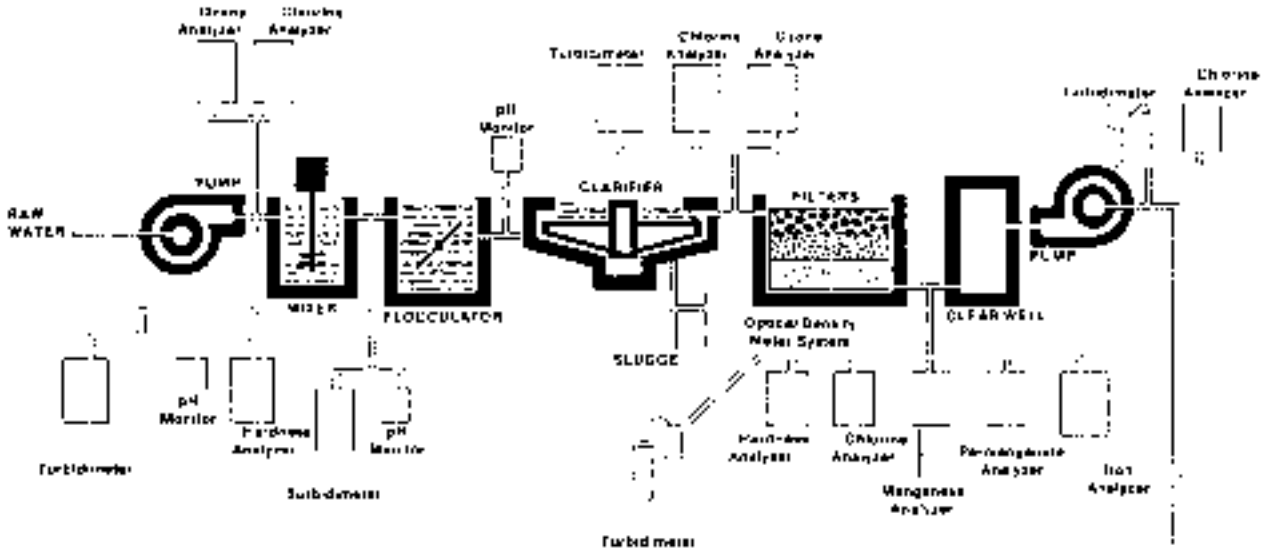
Flow Velocity

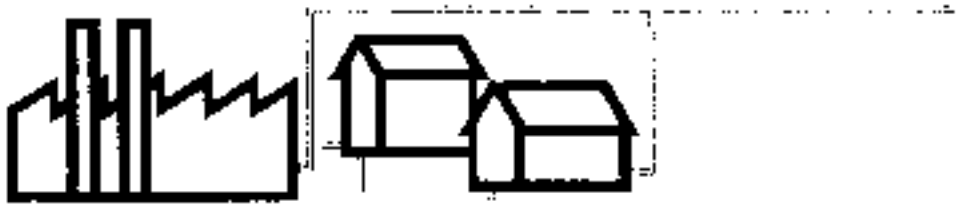
Miles per h	feet/h	ft/sec	cm/sec	inch or ^{2}in^2/h	g.p.m. per ft^2	g.p.h per ft^2	U.S. g.p.m. per ft^2	U.S. g.p.h per ft^2

Specific Flow Rate

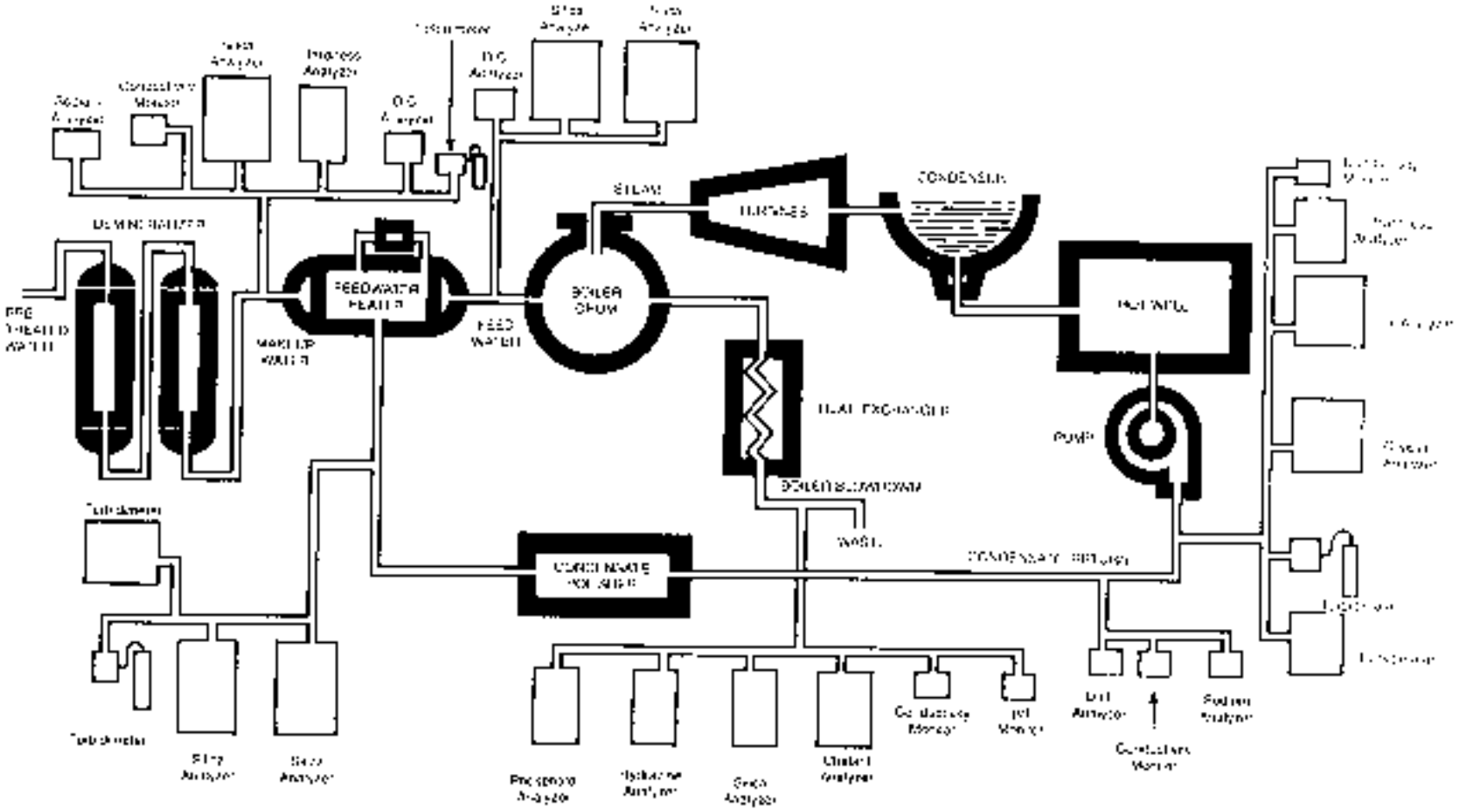
Bed Volumes per min	Bed Volumes per h	Gallons per ft^3/min	U.S. Gallons per ft^3/min	Approx Equivalent Contact Time in min

Filtration Rate


RAW WATER
PUMP
MIXER
FLOCCULATOR
CLARIFIER
FILTERS
CLEARWELL
PUMP
SLUDGE
pH Monitor
Turbidimeter
Optical Density Meter System
Manganese Analyzer
Chlorine Analyzer
Iron Analyzer



รูปที่ ๑ แสดงอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ทั่วไปตามจุดต่าง ๆ ในระบบปรับสภาพน้ำของหม้อไอน้ำ



ตารางที่ 7 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

Specific Gravity	NaCl %	Specific Gravity	NaCl %
1.006725	1	1.111410	15
1.014350	2	1.119358	16
1.021794	3	1.127580	17
1.029069	4	1.136033	18
1.036224	5	1.143715	19
1.043369	6	1.151107	20
1.050108	7	1.159031	21
1.056851	8	1.167256	22
1.06393	9	1.175560	23
1.072388	10	1.184041	24
1.080167	11	1.192128	25
1.088459	12	1.200368	26
1.096422	13	1.208433	26.399
1.104865	14		

ตารางที่ 8 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของการตกตะกอนของเม็ดเลือดแดงในน้ำเกลือความเข้มข้นต่าง ๆ

Specific Gravity	Baumé Degree Be'	ESR %	ESR g/l	Specific Gravity	Baumé Degree Be'	ESR %	ESR g/l
1.005	0.7	1.15	12	1.105	15.6	20.07	232
1.010	1.4	2.14	22	1.110	16.2	21.92	245
1.015	2.1	3.12	32	1.115	16.9	23.86	255
1.020	2.7	4.13	42	1.120	17.5	25.82	267
1.025	3.4	5.15	53	1.125	18.2	24.78	279
1.030	4.1	6.18	64	1.130	18.8	26.78	291
1.035	4.7	7.19	74	1.135	19.4	26.92	303
1.040	5.4	8.16	85	1.140	19.9	25.14	315
1.045	6.0	9.16	96	1.145	20.5	28.61	326
1.050	6.7	10.17	107	1.150	21.0	29.53	340
1.055	7.3	11.18	118	1.155	21.5	30.55	353
1.060	8.0	12.19	129	1.160	22.0	31.52	366
1.065	8.7	13.20	141	1.165	22.5	32.49	378
1.070	9.3	14.17	152	1.170	23.0	33.46	392
1.075	10.0	15.16	163	1.175	23.5	34.42	404
1.080	10.6	16.15	174	1.180	24.0	35.39	416
1.085	11.2	17.13	186	1.185	24.5	36.31	430
1.090	11.9	18.12	197	1.190	25.0	37.23	443
1.095	12.4	19.09	209	1.195	25.5	38.16	456
1.100	13.0	20.01	220	1.200	26.0	39.17	469

ตารางที่ 9 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของโซดาไฟที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Specific Gravity	NaOH %	NaOH g/l	Specific Gravity	NaOH %	NaOH g/l
1.010	0.69	6	1.220	19.56	239
1.014	1.20	12	1.224	20.09	255
1.022	2.01	21	1.230	21.42	264
1.029	2.70	28	1.232	22.01	283
1.037	3.33	35	1.243	23.62	299
1.045	4.00	42	1.254	24.81	316
1.053	4.64	49	1.260	25.86	332
1.060	5.26	56	1.270	26.63	338
1.067	5.87	63	1.308	27.91	364
1.075	6.55	70	1.320	28.83	381
1.083	7.31	79	1.332	29.93	398
1.091	8.08	87	1.345	31.22	419
1.100	8.68	95	1.352	32.47	441
1.108	9.12	101	1.370	33.69	462
1.116	10.10	112	1.383	34.86	482
1.125	10.97	123	1.396	36.25	506
1.134	12.34	140	1.410	37.67	531
1.142	12.94	148	1.421	38.80	551
1.151	13.93	160	1.438	39.98	575
1.162	14.93	173	1.453	41.41	602
1.171	15.13	177	1.468	42.83	629
1.180	16.17	191	1.484	44.38	658
1.190	16.73	199	1.498	45.72	685
1.200	17.67	212	1.514	47.07	713
1.210	18.58	225	1.530	49.10	750

ตารางที่ 10 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Specific Gravity	Baumé Degree Be'	H_2SO_4 %	H_2SO_4 g/l	Specific Gravity	Baumé Degree Be'	NH_2SO_4 %	H_2SO_4 g/l
1.001		0.09	1	1.054		8.07	85
1.005		0.87	8	1.061		8.77	93
1.010		1.57	16	1.065		9.47	101
1.015		2.30	23	1.070	7.4	10.29	109
1.020		3.03	31	1.078		10.60	117
1.025		3.76	39	1.080		11.61	125
1.030		4.49	46	1.085	11.2	12.30	133
1.035	4.7	5.23	53	1.090		12.80	140
1.040		5.96	62	1.095		13.67	150
1.045		6.67	71	1.100		14.55	160
1.050	6.7	7.37	77	1.105	15.1	15.19	166
1.060		15.71	78	1.280		30.16	510
1.065		16.35	83	1.305		30.93	519
1.120		17.01	6	1.310		20.35	529
1.125	16.0	17.66	89	1.315		20.93	538
1.130		18.31	210	1.320		21.50	548
1.135		18.96	215	1.325		22.08	558
1.140		19.61	223	1.330	55.8	22.66	567

ตารางที่ 19 ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายกรดกำมะถันที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ต่อ)

Specific Gravity	Baumé Degree Bé°	H_2SO_4 %	H_2SO_4 g/l	Specific Gravity	Baumé Degree Bé°	H_2SO_4 %	H_2SO_4 g/l
1.215	18.3	20.29	231	1.335		33.10	377
1.220		20.91	239	1.340		33.71	386
1.225		21.65	248	1.345		34.28	391
1.230		22.39	257	1.350		34.92	401
1.235	20.3	22.63	261	1.355	32.8	35.35	411
1.240		23.4	275	1.360		35.98	424
1.245		24.12	283	1.365		36.61	433
1.250		24.76	292	1.370		36.94	443
1.255	22.3	25.10	302	1.375	34.4	37.37	453
1.260		25.74	310	1.380		37.71	462
1.265		26.18	319	1.385		38.34	472
1.270	24.0	27.02	328	1.390		38.96	482
1.275		27.65	337	1.395		39.59	492
1.280		28.58	346	1.400	36.2	39.1	501
1.285		29.21	355	1.405		39.83	511
1.290		29.84	364	1.410		39.15	521
1.295	26.4	30.48	373	1.415		39.76	530
1.300		31.11	382	1.420		40.38	540
1.305		31.74	391	1.425	38	40.69	550
1.310	27.9	32.28	401	1.430		41.31	559
1.315		32.69	409	1.435		41.84	569
1.320		33.43	418	1.440		42.07	579
1.325		34.06	426	1.445		42.56	589
1.330		34.52	435	1.450	41.8	43.03	598
1.335	30.2	35.14	444	1.455		43.50	608
1.340		35.71	453	1.460		43.97	617
1.345		36.29	462	1.465		44.43	627
1.350		36.87	477	1.470		44.90	637
1.355	32.0	37.18	487	1.475	46.4	45.37	646
1.360		38.04	480	1.480		45.83	656
1.365		38.6	570	1.485		46.36	668
1.370		38.34	626	1.490		46.90	1290
1.375		39.23	885	1.495		46.53	1301
1.380		39.70	696	1.500		47.12	1312
1.385	48.4	40.18	706	1.505		47.66	1323
1.390		40.69	716	1.510	50.7	48.01	1331
1.395		41.2	726	1.515		48.48	1341
1.400		41.70	736	1.520		48.95	1351
1.405		42.09	844	1.525		49.36	1360
1.410	50.0	42.58	857	1.530		49.83	1371
1.415		43.05	867	1.535	51.1	50.21	1382
1.420		43.43	877	1.540		50.68	1394
1.425		43.85	887	1.545		51.12	1416
1.430		44.26	896	1.550		51.56	1427
1.435		44.67	1006	1.555		52.01	1439
1.440	51.8	45.08	1015	1.560	52.1	52.44	1451
1.445		45.49	1024	1.565		52.88	1463
1.450		45.91	1035	1.570		53.32	1475
1.455		46.31	1044	1.575		53.92	1486
1.460		46.71	1054	1.580		54.52	1501

ตารางที่ ๑ ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายกรดซัลฟิวริกและปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ต่อ)

Specific Gravity	Baumé Degree Be'	H_2SO_4 %	H_2SO_4 g/l	Specific Gravity	Baumé Degree Be'	NH_2SO_3H %	H_2SO_4 g/l
1.585		67.13	1064	1.785	65.5	55.07	1519
1.590	50.9	67.29	1025	1.790		85.10	1534
1.595		68.05	1085	1.795		86.31	1549
1.600		68.5	1096	1.800		86.96	1564
1.605		68.97	1107	1.805	62.4	87.60	1581
1.610		69.43	1118	1.810		88.20	1596
1.615	55.0	69.89	1129	1.815		89.05	1621
1.620		70.32	1139	1.820	65.0	90.05	1639
1.625		70.71	1150	1.825	65.2	91.30	1661
1.630		71.16	1160	1.830		92.10	1685
1.635		71.53	1170	1.835		93.45	1713
1.640		71.96	1181	1.840	65.6	95.10	1750
1.645	56.6	72.30	1192	1.8405		95.55	1760
1.650		72.82	1202	1.8410		95.90	1766
1.655		73.23	1212	1.8415		96.35	1779
1.660		73.64	222	1.8420		98.20	1808
1.665		74.07	1233	1.8405		98.52	1814
1.670		74.51	1244	1.8400		99.20	1825
1.675	58.2	74.93	1255	1.8395		99.45	1830
1.680		75.43	1267	1.8390		99.70	1834
1.685		75.80	1278	1.8385		99.95	1839

ตารางที่ ๑ ค่าความถ่วงจำเพาะของกรดดินประสิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Specific Gravity	Baumé Degree Be'	HNO_3 %	HNO_3 g/l	Specific Gravity	Baumé Degree Be'	HNO_3 %	HNO_3 g/l
1.010	1.4	1.90	19	1.165	22.1	27.12	316
1.020	2.7	3.80	38	1.170	22.9	27.98	326
1.025	3.4	4.60	47	1.175	23.4	28.63	336
1.030	4	5.60	57	1.180	24.0	29.38	347
1.035	4.7	6.58	68	1.185	24.8	30.14	357
1.040	5.4	7.26	75	1.190	25.4	30.86	367
1.045	6.01	8.13	85	1.195	25.8	31.62	378
1.050	6.7	8.99	94	1.200	26.4	32.16	386
1.055	7.4	9.84	104	1.205	26.8	33.09	399
1.060	8.0	10.68	113	1.210	27.0	33.82	409
1.065	8.7	11.57	123	1.215	27.5	34.59	420
1.070	9.4	12.33	132	1.220	28.0	35.28	430
1.075	10.0	13.13	141	1.225	28.4	36.07	441
1.080	10.6	13.95	151	1.230	28.9	36.78	452
1.085	11.2	14.74	160	1.235	29.2	37.53	463
1.090	11.9	15.53	169	1.240	29.9	38.29	475
1095	12.4	16.32	179	1.245	30.3	39.05	486
1.100	13.0	17.17	188	1.250	30.8	39.82	498
1.105	13.6	17.89	198	1.255	31.3	40.59	510
1.110	14.2	18.67	207	1.260	31.7	41.34	521
1.115	14.9	19.45	217	1.265	32.2	42.10	533
1.120	15.4	20.25	227	1.270	32.6	42.84	544

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะของกรดกับประสิทธิ์ความเข้มข้นของ ... (ต่อ)

Specific Gravity	Baumé Degree Be'	HNO_3 %	HNO_3 g/l	Specific Gravity	Baumé Degree Be'	HNO_3 %	HNO_3 g/l
1.225	16.0	21.09	236	1.255	31.1	43.12	550
1.230	16.5	21.97	240	1.260	31.5	44.41	568
1.235	17.1	23.54	256	1.265	32.0	45.18	581
1.240	17.7	23.31	268	1.270	32.4	45.95	593
1.245	18.3	24.08	276	1.275	32.8	46.72	602
1.250	18.8	24.84	286	1.280	33.3	47.49	617
1.255	19.3	25.62	296	1.285	33.7	48.26	630
1.260	19.8	26.39	306	1.290	34.2	49.02	643
1.265	20.6	27.86	326	1.295	34.7	49.80	661
1.270	21.1	28.63	339	1.300	35.1	50.58	674
1.275	21.6	29.41	349	1.305	35.6	51.35	687
1.280	22.1	30.18	363	1.310	36.0	52.13	702
1.285	22.8	31.34	380	1.315	36.5	53.30	719
1.290	23.3	32.12	393	1.320	36.9	54.08	734
1.295	23.8	32.89	405	1.325	37.4	54.85	748
1.300	24.3	33.66	418	1.330	37.8	55.62	762
1.305	24.8	34.43	431	1.335	38.3	56.40	777
1.310	25.3	35.21	444	1.340	38.7	57.17	791
1.315	25.8	35.98	457	1.345	39.2	57.94	805
1.320	26.3	36.75	470	1.350	39.6	58.72	820
1.325	26.8	37.53	483	1.355	40.1	59.49	834
1.330	27.3	38.30	497	1.360	40.5	60.26	848
1.335	27.8	39.07	510	1.365	41.0	61.04	863
1.340	28.3	39.84	523	1.370	41.4	61.81	877
1.345	28.8	40.62	537	1.375	41.9	62.58	891
1.350	29.3	41.39	551	1.380	42.3	63.35	905
1.355	29.8	42.16	565	1.385	42.8	64.13	920
1.360	30.3	42.93	579	1.390	43.2	64.90	934
1.365	30.8	43.71	593	1.395	43.7	65.67	948
1.370	31.3	44.48	607	1.400	44.1	66.44	962
1.375	31.8	45.25	622	1.405	44.6	67.22	977
1.380	32.3	46.02	636	1.410	45.0	67.99	991
1.385	32.8	46.80	650	1.415	45.4	68.76	1006
1.390	33.3	47.57	665	1.420	45.9	69.53	1020
1.395	33.8	48.34	680	1.425	46.3	70.31	1035
1.400	34.3	49.11	695	1.430	46.8	71.08	1050
1.405	34.8	49.88	709	1.435	47.2	71.85	1065
1.410	35.3	50.66	724	1.440	47.6	72.63	1080
1.415	35.8	51.43	739	1.445	48.1	73.40	1095
1.420	36.3	52.20	754	1.450	48.5	74.17	1110
1.425	36.8	52.97	769	1.455	49.0	74.95	1126
1.430	37.3	53.75	784	1.460	49.4	75.72	1141
1.435	37.8	54.52	799	1.465	49.8	76.49	1156
1.440	38.3	55.29	814	1.470	50.3	77.26	1172
1.445	38.8	56.06	829	1.475	50.7	78.04	1187
1.450	39.3	56.84	844	1.480	51.2	78.81	1203
1.455	39.8	57.61	859	1.485	51.6	79.58	1218
1.460	40.3	58.38	874	1.490	52.0	80.35	1234
1.465	40.8	59.16	889	1.495	52.5	81.13	1249
1.470	41.3	59.93	904	1.500	52.9	81.90	1265
1.475	41.8	60.70	919	1.505	53.4	82.67	1281
1.480	42.3	61.47	934	1.510	53.8	83.44	1296
1.485	42.8	62.25	949	1.515	54.3	84.22	1312
1.490	43.3	63.02	964	1.520	54.7	84.99	1328

ประวัติผู้เขียน

ณรงค์ วุฑรเสถียร

การศึกษา

พ.ศ. 2515 - [illegible]

พ.ศ. 2518 Post Graduate ในสาขาวิชา Pulp and Paper Technology ที่ Norwegian University of Trondheim ประเทศนอร์เวย์

การทำงาน [illegible] Water Treatment Plant [illegible] Kurita Water Industries [illegible]

ที่ทำงานปัจจุบัน - [illegible]

บรรจุความรู้ทางเทคนิคเกี่ยวกับน้ำอย่างละเอียดทั้งด้านทฤษฎีและด้านปฏิบัติ

- คุณสมบัติของน้ำ
- แหล่งน้ำในประเทศไทย
- การทำน้ำให้ใส
- การกำจัดความกระด้างของน้ำ
- การขจัดก๊าซในน้ำ
- การขจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำ
- การกำจัดอิออน
- การใช้งานและรักษาเรซิน
- ปัญหาของหม้อไอน้ำและวิธีแก้ปัญหา
- การล้างหม้อไอน้ำ

เหมาะสำหรับผู้ที่มีหน้าที่งานเกี่ยวข้องกับเรื่องของน้ำ ตั้งแต่พนักงานควบคุมเครื่องกรองน้ำ พนักงานควบคุมหม้อไอน้ำ จนถึงผู้จัดการโรงงาน นิสิตนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

ISBN 974-8324-76-1
9 789748 324760
ราคา 270 บาท