

รายการอ้างอิง

1. เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์, 2539.
2. มั่นสิน ตันจุลเวศม์. วิศวกรรมกรรมประยา. เล่ม2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
3. BYRNE W. REVERSE OSMOSIS A PRACTICAL GUIDE FOR INDUSTRIAL USERS. USA : Tall Oaks Publishing, 1995.
4. Mike Jenkins. Reverse Osmosis Operational Experience with fouling resistance RO membrane. ULTRAPURE WATER. 15 (May-June 1998) : 53-55.
5. MICHAELS SL. Crossflow Microfilters. Chemical Engineering. 96 (August 1989) : 84-91.
6. US Filter. Manual of Memtec. (Technical Information) 1996.
7. BEN AIMR and S.VIGNESWARAN. Application of Membrane Process in Water and Wastewater Treatment. Chemical Engineering. 102 (June 1995) : 3-6.
8. H. Martin Jessen and Philip M.Kemp. STRIVING FOR WATER RECOVERY AND REUSE. Environmental engineering world. 30 (November - December 1996) : 14-18.
9. Steve Cappos. MEMBRANE MINIMIZE LIQUID DISCHARGE. Chemical Engineering. 102 (July 1995) : 102-104.
10. Bill Byers. Zero Discharge a Systematic Approach to Water Reuse. Chemical Engineering. 102 (July 1995) : 96-100.
11. NOBLE,RO and S.A STERN (eds) . Membrane Separations Technology Principles and Applications. Netherlands : Elsevier Science B.V., 1995.
12. RAUTENBACH, R and R. ALBRECHT. Membrane Process. New York: John Wiley and Sons, 1989.
13. Wuchen. SOLID-LIQUID SEPARATION. Chemical Engineering. 104 (February 1997) : 66-72.
14. Dow chemical. Manual of FILMTECH. (Technical Information) 1996.
15. ไพบุลย์ หังสพฤกษ์ และ เฮอิโ ซไต. การรับออกฤศ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ดวงกมล, 2533.
16. THANTHIYA . การปรุงแต่งคุณภาพน้ำหล่อเย็น แบบเปิดที่มีการหมุนเวียนกลับ. กรุงเทพมหานคร: (ม.ป.ท.), (ม.ป.ป.).



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลอง

ตาราง ก1. แสดงผลของค่าความดัน ต่ออัตราการผลิตน้ำ ของระบบไมโครฟิลเตรชัน

ค่า Transmembrane pressure (Bar)	อัตราการผลิตน้ำ (ลิตร/ตร.ม.* ชม.)
0.2	44.44
0.4	55.56
0.6	66.67
0.8	72.22

ตาราง ก 2. แสดงผลของค่าความดัน ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของน้ำ ของระบบไมโครฟิลเตรชัน

คุณลักษณะของน้ำที่วิเคราะห์	น้ำที่ผ่าน Arkal	ระบบไมโครฟิลเตรชัน Transmembrane pressure (Bar)			
		0.2	0.4	0.6	0.8
1. พีเอช	7.7	7.26	7.35	7.47	7.45
2. สารละลายทั้งหมด (มก./ล)	142	138	136	137	138
3. ของแข็งแขวนลอย (มก./ล)	49	<5	<5	<5	<5
4. ความกระด้างทั้งหมด (ppm as CaCO3)	22.5	21.12	20.78	20.45	20.89
5. เหล็ก (ppm as Fe)	0.03	ND	ND	ND	ND
6. M-Alkalinity (ppm as CaCO3)	42	36.85	36.45	36.48	36.51
7. คลอไรด์ไอออน (ppm as Cl)	10.72	10.53	10.52	10.54	10.58
8. ซัลเฟตไอออน (ppm as SO4)	22.42	22.37	22.35	22.35	22.36
9. ซิลิกา (ppm as SiO2)	45.7	44.3	43.75	44.20	44.80
10. บีโอดี (PPM)	<3	ND	ND	ND	ND
11. นิกเกิล (ppm as Ni)	<0.08	ND	ND	ND	ND
12. ตะกั่ว (ppm as Pb)	<0.16	ND	ND	ND	ND
13. ทองแดง (ppm as Cu)	<0.025	ND	ND	ND	ND

ตาราง ก3. แสดงผลของค่าความดัน ต่ออัตราการผลิตน้ำ ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส

ค่า ความดัน (บาร์)	อัตราการผลิตน้ำ (ลิตร/ตร.ม.* ชม.)
8	17.5
11	22.84
14	28.28
17	33.71

ตาราง ก4. แสดงผลของค่าความดัน ต่อ %การกำจัดเกลือแร่ ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส

ค่าการนำไฟฟ้า	ค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำ เข้าระบบ Us/CM	ค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำผ่านระบบ R/O Us/CM	% การกำจัดเกลือแร่
8	135	3	97.78
11	138	2	98.55
14	145	2	98.62
17	134	2	98.51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก 5. แสดงผลของค่าความดัน ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของน้ำ ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส
โดย RECOVERY 60%

คุณลักษณะของน้ำที่วิเคราะห์	น้ำที่ผ่าน ระบบการกรอง ไมโครฟิลเตรชัน	ระบบรีเวอร์สออสโมซิส ความดัน (บาร์)			
		8	11	14	17
1. พีเอช	7.58	7.23	7.15	7.04	7.02
2. สารละลายทั้งหมด (มก./ล)	120	4	2	2	3
3. ของแข็งแขวนลอย (มก./ล)	<5	<5	<5	<5	<5
4. ความกระด้างทั้งหมด (ppm as CaCO ₃)	22.8	0.87	0.74	0.78	0.82
5. เหล็ก (ppm as Fe)	ND	ND	ND	ND	ND
6. M-Alkalinity (ppm as CaCO ₃)	38.7	1.2	0.8	0.8	0.8
7. คลอไรด์ไอออน (ppm as Cl)	10.88	0.2	0.2	0.2	0.3
8. ซัลเฟตไอออน (ppm as SO ₄)	22.12	0.68	0.65	0.66	0.66
9. ซิลิกา (ppm as SiO ₂)	43.2	1.5	1.12	1.08	1.15
10. บีโอดี (PPM)	<3	ND	ND	ND	ND
11. นิกเกิล (ppm as Ni)	<0.08	ND	ND	ND	ND
12. ตะกั่ว (ppm as Pb)	<0.16	ND	ND	ND	ND
13. ทองแดง (ppm as Cu)	<0.025	ND	ND	ND	ND

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก 6. แสดงผลของ% RECOVERY ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของน้ำ ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส

คุณลักษณะของน้ำที่วิเคราะห์	น้ำที่ผ่าน ระบบการกรอง ไมโครฟิลเตรชัน	ระบบรีเวอร์สออสโมซิส % RECOVERY			
		40	50	60	70
1. พีเอช	7.43	7.32	7.21	7.15	7.08
2. สารละลายทั้งหมด (มก./ล)	124	2	2	2	3
3. ของแข็งแขวนลอย (มก./ล)	<5	<5	<5	<5	<5
4. ความกระด้างทั้งหมด (ppm as CaCO ₃)	23.5	0.72	0.72	0.74	0.77
5. เหล็ก (ppm as Fe)	ND	ND	ND	ND	ND
6. M-Alkalinity (ppm as CaCO ₃)	38.2	0.82	0.85	0.9	1
7. คลอไรด์ไอออน (ppm as Cl)	11.41	0.3	0.3	0.3	0.4
8. ซัลเฟตไอออน (ppm as SO ₄)	25.4	0.69	0.65	0.66	0.66
9. ซิลิกา (ppm as SiO ₂)	42.7	0.95	1.23	1.35	1.44
10. บีโอดี (PPM)	<3	ND	ND	ND	ND
11. นิกเกิล (ppm as Ni)	<0.08	ND	ND	ND	ND
12. ตะกั่ว (ppm as Pb)	<0.16	ND	ND	ND	ND
13. ทองแดง (ppm as Cu)	<0.025	ND	ND	ND	ND

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก7. แสดงผลการเปรียบเทียบ % การกำจัดของระบบไมโครฟิลเตรชัน ที่
ความดัน 0.4 บาร์ กับ รีเวอร์สออสโมซิสที่ความดัน 11.0 บาร์ RECOVERY 60%

% การกำจัด	ไมโครฟิลเตรชัน (CMF)	รีเวอร์สออสโมซิส (R/O)
1. สารละลายทั้งหมด	4.23	98.33
2. ความกระด้างทั้งหมด	7.64	98.58
3. M-Alkalinity	14.24	97.93
4. กลอไวต์อออน	1.87	98.14
5. ซัลเฟตอออน	0.31	97.06
6. ซิลิกา	1.34	97.41

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 8. แสดง % การกำจัด เมื่อเวลาต่างๆกันที่ ความดัน 11 บาร์ และ
% RECOVERY =60 % ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำ เข้าระบบ Us/CM	ค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำผ่านระบบ R/O Us/CM	% การกำจัดเกลือแร่
8	155	2	98.71
16	158	2	98.73
24	160	2	98.75
32	167	2	98.80
40	165	2	98.79
48	164	2	98.78
56	163	2	98.77
64	166	2	98.80
72	168	2	98.81
80	166	2	98.80
88	162	2	98.77
96	162	2	98.77
104	160	2	98.75
112	161	2	98.76
120	157	2	98.73
128	164	2	98.78
136	167	2	98.80
144	164	2	98.78
152	162	2	98.77
160	158	2	98.73
168	165	2	98.79
176	162	2	98.77
184	159	2	98.74
192	156	2	98.72
200	155	2	98.71
208	152	2	98.68
216	156	2	98.72
224	160	2	98.75
232	162	2	98.77
240	158	2	98.73

ภาคผนวก ข

MEMTEC WATER TREATMENT EQUIPMENT

6 M10 C Microfiltration (CMF)

PP membrane module

Memcor : เป็นระบบการกรอง ชนิดไมโครฟิลเตรชัน [5,6] ที่เป็นการกรองแบบต่อเนื่อง ขนาดอนุภาคที่กรอง 0.2 ไมครอน ระบบนี้ใช้เนื้อเยื่อแบบเส้นใยกลวง ซึ่งทำให้ได้น้ำที่มี คุณภาพสูง ส่วนน้ำเข้มข้นที่มีอนุภาคที่ถูกกำจัดออกไปนั้น จะนำไปผ่านขบวนการอื่นต่อ หรือนำไปกำจัดต่อไป ความสำคัญของระบบการกรองแบบนี้ ได้รับการจดลิขสิทธิ์ โดยเป็นกระบวนการใช้ลมในการล้างกลับ สามารถกำจัดอนุภาคที่เกาะติดที่ผิวของเส้นใย การล้างกลับโดยใช้ลมนี้ เป็นการเปิดรูพรุน ของเส้นใย และสร้างให้เกิดการ Scrub ซึ่งไม่เหมือนกับเทคนิคการล้างกลับโดยทั่วไป

การออกแบบระบบ เป็นแบบกระทัดรัด โมดูล ประกอบด้วย บั้ม, CMF Filtration array การเดินท่อน้ำ ระบบควบคุมต่างๆ ประกอบเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน การควบคุมระบบโดยใช้ PLC ซึ่งได้มาตรฐานจาก Hitachi EM PLC . สามารถใช้รุ่นอื่นได้ เช่น Mitsubishi AIS , Omron 200 H แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงขึ้น

การทำงานของระบบ

เริ่มต้นระบบ : ขั้นตอนการทำงานควบคุมโดย PLC วาล์วน้ำเข้า แบบ อัตโนมัติ บั้มจ่ายน้ำเริ่มทำงานเมื่อระดับของ น้ำในถังถึงค่าที่ตั้งไว้ วาล์วเปิด ปิด แบบอัตโนมัติ เพื่อรักษาระดับน้ำในถัง เมื่อบั้มจ่ายน้ำผ่านเข้า ยังโมดูล น้ำนั้นจะผ่านเข้ามายังรูพรุนของเมมเบรน เพื่อเริ่มขบวนการกรอง สารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเกาะติดที่ผิวของเมมเบรน น้ำที่ผ่านการกรอง แล้วจะเข้าสู่ส่วนบนและล่างของโมดูล การควบคุมอัตราการไหลโดยใช้วิธีแบบมือ สามารถอ่านค่าอัตราการไหลได้จากเครื่องมือวัดอัตราการไหล

การล้างกลับ : เมื่ออนุภาคเกาะติดที่ผิวของเมมเบรนระหว่างการกรอง ทำให้อัตราการกรองลดลง เพื่อที่จะรักษา ประสิทธิภาพการกรอง โดยการกำจัดอนุภาคที่เกาะติดนั้นโดยการล้างกลับโดยใช้ลมอัดเข้าผนังของเส้นใย จากนั้นใช้ น้ำไล่ฟองอากาศที่เกิดขึ้น เพื่อดันน้ำในส่วนที่ถูกกรองออกจากเส้นใย น้ำที่มีแรงดันนี้ จะช่วยดักจับฟองอากาศในรูพรุนของเมมเบรน

การทดสอบเมมเบรน : ความสมบูรณ์ของระบบการกรองด้วยเมมเบรน, งานเดินท่อ, วาล์ว และ ข้อต่อ สามารถตรวจสอบได้โดยการใช้การทดสอบหน้าที่ การทำงานของเมมเบรน, ด้านการกรอง ความดันลม สามารถตรวจเช็คได้โดยการใช้เกจวัดความดัน ถ้าค่าความดันลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นที่ระบบ

การหยุดระบบ : ต้องปิดปั๊มจ่ายน้ำ และวาล์ว อัดโนเมติ ยกเว้น วาล์วไล่อากาศ (AV7,AV9) เพื่อไล่อากาศ การไล่อากาศเพื่อป้องกันความดันที่สูงขึ้นเนื่องจากการทำงานของสิ่งมีชีวิตเล็กๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การนำน้ำกลับมาใช้งานใหม่และการนำระบบ zero discharge มาใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา

โรงงานอุตสาหกรรมอาหาร, ยา, เคมี, เซมิคอนดักเตอร์ [7] มีการใช้น้ำบริสุทธิ์ในขบวนการผลิต และหลังจากการใช้น้ำเหล่านี้แล้ว น้ำเหล่านี้จะกลายเป็นน้ำเสียที่ต้องบำบัดเพื่อให้ได้ ตามมาตรฐานที่กฎหมายกำหนดก่อนที่จะปล่อยลงสู่สาธารณะ ดังนั้นถ้าสามารถนำน้ำเสียเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่จะทำให้ การใช้น้ำเหล่านี้เกิดประโยชน์ สูงสุด และเป็นการลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น

หลายปีที่ผ่านมาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้สูงขึ้น จาก รูป ค1, รูป ค2 จะเห็นว่าปี คศ. 1990 ราคาบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น 10-20 % ทุกๆ 2 ปี ในปี 1988 ราคาบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นประมาณ 2 เท่าของอัตราที่สูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นในปัจจุบันได้มีการกำหนดให้ลดปริมาณการปล่อยน้ำเสียและลดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนได้แก่ ตะกั่ว โลหะหนักอื่นๆ, โซดาไนต์ และ คาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้เพื่อความเหมาะสมสำหรับงานทางด้านนี้[8] คือ ระบบรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งได้มีการพัฒนาตั้งแต่ปี คศ. 1960 โดยการนำน้ำที่ได้จากขบวนการรีเวอร์สออสโมซิสมาใช้ และในส่วนของน้ำเข้มข้นจากขบวนการนี้จะต้องนำไปบำบัดอีกครั้งหนึ่ง การเพิ่มระบบรีเวอร์สออสโมซิสเข้าไปในระบบบำบัดน้ำเสีย จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และเป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้สารเคมี

ระบบรีเวอร์สออสโมซิสสามารถนำไปใช้เพื่อลดหรือนำไปใช้กับระบบ zero discharge โดยที่

- ให้ปริมาณน้ำกลับคืนประมาณ 85 % ของน้ำเสียเพื่อนำน้ำที่ได้ไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ
- ปริมาณน้ำเสียลดลงถึง 85 % ของน้ำเสีย นั้น ๆ
- ค่าใช้จ่ายในด้านการบำบัดน้ำเข้มข้นต่ำ
- ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่ำ

ขบวนการรีเวอร์สออสโมซิสเป็นที่นิยมใน ระบบ zero discharge อย่างมาก [9] เนื่องจากความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนสูง เช่น สารละลาย, เกลือ และซิลิกา โดยที่ราคาต่ำได้มีการพัฒนาเนื้อเยื่อเป็นแบบ thin-film composite ซึ่งสามารถกำจัดซิลิกา ได้สูงถึง 99.6 % และ salt rejection ได้ถึง 99.5% ดังนั้นมั่นใจได้ว่าคุณภาพน้ำนี้ สามารถนำไปใช้กับระบบหอทำน้ำเย็น, หรือ boiler ได้เป็นอย่างดี

ในการใช้ขบวนการรีเวอร์สออสโมซิสนี้สามารถนำน้ำเสียจากขบวนการต่างๆ มารวมกันเพื่อบำบัดเช่น

- น้ำจาก Blowdown ของหอทำน้ำเย็น
- น้ำจากการฟื้นฟูประสิทธิภาพของระบบทำน้ำอ่อน
- น้ำจากการฟื้นฟูประสิทธิภาพของระบบทำน้ำจัดอ็อกอน
- น้ำเสียจากขบวนการล้างสารเคมี

ถ้าในแต่ละส่วนที่มาจากหลายๆขบวนการจะต้องผ่านมายังบ่อกักจากนั้นปั๊มสู่ระบบพรีทริทเมนต์ที่ซึ่งรวมเอาขบวนการรวมตัวกันของอนุภาคขบวนการแยกของแข็ง-ของเหลวออกจากกัน และใช้การกรองเพื่อแยกของแข็งแขวนลอยออกจากระบบ หลังจากนั้นจึงผ่านเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิส สำหรับน้ำที่ได้จากขบวนการน้ำเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระบบหอทำน้ำเย็น หรือ boiler สำหรับน้ำเข้มข้นซึ่งมีปริมาณน้อยจากขบวนการนี้สามารถนำไปบำบัดต่อได้โดยการใช้การระเหยน้ำออกหรือใช้ระบบแรงเหวี่ยง ซึ่งของแข็งที่ได้สามารถนำไปฝังกลบได้

วิธีการเลือกเทคโนโลยีสำหรับขบวนการ zero-liquid-discharge [10]

มีเทคโนโลยีหลาย ๆ แบบที่สามารถให้ผลประโยชน์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการออกแบบ, ความต้องการคุณภาพน้ำที่แตกต่างกัน, องค์ประกอบของน้ำเสีย, ค่าดำเนินการและราคาเครื่องมือ, อุปกรณ์ ดังนั้นรีเวอร์สออสโมซิสก็ไม่สามารถใช้กับน้ำเสียทุกประเภท เช่น ถ้าในน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงมาก ๆ ก็ไม่สามารถใช้ระบบรีเวอร์สออสโมซิสได้หรือ ถ้าในน้ำเสียมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ๆ ถ้าใช้ระบบรีเวอร์สออสโมซิสก็อาจทำให้เกิดการอุดตันบ่อยๆ ทำให้ลดประสิทธิภาพของเนื้อเยื่อได้

เทคโนโลยีอื่น ๆ ที่มีใช้กันเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสียมีดังต่อไปนี้ [13] clarifier, vapor compression evaporation, ion exchange จะเลือกแบบไหนต้องขึ้นกับว่าคุณสมบัติของน้ำเหมาะสมกับแบบไหน บางขบวนการอาจต้องใช้หลายขบวนการต่อกันจึงจะทำให้ได้คุณภาพน้ำที่ต้องการ

clarifiers ใช้สำหรับกำจัดของแข็งประมาณ 50-80 % สำหรับขบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี สารเคมีที่เติมลงในน้ำเสียเพื่อทำให้องค์ประกอบที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น ซิลิกา, แคลเซียม และแมกนีเซียม

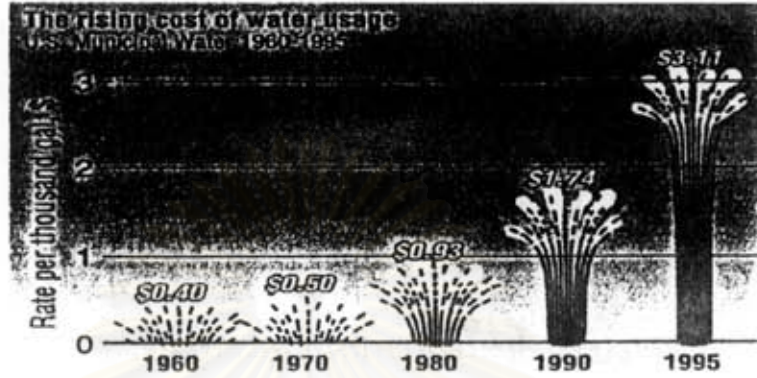
(ความกระด้าง) เกิดการรวมตัวขึ้นและตกอยู่ด้านล่าง สำหรับน้ำสะอาดจะอยู่ด้านบนของ clarifier อนุภาคที่ตกอยู่ด้านล่างจะอยู่ในรูปของสไลด์จ์ สไลด์จ์เหล่านี้จะต้องถูกส่งไปบำบัดต่อและข้อจำกัดของ clarifiers นี้คือ ไม่สามารถกำจัดของแข็งที่ละลายน้ำได้ในทุกๆตัว เช่น โซเดียมคลอไรด์

vapor compression evaporators หรือบางที่เรียกว่า brine concentrators vapor compression evaporation ใช้หลักการเหมือนการกลั่นโดยการให้ความร้อนที่จุดหลอมเหลวการกลายเป็นไอเพื่อกำจัดน้ำออกจากของแข็ง เครื่องทำระเหยสามารถทำได้ถึง 90 % ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือสามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายชนิด แต่อย่างไรก็ดี ราคาของเครื่องที่สูงและต้องการเงินลงทุนสูงมากกว่า รีเวอร์สออสโมซิส และระบบนี้ต้องการพลังงานสูง อีกทั้งเครื่องทำระเหยยังมีความต้องการในการเริ่มต้น, หยุดระบบที่ซับซ้อนยุ่งยาก

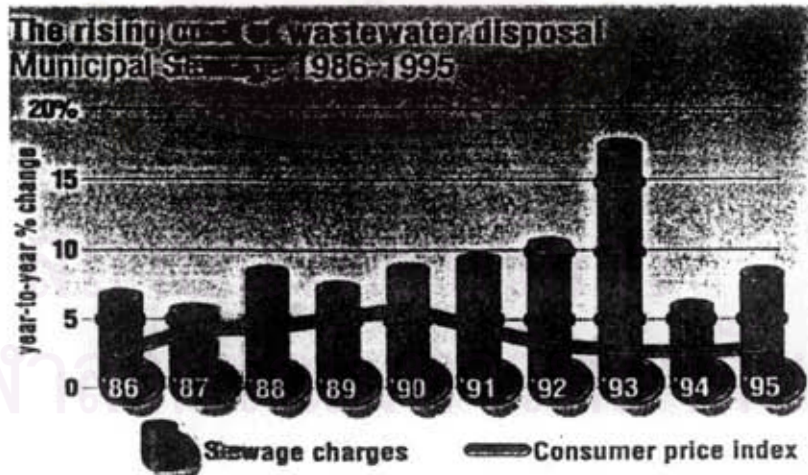
ion exchange เพื่อที่จะกำจัดอิออนประจุบวกและลบที่ไม่ต้องการออกจากรน้ำเสีย การใช้เรซินนี้ทำให้ได้น้ำที่มีคุณภาพสูง และสามารถกำจัด TDS ได้สูง ข้อดีของเรซินนี้สามารถเลือกเรซินเพื่อใช้กำจัดอิออนเฉพาะในน้ำเสียนั้น ๆ แต่อย่างไรก็ดีการฟื้นฟูประสิทธิภาพเรซินต้องใช้สารเคมีและต้องทำการ neutralizerd น้ำทิ้งจากการฟื้นฟูก่อนที่จะปล่อยทิ้งด้วย

รีเวอร์สออสโมซิส เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้พลังงานต่ำ ในขณะที่การอุดตันของจุลชีพก็เป็นปัญหาสำหรับเมมเบรนแต่สามารถกำจัดได้ด้วยการใช้ thin-film composite การทำงานของระบบที่ดีได้จะต้องมาจากการฝึกฝนพนักงานอย่างดีให้รู้ระบบและการรู้เทคนิคการทำงานของระบบอย่างชัดเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค1 แสดงราคาน้ำประปาที่เพิ่มขึ้นระหว่างปี คศ.1960-1995



รูปที่ ค2 แสดงค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียระหว่างปี คศ.1986-1995

ภาคผนวก ง.

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับงาน

Recycle Waste Water



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Unit operations widely used for the Recycle reuse of waste water [10,13]

Unit operation	Function
Systems to recover aqueous cleaners	Use ceramic ultra or microfilters to regenerate aqueous cleaners used in metal finishing and automotive industries
Caustic-etch regeneration system	remove dissolved aluminium from caustic solutions that are used during etching or anodizing processes
Ceramic membrane system	Recover aqueous cleaners, caustic, oil and various solvents. They can also be configured to pretreat water (particularly surface water) prior to RO, removing suspended solids and organic matter that would otherwise foul RO membrane
Chemical reclamation system	Recover usable constituents (eg.,acids, ammonia,solvents and other chemicals) from waste water streams. For example, vacuum distillation can recover hydrochloric acid from electroplating and metal finishing solutions, producing clean water and HCl with less than 10 ppm total metal and less than 100 ppm total organic carbon
Continuous deionization system	Use ion exchange resins , ion exchange membranes and an electrical current to purify water, without the problems associated with using acid and caustic regenerants. An electric current continuously regenerates the resins, producing consistent, high-purity water with no downtime

Electrodialysis systems	Segregate contaminated plating rinse waters into two products - a purified filtrate (essentially water) and a metal-rich concentrate stream- both of which can be recycled
Filtration systems (Bag, cartridge, sand, carbon, media, and membrane filters)	Clarify water by removing suspended solids ranging from 0.1-10 micron to less than 1 ppm. Ceramic and polymeric membranes can also be used as polishing filters
Ion exchange system	Remove soluble ions, total dissolved solids and other chemicals. They are a key method for recovering heavy metals
Microfiltration and Ultrafiltration system	Use ceramic or polymeric membrane to remove suspended solids, high -molecular- weight species, colloids and bacteria
Physical and chemical treatment system	Remove heavy metals and suspended solids. Some precipitation systems use sulfide precipitation and filtration to remove chelated and non-chelated heavy metals to ppb levels
Reverse osmosis (RO) system	Remove dissolved solids , salt and other contaminants

ภาคผนวก จ

การออกแบบ และคำนวณเมมเบรน “ฟิล์มเทค”

FILMTEC MEMBRANE ELEMENT

1. Element Type Selection

The FT30 membrane [14] is available in three different grades, as SW30HR (Sea Water High Rejection) , SW30 (Sea Water), and BW30 (Brackish Water). These membranes are used in spiral wound membrane elements, which have the same designation. In the tap water element TW30, the BW30 membrane is used. Membrane elements are available in various diameters and lengths. Standard diameters are 2.5, 4.0 and 8.0 inch (64, 102 and 203 mm). The standard length is 40 inch (1,016 mm) . For example the nomenclature of an 8 inch diameter, 40 inch long Brackish Water Element is BW30-8040. (Membrane surface area is sometimes used in place of diameter and length (i.e. BW30-400)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Table 1 shows the sizes and types of FT30 membrane elements.

Diameter (Inch)	Length (Inch)	SW30HR	Type		TW30
			SW30	BW302	
1.5	12				X
1.8	12				X
2.0	13				X
2.0	26				X
2.5	14	X	X	X	X
2.5	21	X	X	X	X
2.5	40	X	X	X	X
4.0	14			X	X
4.0	21	X	X	X	X
4.0	40	X	X	X	X
4.6	11				X
4.6	19				X
4.6	41				X
8.0	40	X	X	X	

To select the right element for a given purpose, there are several criteria to be considered¹ :

- Feed water TDS

< 1,000 mg/l ⇨ TW30

< 5,000 mg/l ⇨ BW30

5,000-15,000 mg/l ⇨ SW30

15,000-50,000 mg/l ⇨ SW30HR

- System salt rejection

> 92% ⇨ TW30

> 98% ⇨ BW30

> 99% ⇨ SW30

> 99% ⇨ SW30HR

- Required feed pressure
 - < 21 bar(300 PSI) ⇨ TW30
 - < 41 bar(600 PSI) ⇨ BW30
 - > 41 bar(600 PSI) ⇨ SW30, SW30HR

- System dimensions restricted
 - yes ⇨ element length < 40"
 - no ⇨ element length = 40"

- Required permeate flow
 - < 0.2 m³/h (0.9 GPM) ⇨ element diameter ≤ 2.5"
 - < 3 m³/h (13 GPM) ⇨ element diameter = 4"
 - > 3 m³/h (13 GPM) ⇨ element diameter = 8 "

Some applications, e.g. in the food and beverage industry, require a sanitary membrane element design. Many element sizes are available in a "full fit"(FF) configuration : these elements have a polypropylene net instead of an adhesive tape or a fiberglass wrapping and do not have a brine seal. Thus, there is no stagnant water between the element shell and the inner side of the pressure vessel.

Please contact your local Dow Sales Office for further information.

2. Number of Elements and Pressure Vessels

RO systems are usually designed for a specified permeate flow Q_p . To achieve this flow, a number of membrane elements N_e is required. This section describes how the number of elements and pressure vessels required for a specified permeate flow and a specified feed water source can be estimated. With these figures, a system can be chosen. The chosen system must then be analyzed using the FILMTEC[®] Reverse Osmosis System Analysis (ROSA) computer program). This program calculates the feed pressure and the permeate quality of the system as well as the operating data of all individual elements. It is then easy to optimize the system design by changing the number and type of elements and their arrangement. The average permeate flow

per membrane element, \bar{Q}_{pi} is :

$$\bar{Q}_{pi} = \frac{Q_p}{N_E} \quad (1)$$

The maximum allowed permeate flow per individual element, Q_{pmax} depends on the feed water quality according to the System Design Guidelines. For a softened surface supply, for example, Q_{pmax} is 25 m³/d (6,500 GPD) for an eight inch element. This limit must not be exceeded by any element of the system. The lead element are usually the critical ones with the highest permeate flows, because these experience the highest feed pressure and the lowest osmotic pressure of the feed water.

Brackish water systems are usually designed with the lead element(s) producing the maximum allowed permeate flow Q_{pmax} according to the given feed water quality. The permeate flow of the other elements decreases in feed flow direction, because the feed pressure drops due to the flow resistance, and the osmotic pressure increases due to the concentration of rejected salts. In most standard applications, the average permeate flow per element, \bar{Q}_{pi} is about 75% of the maximum permeate flow, Q_{pmax}

$$\bar{Q}_{pi} = 0.75 \times Q_{pmax} \quad (2)$$

Thus, the number of elements can be estimated from the chosen Q_{pmax} value with equations(1) and (2) :

$$N_E = \frac{Q_p}{0.75 \times Q_{pmax}} \quad (3)$$

Example :

Given :	Chosen :
<ul style="list-style-type: none"> ● Feed source : Brackish well water, softened, SDI < 3 ● Required permeate flow : $Q_p = 30 \text{ m}^3/\text{h} = 720 \text{ m}^3/\text{d}$ (132 GPM) ● Six-element vessels to be used 	<ul style="list-style-type: none"> ● BW30-8040 element ● $Q_{p\text{max}} = 28 \text{ m}^3/\text{d}$ (7500 GPD) (System Design Guidelines)
Estimated :	Chosen :
<ul style="list-style-type: none"> ● $N_E = 34.3$ (from equation 3) ● $N_V = 5.7$ (from equation 4) 	<ul style="list-style-type: none"> ● System with 6 pressure vessels in a 4 : 2 arrangement

In **sea water** desalination systems the limiting parameter is usually not the permeate flow per element, but the feed pressure, which must not exceed 69 bar (1,000 PSI). The number of elements required for a specific system permeate flow Q_p can roughly be estimated from :

$$N_E = \frac{Q_p}{0.75 \times Q_{p\text{spec}}} \quad (5)$$

The number of pressure vessels, N_V is obtained from :

$$N_V = \frac{N_E}{N_{EPV}} \quad (4)$$

Where N_{EPV} is the number of elements per pressure vessel. Standard vessels for big plants contain six elements. N_V is rounded to the next highest whole number.

For six-element vessels, the staging ratio is typically chosen as close to 2:1 as the whole number ratio of the vessel numbers of two successive arrays will allow. For vessels with less than six elements, the staging ratio will be less, for example 4:3:2 in a three-array system with four-element-vessels.

Where $Q_{p,spec}$ is the specific permeate flow per element under Sea Water Test Conditions, as given in the Technical Bulletin. From the number of elements, one can determine the number of pressure vessels as already described. One array is usually sufficient for sea water systems with maximum 40% recovery.

3. System Performance Projection

3.1 System Operating Characteristics

Before a system performance projection is run, you should be familiar with the operating characteristics of a system. These will be explained using a typical example. Figure 1 shows a two-array system with three 6-element-pressure vessels using a staging ratio of 2:1.

Two-array systems with 6-element vessels effectively employ twelve spiral wound elements in series and are generally capable of operating at an overall recovery rate of 60 to 75%. For such systems the average individual recovery rate per element will vary from 7 to 12%. To operate a two-array system at an overall recovery much higher than 75% will cause an individual element to exceed the maximum recovery limits shown in the Design Guidelines of Chapter 4.1. When this happens, a third array will have to be employed which places eighteen elements in series shifting the average element recovery rate to lower values.

If two-array systems are operated at too low a recovery (e.g. < 60%), the feed flow rates to the first-array vessels can be too high causing excessive feed/concentrate-side pressure drops and potentially damaging the elements. For example, FILMTEC[®] 8040 elements have a maximum feed flow rate of 11 to 16 m³/h (50-70 GPM) depending on water source (see System Design Guidelines, Section 4.1). As a result, systems with lower than 60% recovery will typically utilize single-array configurations. Maximum flow considerations can also limit the staging ratio. It is unlikely to find systems with staging ratios greater than 3:1.

When a single RO element is run, the operating variables are readily measured, and performance can be easily correlated. When a large number of elements are combined in a system with a complex series-parallel-series configuration and only inlet operating variables

are known, system performance prediction becomes considerably more complex. Feed pressures and salt concentrations for each element in series are changing. The rate and extent of these changes are dependent not only on the inlet conditions and overall recovery, i.e. staging ratio(s).

Figure 2 illustrates the dynamic nature of predicting system performance based on the sum of individual element performances within the system. It shows how five different element performance parameters vary throughout the twelve series positions in a 2:1 array of 6-element pressure vessels. The system is operating at a 75% recovery and 25°C with a feed osmotic

pressure of 1.4 bar (20 PSI, which roughly corresponds to a 2,000 mg/l feed TDS). The inlet feed pressure has been adjusted so that the lead BW30-8040 element is producing 7500 gpd (28.4 m³/d) (7,500 GPD), the maximum permeate flow for a well water system with feed SDI < 3

The top third of Figure 2 shows individual element permeate flows decreasing uniformly throughout the series configuration from 28.4 m³/d in the lead element of the first array to approximately 3300 gpd (12.5 m³/d) in the last element of the second array. The average element permeate rate is 22 m³/d (5,800 GPD) or 77% of the maximum allowable limit.

Permeate flow decreases because the net permeation driving force $\Delta P - \Delta \pi$ is uniformly declining. (ΔP is the pressure difference between the feed side and the permeate side of the membrane; $\Delta \pi$ is the osmotic pressure difference between both sides). This is evident by looking at the two curves in the bottom third of the figure. The upper curve shows how the inlet feed pressure to each element (P) decreases due to the upstream concentrate-side pressure losses within each element.

The bottom curve shows how the inlet feed osmotic pressure to each element (π_{in}) is increasing as salt-free (mostly) permeate is progressively removed by each upstream element, leaving behind a steadily increasing concentrate concentration. The difference between these two pressure curves is roughly equivalent to the net permeation driving force.

The middle portion of Figure 2 exhibits two subtle but important effects. The left-hand scale shows how individual element recovery varies within the twelve element(series)

sequence. The break occurs between the first and second arrays. In general, the individual recovery profile will increase in both arrays but typically more strongly in the first. The system designer-utilizing a computer program-must verify that the last element in the first array does not exceed the appropriate recovery limit. As element recovery increase, the effective osmotic pressure that the membrane "sees" will be higher due to concentration polarization. This inefficiency reduces permeate flows and can lead to membrane scaling or fouling if allowed to go to excess.

The other curve in the middle portion of Figure 2 (right-hand scale) illustrates an interesting phenomenon exhibited by the FILMTEC[®] FT30 membrane. It shows that the membrane water permeability coefficient, or A-value, is a reversible function of salt concentration, decreasing at higher salinities and increasing at lower salinities.

The water permeability declines by almost 15% in this example through the series of twelve elements, and this must be taken into consideration if an accurate design for system permeate flow rate is to be obtained.

3.2 Design Equations and Parameters

The performance of a specified RO system is defined by its feed pressure (or permeate flow, if the feed pressure is specified) and its salt passage. In its simplest terms, the permeate flow Q through an RO membrane is directly proportional to the wetted surface area S times a net permeation driving force $(\Delta P - \Delta \pi)$. The proportionality constant is the membrane permeability coefficient or A-value. The familiar water permeation equation has the form :

$$Q = A \times S \times (\Delta P - \Delta \pi) \quad (1)$$

The salt passage is by diffusion, hence the salt flux N_A is proportional to the salt concentration difference between both sides of the membrane. The proportionality constant is the salt diffusion coefficient or B-value.

$$N_A = B \times (C_{fc} - C_p) \quad (2)$$

Where C_{fc} = feed-concentrate average concentration

C_p = permeate concentration

There are basically two ways to calculate the performance of a specified design :

Element-to-Element

This is the most rigorous calculation method. It is too tedious for hand calculation, but it is suitable for computer calculations. All the operating conditions of the first element must be known, including the feed pressure.

Then one can calculate the flow, pressure etc. of the concentrate, which is the feed to the second element. After calculating the results for all the elements, one may discover that the original feed pressure was too high or low, so the trial and error process starts with a new pressure.

With the help of the FILMTEC Reverse Osmosis System Analysis computer program, accurate results can be obtained very quickly, so that this program can be used to modify and optimize the design of a system. Accordingly, the entire system calculation method will not be described here. It is also not intended to outline the process of the element to element computer calculation. However, the governing equations and parameters are given in Table 1.

In order to enable the determination of values for the terms A , ΔP , and $\Delta \pi$ in equation(1) the water permeation equation is expanded to equation (3). The permeate concentration can be derived from equation(2) after conversion into equation(12). The design equations are listed in Table 1, the symbol definitions the Table 3.

Entire System

This is a fairly easy method. Average values are used to calculate feed pressure and permeate quality if the feed quality, temperature, permeate flow rate, and number of elements is known. If instead of number of elements the feed pressure is specified, the number of elements can be calculated, with a few iterations. This method generally gives a result within 5% of that from element to element calculation. The design equations are listed in Table 2, the symbol definitions in Table 3.

Table 1 : Design Equations for Projecting RO System Performance Individual Element Performance

Item	Equation	Ref.No.
Permeate Flow	$Q_p = A_i (\pi_f) \times S_i \times TCF \times FF \times (P_i - \frac{\Delta P_{f,i}}{2} - P_p - \pi_f + \pi_p)$	(3)
Average Concentrate-Side Osmotic Pressure	$\bar{\pi}_c = \pi_f \times \frac{C_{i,c}}{C_f} \times pf_i$	(4)
Average Permeate-Side Osmotic Pressure	$\pi_p = \pi_f \times (1 - R)$	(5)
Ratio: Arithmetic Average Concentrate-Side to Feed Concentration for Element i	$\frac{C_{i,c}}{C_f} = [1 + \frac{C_a}{C_f}] / 2$	(6)
Ratio: Concentrate to Feed Concentration for Element i	$\frac{C_a}{C_f} = [1 - Y_i(1 - R)] / [1 - Y_i]$	(7)
Feed Water Osmotic Pressure	$\pi_f = 1.12 \times (273 + T) \times \sum m_i$	(8)
Temperature Correction Factor for FT30 Membrane	$TCF = \text{EXP} [2640 \times (1/298 - 1/(273 + T))]; T \geq 25^\circ\text{C}$ $= \text{EXP} [3480 \times (1/298 - 1/(273 + T))]; T \leq 25^\circ\text{C}$	(9a) (9b)
Concentration Polarization Factor for FILMTEC®8 elements	$pf_i = \text{EXP} [0.7 \times Y_i]$	(10)
System Recovery	$Y = 1 - ((1 - Y_1) \times (1 - Y_2) \times \dots \times (1 - Y_n)) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i)$	(11)
Permeate Concentration	$C_p = B \times C_f \times pf_i \times TCF \times \frac{S_f}{Q_i}$	(12)

The subscript I in the equations of Table 1 indicates that they apply to the I^{th} element in a sequence of n elements in a series flow configuration. To accurately determine system performance, Equation 3 is successively solved for each of the n elements starting with an inlet set of conditions. The solutions depend on mass balances around each element for salt (Equation 7) and water (Equation 11), as well as correlations for individual element parameters such as concentrate-side flow resistance, ΔP_c (Equation 20c); temperature correction factor for water permeability, TCF (Equation 9); polarization factor, pf_i (Equation 10) and the membrane permeability coefficient for water, $\Lambda_1 (\pi)$ (Equation 21) which in the case of the FT30 membrane depends on the average concentrate concentration or, alternatively, osmotic pressure. These solutions usually involve a suitable average for the feed and permeate side hydraulic and osmotic pressures. For low recovery values typical of single element operation, an accurate solution can be obtained using a simple arithmetic average of the inlet and outlet conditions. Even so, since the outlet conditions are not known, iterative trial and error solutions are involved.

3.3 System Evaluation Computer Program

A FILMTEC[®] Reverse Osmosis System Analysis (ROSA) computer program is available to project the performance of given systems, and to optimize the design of the system. It can be further used for scaling calculations and to evaluate the performance of an existing system from its operating data.

Table 2: Design Equations for Projecting RO System Performance System Average Performance

Item	Equation	Ref.No
Total Permeate Flow	$Q = N_p \times S_p \times \bar{A}(\pi) \times TCF \times FF \times (P_1 - \frac{\Delta P_s}{2} - P_2 - \pi \{ \frac{C_2}{C_1} \times \pi \} - (\Gamma - R))$ (13)	(13)
Ratio: Average Concentrate-Side to Feed Concentration for System	$\frac{C_2}{C_1} = \frac{-R \times \ln(1 - Y/Y_L)}{Y - [1 - Y_L] \times \ln(1 - Y/Y_L)} + (1 - R)$ (14)	(14)
Limiting System Recovery	$Y_L = 1 - \frac{\pi_1 \times \bar{\pi} \times R}{P_1 - \Delta P_{ic} - P_2}$ (15)	(15)
Approximate Log-Mean Concentrate-Side to Feed Concentration Ratio for System	$\frac{C_{ic}}{C_1} \Big _{Y_L, R=1} = \frac{\ln(1 - Y)}{Y}$ (16)	(16)
Average Element Recovery	$\bar{Y}_1 = 1 - (1 - Y)^{1/n}$ (17)	(17)
Average Polarization Factor	$\bar{\pi} = \text{EXP} [0.7 \times \bar{Y}]$ (19)	(19)
Average Concentrate-Side Osmotic Pressure for System	$\bar{\pi} = \pi_1 \times \frac{C_2}{C_1} \times \bar{\pi}$ (18)	(18)
Average Concentrate-Side System Pressure Drop for FILMTEC® 8" elements; 2 Arrays	$\Delta P_s = 0.04 \bar{q}_s^2$ (20a)	(20a)
	$\Delta P_s = \left[\frac{0.1 \times Q / 1440}{Y \times N_{v,2}} \times \left(\frac{1}{N_{v,R}} - 1 - Y \right) \right]^2$ (20b)	(20b)
Individual FILMTEC® 8" Element or Single-Array Concentrate-Side Pressure Drop	$\Delta P_{s,e} = 0.01 \times n \times \bar{q}_s^2$ (20c)	(20c)
FILMTEC Membrane Permeability as a Function of Average Concentrate-Side Osmotic Pressure	$\bar{A}(\pi) = 0.125$; $\pi \leq 25$ (21a)	(21a)
	$\bar{A}(\pi) = 0.125 - 0.011 \times (\pi - 25) / 35$; $25 \leq \pi \leq 200$ (21b)	(21b)
	$\bar{A}(\pi) = 0.070 - 0.0001 \times (\pi - 200)$; $200 \leq \pi \leq 400$ (21c)	(21c)
Permeate Concentration	$C_p = B \times C_1 \times \bar{\pi} \times TCF \times \frac{N_p \times S_p}{Q}$ (22)	(22)

Table 3: System Definitions

Q_i	= Element i Permeate Flow (gallons/day, GPD)	Y	= System Recovery (Expressed as a fraction) (= Permeate Flow / Feed Flow)
$A_i(\pi_i)$	= Membrane Permeability @ 25°C for Element i - a function of the average concentrate-side osmotic pressure (gallons/ft ² /day/PSI, GFD/PSI)	$\prod_{i=1}^n$	= Multiplication of n terms in a series
S_E	= Membrane Surface Area per Element (ft ²)	n	= Number of Elements in Series
TCF	= Temperature Correction Factor for Membrane Permeability	Q	= System Permeate Flow (GPD)
FF	= Membrane Fouling Factor	N_E	= Number of Elements in System
P_i	= Element i Feed Pressure (PSI)	\bar{Q}_i	= Average Element Permeate Flow (GPD) = Q/N_E
$\Delta P_{i,c}$	= Concentrate-Side Pressure Drop for Element i (PSI)	$\bar{A}(\pi)$	= Average Membrane Permeability @ 25°C - a function of the average concentrate-side osmotic pressure (GFD/PSI)
P_A	= Element i Permeate Pressure (PSI)	C_c	= Average Concentrate-Side Concentration for System (ppm)
π_i	= Element i Average Concentrate-Side Osmotic Pressure (PSI)	R	= Average Fractional Salt Rejection for System
π_f	= Element i Feed Osmotic Pressure	π	= Average Concentrate-Side Osmotic Pressure for System (PSI)
π_A	= Element i Permeate-Side Osmotic Pressure (PSI)	$\Delta \bar{P}_{i,c}$	= Average Concentrate-Side System Pressure Drop (PSI)
pf_i	= Concentration Polarization Factor for Element i	Y_L	= Limiting (Maximum) System Recovery (expressed as a fraction)
R_i	= Salt Rejection Fraction for Element i (= [Feed Conc. - Perm Conc.] / [Feed Conc.])	\bar{Y}_i	= Average Element Recovery (expressed as a fraction)
$C_{i,c}$	= Average Concentrate-Side Concentration for Element i (ppm)	\bar{pf}	= Average Concentrations Polarization Factor
C_i	= Feed Concentration for Element i (ppm)	Q_c	= Arithmetic Average Concentrate-Side Flow Rate (GPM) (= [Feed Flow + Concentrate Flow] / 2)
C_s	= Concentrate Concentration for Element i (ppm)	N_v	= Number of Six-Element Pressure Vessels in System; = $N_E / 6$
Y_i	= Recovery Fraction for Element i (= Permeate Flow / Feed Flow)	N_{v1}	= Number of Pressure Vessels in First Array of 2-Array System; = $2/3 * N_v$
π_f	= Treated Feed Water Osmotic Pressure (PSI)	N_{v2}	= Number of Pressure Vessels in Second Array of 2-Array System; = $N_v / 3$
T	= Feed Water Temperature (°C)	N_{vR}	= Array Ratio = N_{v1} / N_{v2}
m_j	= Molal Concentration of j th Ion species		
Σ_i	= Summation of All Ionic Species		

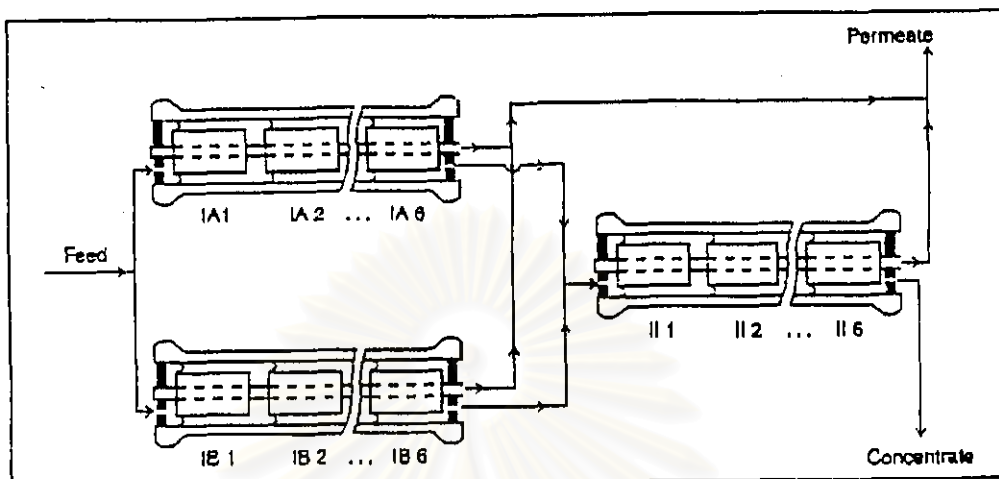


Figure 1: Typical Two-Array Staging Configuration for Spiral Wound RO Elements

Figure 1: Typical Two-Array Staging Configuration for Spiral Wound RO Elements

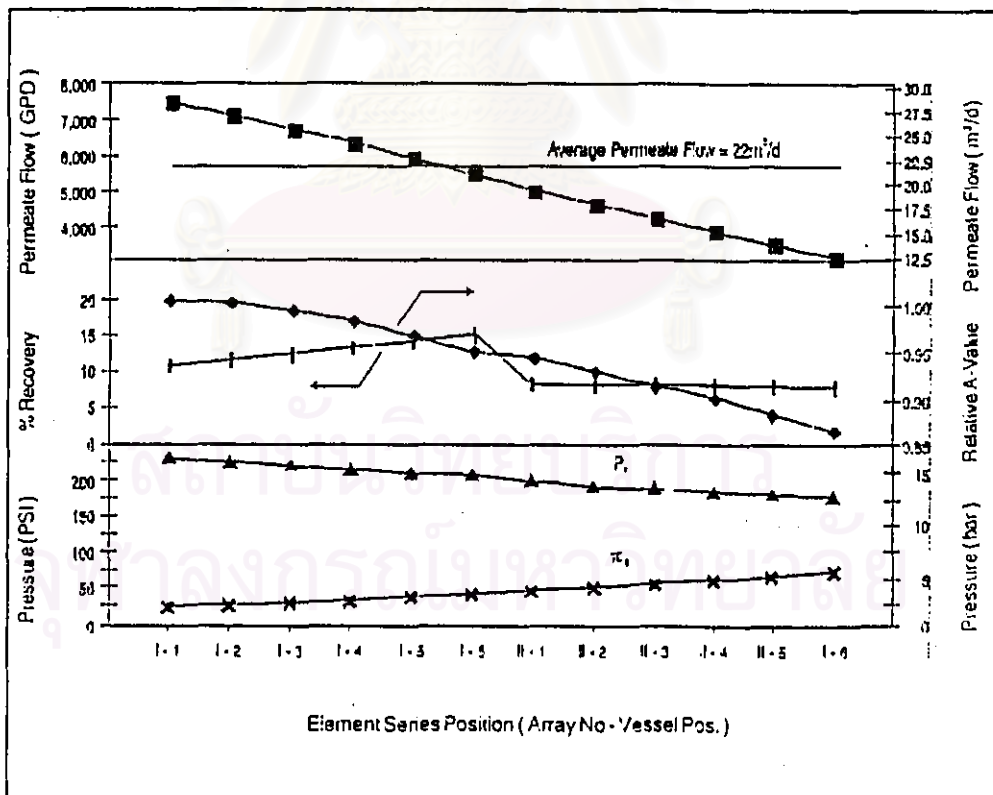


Figure 2: Individual Element Performance in a System 2:1 Array of BW30-8040 Elements (Example)

Figure 2: Individual Element Performance in a System 2:1 Array of BW30-8040 Elements
(Example)

TABLE 4 Characteristics of various commercially-available reverse osmosis [12]

Commercial Name	Manufacturer	Solute	Test Conditions	Flux x 10 ⁴ cm ³ /cm ² s (gfd)	% Rejection
Cross-linked aromatic polyamide					
FT30-SW30HR-8040	FilmTee	NaCl	35,000 ppm, 25°C, pH 8, 5.5 MPa, r = 10%	5.71 (12.1) [0.175 L/s (4000 gpd)]	99.5
FT30-SW30-8040		NaCl	35,000 ppm, 25°C, pH 8.8, 5.5 MPa, r = 10%	8.58 (18.2) [0.263 L/s (6000 gpd)]	99.1
FT30-BW30-8040		NaCl	2000 ppm, 25°C, pH 8, 1.6 MPa, r = 15%	10.7 (22.7) [0.329 L/s (7500 gpd)]	98
FT30-BW		Methanol	2000 ppm, 25°C, pH 7, 1.6 MPa		25
		Ethanol	-		70
		Urea	-		70
		Phenol	51 ppm, pH 7.4, r = 83%, 2.1 MPa		90
		Phenol	85 ppm, pH 11.4, r = 39%, 2.1 MPa		99
FT30-TW30-440		NaCl	2000 ppm, 25°C, pH 8, 1.6 MPa, r = 15%	10.6 (22.5) [0.079 L/s (1800 gpd)]	98

TABLE 4 Characteristics of various commercially-available reverse osmosis (continued)

Commercial Name	Manufacturer	Solute	Test Conditions	Flux x 10 ⁴ cm ³ /cm ² s (gfd)	% Rejection
FT30-SGHR-8040		NaCl	32,300 ppm, 25°C, pH 8, 5.5 MPa, r = 10%	9.72 (20.6) [0.298 L/s (6800 gpd)]	98.4
HR 95	DDS	NaCl	2000 ppm, 25°C, 4 Mpa	20.9 (44.3)	95-97
		Methanol	1000 ppm, 25°C		42
		Ethanol	9000-26,000 ppm, 25°C, 4 Mpa		70-75
		Urea	1000-20,000 ppm, 25°C, 4 Mpa		70
		Phenol	30-1000 ppm		80-90
HR 98	DDS	NaCl	2500 ppm, 25°C, 4 MPa	20.9 (44.3)	98.5-99.5
		Methanol	1000 ppm, 25°C, 7.1 MPa		43
		Ethanol	-		90
411 HR (PA)	Osmonics	NaCl	2000 ppm, 25°C, pH 8, 1.6 MPa, r = 10%	[0.079 L/s (1800 gpd)]	98
815 HR (PA)	Osmonics	NaCl	-	[0.329 L/s (7500 gpd)]	98

ภาคผนวก ฉ

หอทำน้ำเย็น (Cooling tower)

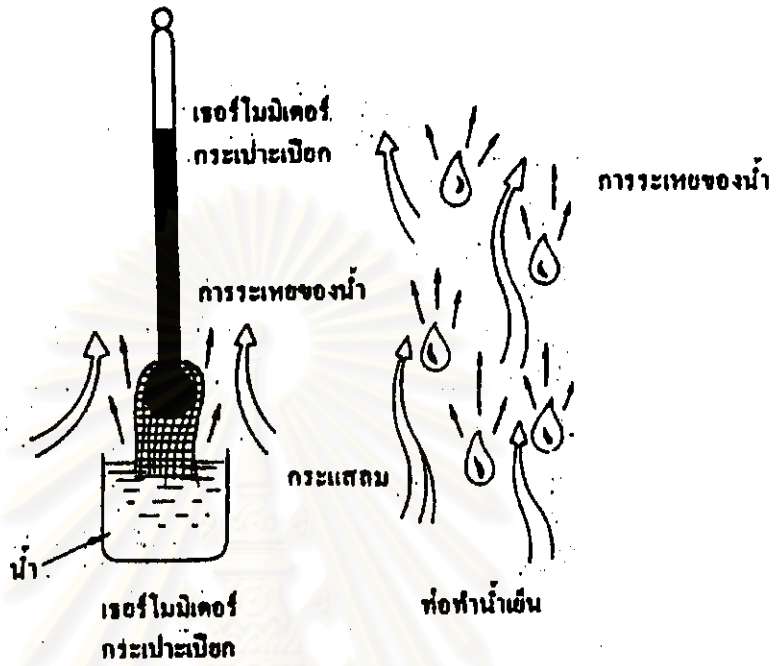
แหล่งน้ำสำหรับระบายความร้อนของเครื่องทำความเย็นระบายความร้อนด้วยน้ำมี บ่อน้ำ แม่น้ำ ทะเลสาบ และน้ำประปา แม่น้ำและทะเลสาบนั้นใช้ได้เฉพาะในกรณีที่เครื่องทำความเย็นอยู่ในระยะใกล้ แหล่งน้ำ ส่วนน้ำประปานั้นมีราคาแพง บ่อน้ำก็มีจำนวนจำกัดเพราะความต้องการของอุตสาหกรรมและการขยายตัวของเมืองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะไม่กี่ปีมานี้ (ดูรูปที่ ฉ.1) แนวทางปฏิบัติโดยปกติในการทำ ความเย็นจึงเป็นการหมุนเวียนน้ำที่ใช้แล้วมาใช้อีกโดยการทำให้น้ำที่ผ่านเครื่องควบแน่นเย็นลงในหอทำน้ำเย็น แล้วเติมน้ำประปาทดแทนน้ำส่วนที่ระเหยไป

หอทำน้ำเย็น [15] เป็นหอที่มีอากาศจากบรรยากาศไหลผ่านน้ำร้อนที่ฉีดลงมาในถังเพื่อทำให้เย็น การทำให้น้ำ 1 kg ระเหยกลายเป็นไอต้องการความร้อนประมาณ 600 kcal เพื่อการระบายความร้อนแฝง โดยการระเหยน้ำส่วนหนึ่ง น้ำส่วนใหญ่ที่เหลือก็จะถูกทำให้เย็นลง ถ้าน้ำระเหยไป 1% น้ำจะถูกทำให้เย็นลง ได้ประมาณ 6°C หอทำน้ำเย็นจึงเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เราสามารถใช้น้ำที่ผ่านเครื่องควบแน่นซ้ำอีก ในการทำ งานของหอทำน้ำเย็น จะสังเกตว่า ถ้าน้ำที่ถูกฉีดลงมาสวนทางกับอากาศที่ไหลเข้าไป น้ำจะเย็นลงถึงอุณหภูมิ กระเปาะเปียกของอากาศได้ นั่นคือ เมื่อถึงสภาวะสมดุลแล้ว น้ำจะไม่เย็นกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของ อากาศ

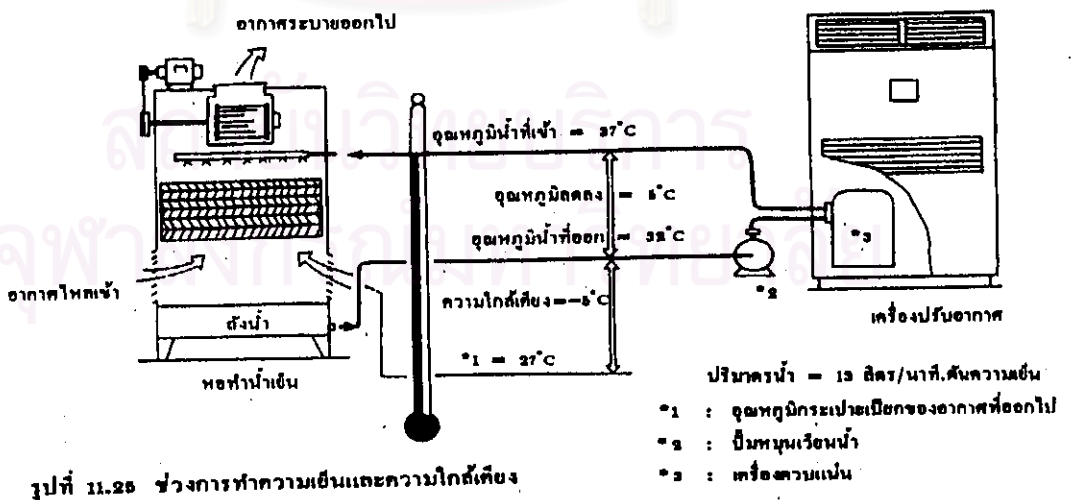
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การระเหยของน้ำจากผิวของใยผ้าฝ้าย

การระเหยของน้ำจากผิวของหลอดน้ำ



รูป ๑.1 การทำงานของท่อทำน้ำเย็น



รูปที่ 11.25 ช่วงการทำความเย็นและความใกล้เคียง

รูป ๑.2 ช่วงการทำความเย็นและความใกล้เคียง

ความต้องการพื้นฐานของหอทำน้ำเย็น

1. การกำหนดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็น

การกำหนดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็น (ต้นการทำความเย็น) โดยสมาคมอุตสาหกรรมหอทำน้ำเย็นญี่ปุ่น (The Japanese Cooling Tower Industry Association) เป็นดังนี้

$$1 \text{ ต้นการทำความเย็น} = 3900 \text{ kcal/h}$$

ถ้า อุณหภูมิกระเปาะเปียกของบรรยากาศโดยรอบ 27°C (WB)

อุณหภูมิน้ำเข้า 37°C

อุณหภูมิน้ำออก 32°C

อัตราการไหลของน้ำ 13 l/min . ton of refrigeration

ค่ามาตรฐานเหล่านี้มีผลกระทบต่อการทำงานของหอทำน้ำเย็นทั้งสิ้น

2. ช่วงการทำความเย็น

ช่วงการทำความเย็นของหอทำน้ำเย็นเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำที่เข้าไปและน้ำที่ออกจากหอทำน้ำเย็น (ดูรูปที่ ฉ.2)

ความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็น (kcal/h)

$$= \text{อัตราการไหลของน้ำ (l/min)} \times 60 \times \text{ช่วงการทำความเย็น}$$

ในหอทำน้ำเย็นที่มีอัตราการไหลของน้ำเท่ากัน หอทำน้ำเย็นที่มีช่วงการทำความเย็นมากกว่าจะมีความสามารถในการทำงานสูงกว่า เพื่อให้ช่วงการทำความเย็นมาก การออกแบบหอทำน้ำเย็นจึงจำเป็นต้องให้น้ำและอากาศสัมผัสกันมากที่สุด

3. อุณหภูมิกระเปาะเปียกของบรรยากาศภายนอก

อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ใช้ควรเป็นค่าที่ได้จากภาวะบรรยากาศในฤดูร้อน อุณหภูมิกระเปาะเปียก 27°C เป็นค่าที่เลือกใช้ เพราะความจริงที่ว่าอุณหภูมิสูงสุดหรือสูงกว่านั้น มีเฉพาะช่วงสั้นๆ ในวันหนึ่งๆ และเพราะเหตุผลทางราคาค่าหอทำน้ำเย็น

4. ความใกล้เคียงในการทำความเย็น (Cooling approach)

ความสามารถในการทำความเย็นของหอทำน้ำเย็นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกระเปาะเปียกเป็นส่วนใหญ่ และมีผลต่ออุณหภูมิของน้ำที่ออก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทั้งสองนี้เรียกว่า "ความใกล้เคียงในการทำความเย็นของหอทำน้ำเย็น"

องศาความใกล้เคียง ($^{\circ}\text{C}$)

$$= \text{อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากหอทำน้ำเย็น ($^{\circ}\text{C}$)} - \text{อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^{\circ}\text{C}$)}$$

เมื่อภาวะอุณหภูมิกระเปาะเปียกของบรรยากาศเท่ากัน หอทำน้ำเย็นที่ให้ความใกล้เคียงในการทำความเย็นน้อยกว่า (อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากหอทำน้ำเย็นต่ำกว่า) จะทำความเย็นได้มากกว่า โดยปกติแล้วหอทำน้ำเย็นที่ทำความเย็นได้ดีกว่าเป็นหอทำน้ำเย็นที่ทำให้ให้น้ำ และ อากาศสัมผัสกันมากกว่าและดีกว่า

หอทำน้ำเย็นแบบใช้พัดลม

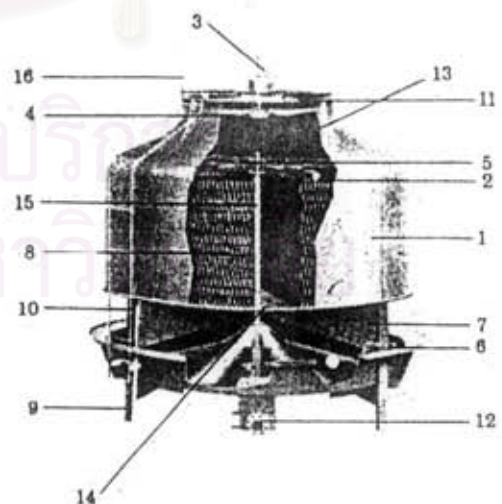
หอทำน้ำเย็นแบบนี้เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด

ในหอทำน้ำเย็นจะมีพัดลมสำหรับการผลิตกระแสลมให้ไหลเข้าไปสัมผัสกับน้ำที่ฉีดลงมา ทำให้น้ำส่วนหนึ่งระเหยเข้าไปในอากาศและน้ำส่วนเหลือเย็นลง

อากาศและน้ำอาจไหลสวนทางกัน (counter flow) รูปที่ ๑.3 หรืออาจไหลตัดผ่านกัน (cross flow) รูปที่ ๑.4 ส่วนแบบที่ไหลขนานไปทางเดียวกันไม่นิยมใช้กัน หอทำน้ำเย็นแบบไหลสวนทางกันในแนวดิ่งเป็นแบบที่สูงกว่าแต่ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่าแบบไหลตัดกันในแนวนอน ปริมาณของน้ำที่หอทำน้ำเย็นทำให้เย็นโดยปกติ $7 \text{ m}^3/\text{h}$ หรือมากกว่าต่อตารางเมตร

รูปที่ ๑.3 เป็นหอทำน้ำเย็นที่มีตัวถังทำด้วยใยแก้วประสานด้วยกาวยเรซิน (FRP : Resin Reinforced Glass Fiber) ซึ่งมีน้ำหนักเบาและทนทานต่อการกัดกร่อน

1. เปลือกหุ้ม (casing)
2. ท่อฉีดน้ำ (spray pipe)
3. เกียร์มอเตอร์ (geared motor)
4. พัดลม (fan)
5. เครื่องคัดกรองน้ำ (eliminator)
6. ถังน้ำ (water tank)
7. ผนังแบ่งกัน (partition)
8. โถใส (filling)
9. ขาค้ำ (leg)
10. ทางดูด (suction frame)
11. เรือนมอเตอร์ (motor housing)
12. ทางออกน้ำหล่อเย็น (cooling water outlet)
13. ประกันเพลานแบบโรตารีสำหรับท่อฉีดน้ำ (rotary bearing for spray water pipe)
14. ท่อขึ้น (riser)
15. ท่อภายใน
16. บันได



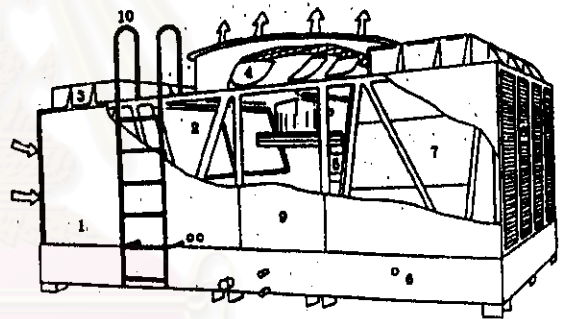
รูป ๑.3 หอทำน้ำเย็นแบบไหลสวนทางผ่าน (ทำด้วยเรซิน)

หอทำน้ำเย็นแบบไหลตัดผ่านกันทำด้วยแผ่นเหล็ก

หอทำน้ำเย็นแบบนี้มีตัวถังทำด้วยแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุกันสนิม (ดูรูปที่ ๑.4) อากาศจากบรรยากาศภายนอกเข้าไปทางด้านข้างแล้วไหลออกไปทางส่วนบน ขณะที่น้ำร้อนถูกฉีดลงมาจากส่วนบนของถังให้สัมผัสกับอากาศที่เข้าไปมากที่สุด

น้ำและอากาศในหอทำน้ำเย็นแบบไหลตัดผ่านกันจะไหลตัดผ่านกันเป็นมุมฉาก หอทำน้ำเย็นขนาดใหญ่หลายๆ มักจะเป็นแบบนี้ เพราะแบบไหลสวนทางกันจะมีความสูงมาก

1. เปลือกหุ้ม
2. กิ่งค้ำของงา
3. ถังน้ำ ฉีดน้ำผ่านรูในแผ่นรูฉัด
4. ฉัดลมแนวแกน
5. มอเตอร์พัดลม (แบบบีดสำหรับใช้ภายในอาคาร)
6. ถังน้ำพริกนวดตัวลูกลอย
7. ไซโนทำตัวอวไนคัลลอไรด์
8. บานเกล็ดทางลมเข้า
9. ประตูเข้า
10. บันได



รูป ๑.4 หอทำน้ำเย็นแบบไหลตัดกัน

1. พัดลม

พัดลมทำหน้าที่เอาลมในปริมาณที่ต้องการเข้ามาทำให้น้ำเย็นลง และภายหลังที่ได้ทำให้น้ำเย็นลงแล้ว ลมที่มีความร้อนและความชื้นเพิ่มขึ้นก็จะถูกส่งออกไปภายนอก พัดลมจะถูกขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบทนทานน้ำ แบร์ริงที่ใช้เป็นแบบอัดจาระบีปิดมิดชิดเพื่อตัดปัญหาการต้องอัดจาระบีบ่อยๆ

2. มอเตอร์พัดลม

มอเตอร์พัดลมเป็นแบบทนทานน้ำ และต่อเข้ากับพัดลม สำหรับมอเตอร์ พัดลมขนาดใหญ่ๆ จะมีเฟืองทดรอบให้ต่ำลง พัดลมและมอเตอร์จะติดตั้งอยู่บนถังโดยมีเหล็กยึดแข็งแรง

3. หัวฉีดน้ำ (Water sprayer)

ในหอทำน้ำเย็น มีหัวฉีดน้ำที่จัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ สำหรับหอทำน้ำเย็นขนาด 2 ถึง 10 ตัน อาจใช้หัวฉีดแถวเดียว ขนาด 15 ถึง 40 ตัน อาจใช้หัวฉีดติดตาย 4 แถว ส่วนขนาด 50 ตัน และใหญ่กว่า ใช้แขนหัวฉีดแบบหมุนรอบๆ

4. ใส่น้ำ (Filling)

ใส่น้ำหรือฟิลลิ่งของหอทำน้ำเย็นเป็นส่วนที่ทำให้น้ำเย็นโดยอากาศจากบรรยากาศภายนอกไหลผ่านน้ำที่ฉีดลงมาเป็นส่วนที่ทำให้การทำความเย็นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพส่วนนี้จึงเป็นส่วนที่จำเป็นที่สุดของหอทำน้ำเย็น ใส่น้ำในอาจทำจากแผ่นพลาสติกไวนิลคลอไรด์ อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากหอทำน้ำเย็นไม่ควรสูงกว่า 50 °C

5. เครื่องกรอง (Strainer)

เครื่องกรองเป็นอุปกรณ์สำหรับกรองไม่ให้สกปรกจากหอทำน้ำเย็นเข้าไปในเครื่องควบแน่น เครื่องกรองติดตั้งอยู่ที่ทางออกจากหอทำน้ำเย็น

6. ถังน้ำ

ถังน้ำของหอทำน้ำเย็นทำด้วยใยแก้วประสานด้วยเรซิน เช่นเดียวกับตัวถัง มีน้ำหนักเบาและทนทานต่อการกัดกร่อนมาก

การปรับปรุงแสดงคุณภาพน้ำสำหรับระบบน้ำหล่อเย็นแบบเปิดที่มีการหมุนเวียนกลับ [16]

1. ลักษณะ

ระบบหล่อเย็นแบบวงจรเปิดนี้ เป็นแบบที่มีอุปกรณ์กำจัดความร้อนออกจากน้ำหล่อเย็นที่ใช้แล้ว โดยให้น้ำต้องสัมผัสกับอากาศโดยตรง เช่น หอระบายความร้อน (Cooling Tower) เป็นต้น โดยทั่วไปประกอบไปด้วย

1.1 ตัวดูดสิ่งเทาเวอร์ชนิดอากาศหมุนตามธรรมชาติ (Natural Draft) หรือชนิดอากาศหมุนเวียนด้วยแรงกล (Mechanical Draft)

1.2 ป้อหรือถาดน้ำเย็น ประกอบด้วย

- ท่อเติมน้ำทดแทนเข้าตัวดูดสิ่งเทาเวอร์
- อุปกรณ์บลีดออฟ (Bleed Off)

1.3 เครื่องสูบน้ำหมุนเวียน

1.4 อุปกรณ์ที่จะถูกหล่อเย็น เช่น เครื่องคอนเดนเซอร์ในระบบปรับอากาศ, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger), เครื่องรีดเหล็ก (Rolling Mills), ฯลฯ

ระบบการหล่อเย็นแบบเปิดนี้ เป็นกระบวนการที่ระบายความร้อน โดยที่ให้น้ำไปสัมผัสและดึงความร้อนออกจากอุปกรณ์ที่ร้อน และระบายความร้อนนี้ออกสู่บรรยากาศ โดยใช้วิธีการระเหยของน้ำ (Evaporation) และการระเหยตัวกลายเป็นไอของน้ำนี้จำเป็นต้องใช้ความร้อน ดังนั้นน้ำส่วนที่ระเหยจึงดึงความร้อนจากปริมาณน้ำในส่วนที่เหลืออยู่ ซึ่งตามทฤษฎีแล้วสามารถประเมินได้ว่า การระเหยตัวของน้ำ 1% สามารถช่วยลดอุณหภูมิของน้ำส่วนที่เหลืออีก 99% ได้ถึง 10° ฟาเรนไฮท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

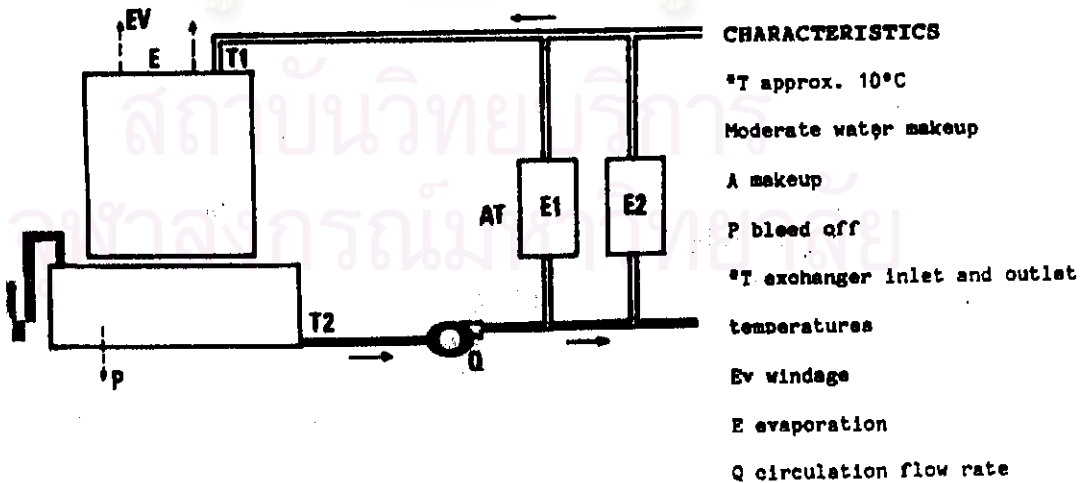
2. คำนิยาม

ในการคำนวณที่จะพบต่อไป จะมีค่านิยามที่ใช้ดังนี้

- Q = อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบ หน่วย ลบ.ม./ช.ม.
- E = อัตราการระเหยน้ำในตู้ลิ่งเทเวอ์ หน่วย ลบ.ม./ช.ม.
- E_v = อัตราการสูญเสียน้ำเนื่องจากลมพัด หน่วย ลบ.ม./ช.ม.
- P = อัตราการบดอัดออฟ หน่วย ลบ.ม./ช.ม.
- P = อัตราการบดอัดออฟทั้งหมด หน่วย ลบ.ม./ช.ม.
- A = อัตราการเติมน้ำทดแทน หน่วย ลบ.ม./ช.ม.
- T_1 = อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าตู้ลิ่งเทเวอ์ หน่วย °C
- T_2 = อุณหภูมิของน้ำหลังออกจากตู้ลิ่งเทเวอ์ หน่วย °C
- $T^* = T_1 - T_2$ หน่วย °C
- C = วัฏจักรของความเข้มข้น

ดังนั้น สูตรสำหรับคำนวณหาอัตราการระเหยของน้ำในตู้ลิ่งเทเวอ์ คือ

$$(E) = \frac{Q \times T}{500}$$



รูป ๑.5 Open Recirculation System

3. การคำนวณหาอัตราการบลิตออฟ

การสูญเสียน้ำในคอลิ่งเทเวอริโดยการระเหยนั้น เนื่องจากน้ำที่จะระเหยกลายเป็นไอ เป็นน้ำที่บริสุทธิ์ไม่มีสารละลายแร่ธาตุปะปน ดังนั้นจึงมีการสะสมสารละลายแร่ธาตุในน้ำหมุนเวียนเพิ่มขึ้นตลอดเวลา จนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง ซึ่งสารละลายบางอย่างไม่สามารถละลายน้ำได้อีกแล้ว ทำให้มีการตกผลึกเกิดขึ้น ตะกักรันขึ้น นอกจากนี้ในบางครั้งน้ำหล่อเย็นมีการสัมผัสกับสารอินทรีย์ทำให้มีการสะสมของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นด้วย และสารอินทรีย์ก็เป็นอาหารของจุลินทรีย์ต่างๆ ด้วย ทำให้มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดขึ้นทั่วไป และก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมา จึงจำเป็นต้องมีระบบน้ำหมุนเวียนบางส่วนทิ้งไป เพื่อควบคุมปัญหาดังกล่าว การระบายน้ำหมุนเวียนบางส่วนทิ้งเรียกว่า บลิตออฟ (Bleed Off)

อัตราการบลิตออฟ นั้นขึ้นอยู่กับ

- อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียน
- ปริมาณของค่า ความกระด้าง แคลเซียม, ความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต และค่าคลอไรด์
- ปริมาณของสารละลายในน้ำ (TDS)
- กรรมวิธีในการปรุงแต่งคุณภาพน้ำ

ในทางทฤษฎี น้ำหมุนเวียน ควรมีค่าความเข้มข้นของสารละลายอยู่ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ แล้วจึงทำการบลิตออฟ เพื่อเป็นการประหยัดน้ำเติมทดแทน และเพื่อรักษาสภาวะเช่นนี้ให้คงที่ จึงต้องบลิตออฟให้จำนวนสารละลายที่ออกจากระบบ เท่ากับ จำนวนสารละลายเกลือแร่ที่จะเติม เข้าสู่ระบบ

ถ้ากำหนดให้ S เป็นน้ำหนักของสารละลายที่ละลายอยู่ในน้ำเติมทดแทน 1 ลบ.ม. นั่นคือ

$$A \times S = P \times S \times C$$

$$A = E + P$$

$$E + P = PC$$

$$(2) \quad C = \frac{E + P}{P}$$

$$(3) \quad P = \frac{E}{C - 1}$$

ปัญหาที่ประสบในระบบหล่อเย็นแบบเปิด

1. ตะกรัน

1.1 สาเหตุการเกิดตะกรัน

ตะกรันเป็นผลที่เกิดจากการตกผลึกของสารประกอบที่ละลายในน้ำ การหมุนเวียนของน้ำในระบบหล่อเย็นแบบเปิดทำให้น้ำหมุนเวียนมีค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือแร่สูงขึ้น จนกระทั่งสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยที่สุดจะเกิดการตกผลึกก่อนตามกฎของ Mass Action สารประกอบใดที่มีผลคูณความเข้มข้นของไอออนที่เกิดจากการแตกตัวสูงกว่าค่า Solubility Product (ผลคูณของสารละลาย) ของมันสารนั้นจะตกผลึก

ตัวอย่างเช่น Ca^{++} และ CO_3^{--} จะทำปฏิกิริยากันได้ CaCO_3



การตกผลึกของ CaCO_3 จะเกิดขึ้นเมื่อผลคูณของความเข้มข้น (ในเทอมของ โมล/ลิตร) ของ Ca^{++} และ CO_3^{--} ในสารละลายที่มีค่าสูงกว่า K_{ca} ซึ่งเรียกว่าค่า Solubility Product Constant นั่นคือ $[\text{Ca}^{++}] [\text{CO}_3^{--}]$ มากกว่า K_{ca}

น้ำที่มีผลคูณของ $[\text{Ca}^{++}]$ และ $[\text{CO}_3^{--}]$ สูงกว่า K_{ca} เรียกว่า Over saturated น้ำชนิดนี้เป็นน้ำที่ไม่เสถียรภาพ กล่าวคือ มันอยู่ในสภาวะภายใต้แรงกดดัน ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในลักษณะที่จะทำให้เกิดการผ่อนคลายของแรงกดดันอันนี้ และแรงกดดันนี้เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำมี Ca^{++} และ CO_3^{--} ในปริมาณมากกว่าที่มันจะมีได้ น้ำจะมีวิวัฒนาการกดดันนี้โดยการไล่ Ca^{++} และ CO_3^{--} ออกมาจากน้ำด้วยการปล่อยให้มีการตกผลึกของ CaCO_3 การตกผลึกนี้ จะเกิดขึ้นจนกระทั่งปฏิกิริยาบรรลุถึงสภาวะสมดุล หรืออิ่มตัวพอดี (Saturated) นั่นคือ

$$[\text{Ca}^{++}] [\text{CO}_3^{--}] = K_{ca}$$

ในทางตรงกันข้าม การตกผลึกของ CaCO_3 จะไม่เกิดขึ้น ถ้าผลคูณของ $[\text{Ca}^{++}]$ และ $[\text{CO}_3^{--}]$ น้อยกว่าค่า K_{ca} น้ำที่อยู่ในสภาวะเช่นนี้ น้ำจะสามารถละลาย CaCO_3 ได้อีกเรียกว่า Under Saturated ถ้าผลึกของ CaCO_3 ถูกเติมลงในน้ำนี้ ก็จะละลายน้ำจนกระทั่งบรรลุถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งจะมีค่าผลคูณของ $[\text{Ca}^{++}]$ และ $[\text{CO}_3^{--}]$ เท่ากับค่า K_{ca}

ค่าของ K_{ca} นี้จะขึ้นอยู่กับค่าสารละลายในน้ำ (TDS), ค่าพีเอช และอุณหภูมิของน้ำ

1.2 ตรรชนีแลงเกลียว

ในการตรวจสอบแนวโน้มในการตกผลึกของการเกิดตะกอน เราสามารถคำนวณโดยใช้ค่า ตรรชนีแลงเกลียว ในการคำนวณหาค่าตรรชนีแลงเกลียวนี้ จะต้องรู้ค่า พีเอช ที่แท้จริงจากการวัด และค่าพีเอชที่จุดอิ่มตัวด้วยหินปูน หรือ PH_s เสียก่อน ค่า PH_s มีความสัมพันธ์ระหว่าง

- ค่าความกระด้างแคลเซียม (Calcium Hardness)
- ค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (M-Alkalinity)
- ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (TDS)
- อุณหภูมิของน้ำ

ค่าของตรรชนีแลงเกลียว สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ตรรชนีแลงเกลียว (S.I.)} = \text{PH} - \text{PH}_s$$

ถ้าตรรชนีมีค่าเป็น บวก แสดงว่า น้ำมีแนวโน้มในการสร้างตะกอนและไม่กัดกร่อนโลหะ
 ถ้าตรรชนีมีค่าเป็น ลบ แสดงว่า น้ำมีแนวโน้มในการกัดกร่อนโลหะ และไม่สร้างตะกอน
 ถ้าตรรชนีมีค่าเป็น ศูนย์ แสดงว่า น้ำอยู่ในสภาพสมดุลแต่อาจจะมีการกัดกร่อนโลหะ เล็กน้อย

1.3 การหาค่า PH_s

จากตารางใน รูปที่ ๑.๘ เราสามารถคำนวณหาค่า A, B, C และ D จากค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด, อุณหภูมิ, ความกระด้างแคลเซียม และ ความเป็นด่างไบคาร์บอเนต ตามตารางนี้ เราสามารถคำนวณหาค่า PH_s จากสูตร

$$\text{PH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A		C		D	
Total solids (mg/L)	A	Calcium hardness (mg/L of CaCO ₃)	C	M Alkalinity (mg/L of CaCO ₃)	D
50-300	0.1				
400-1000	0.2				
B		10- 11	0.6	10- 11	1.0
		12- 13	0.7	12- 13	1.1
		14- 17	0.8	14- 17	1.2
		18- 22	0.9	18- 22	1.3
		23- 27	1.0	23- 27	1.4
		28- 34	1.1	28- 35	1.5
		35- 43	1.2	36- 44	1.6
		44- 55	1.3	45- 55	1.7
		56- 69	1.4	56- 69	1.8
		70- 87	1.5	70- 88	1.9
		88- 110	1.6	89- 110	2.0
		111- 138	1.7	111- 139	2.1
		139- 174	1.8	140- 178	2.2
		175- 220	1.9	177- 220	2.3
		230- 270	2.0	230- 270	2.4
		280- 340	2.1	280- 350	2.5
		350- 430	2.2	350- 440	2.6
		440- 550	2.3	450- 550	2.7
		560- 690	2.4	600- 690	2.8
		700- 870	2.5	700- 880	2.9
		800-1000	2.6	800-1000	3.0

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

$$SI = pH - pH_s$$

If index is 0, water is in chemical balance.

If index is positive, scale-forming tendencies are indicated.

If index is negative, corrosive tendencies are indicated.

รูป ๑.6 Data for calculation of pH of saturation of carbonate

1.4 ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหล่อเย็นหมุนเวียนแห่งหนึ่ง มีคุณสมบัติ ดังนี้

พีเอช	=	7.0
อุณหภูมิ	=	115°F
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	=	128 ppm as
ความเป็นต่างไบคาร์บอเนต (M-Alkalinity)	=	94 ppm as CaCO ₃
ความกระด้างแคลเซียม (Calcium Hardness)	=	85 ppm as CaCO ₃

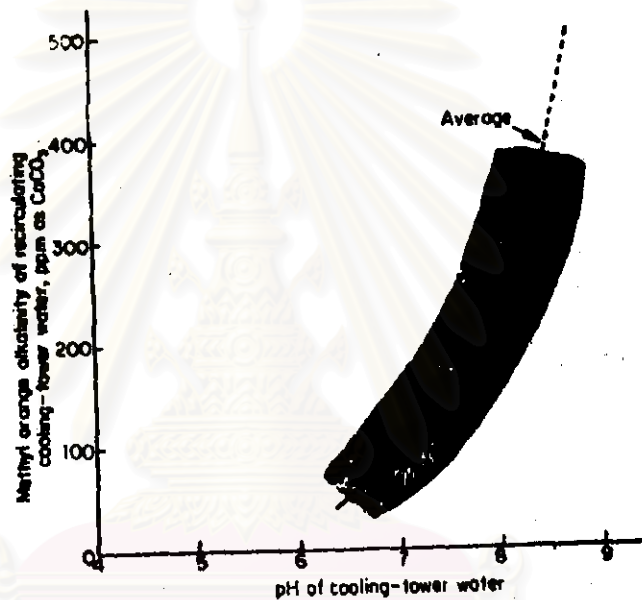
Cycle of Concentration	1	1.5	2	3
M - Alkalinity	94	141	188	282
Calcium Hardness	85	28	170	255
Total Dissolve Solids	128	192	266	384
PH (using the average line in ๑.8)	7.0	7.3	7.7	8.1
PH _s (PH of saturation of CaCO ₃ ๑.7)	7.5	7.1	6.9	6.6
Langelier Index (PH - PH _s)	-0.5	+0.2	+0.8	+1.4

สรุปผล

1. ที่ค่าวัฏจักรความเข้มข้นที่ 1 ค่าดรรชนีและเกลียวรีมีค่า 0.2 แสดงว่า น้ำมีแนวโน้มในการเกิดตะกอนเพียงเล็กน้อยมาก ดังนั้นในสภาวะเช่นนี้ เราอาจไม่ใช้สารเคมีในการปรับสภาพน้ำก็ได้
2. ที่ค่าวัฏจักรความเข้มข้นที่ 2 ค่าดรรชนีและเกลียวรีมีค่า 0.8 แสดงว่า น้ำมีแนวโน้มในการเกิดตะกอนเล็กน้อย ซึ่งเราอาจไม่ใช้สารเคมีในการปรับสภาพน้ำก็ได้ แต่จะมีตะกอนเกิดขึ้นบ้างในระบบ
3. ที่ค่าวัฏจักรความเข้มข้นที่ 3 ค่าดรรชนีและเกลียวรีมีค่า 1.4 แสดงว่า น้ำมีแนวโน้มในการเกิดตะกอน และเมื่อใช้สารเคมีช่วยแล้วจะสามารถเพิ่มวัฏจักรความเข้มข้นได้สูงกว่านี้อีก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนต โดยที่จริงแล้วไม่ได้เพิ่มตามสัดส่วนโดยตรงตามค่าวัฏจักรความเข้มข้น ทั้งนี้เนื่องจากการละลายของก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรดในบรรยากาศ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งจะไปสะเทินค่าความเป็นด่างในน้ำ ทำให้ค่าของความเป็นด่างไบคาร์บอเนตลดน้อยลง อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้นี้ก็มีความเที่ยงตรงพอที่จะนำไปคำนวณหาค่าของ พีเอช ในน้ำจากกราฟจากรูปที่ ๑.7 ได้



รูป ๑.7 Average pH of Cooling-tower. Normally, pH level for 90% of towers is within shaded area

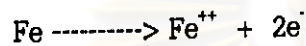
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การกัดกร่อนโลหะ

โลหะเหล็กเป็นวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในระบบหล่อเย็นแบบเปิด และโลหะเหล็กมีองค์ประกอบด้วยเหล็กและสารประกอบอื่นๆ และเนื่องจากความแตกต่างของสภาวะแวดล้อม (เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ, ความเข้มข้นของไอออน, อุณหภูมิ เป็นต้น) ทำให้เกิดขั้วบวกอย่างแรงขึ้นเป็นเฉพาะจุดตามการเกิดการกัดกร่อนแบบ electro-chemical ตามกลไกที่แสดงโดยสมการดังนี้

ที่ขั้วแอโนด

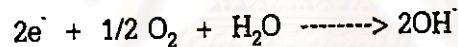
สารเหล็กจะหลุดออกจากสารประกอบเหล็กไปยังสารละลาย คายอิเล็กตรอนออกมา



อัตราความเร็วของปฏิกิริยาคู่กับ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารละลาย Anion เช่น HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{2-} และออกซิเจนในน้ำ

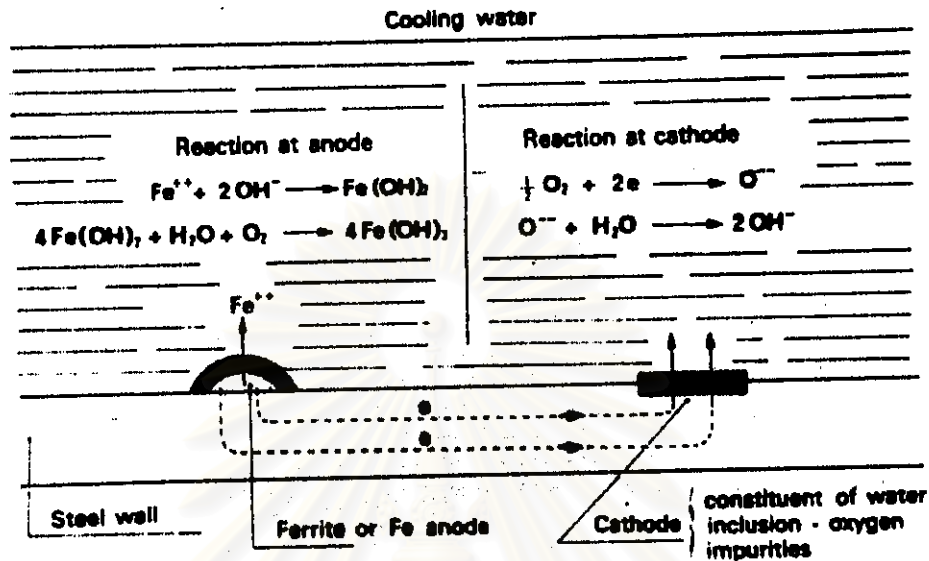
ที่ขั้วคาโทด

เกิดปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอน ดังนี้



ปฏิกิริยากัดกร่อนแบบนี้มักเกิดขึ้นเป็นจุดๆ ทำให้เกิดการกัดกร่อนเกิดเป็นหลุมบนโลหะ และเมื่อเกิดหลุมขึ้น การกัดกร่อนจะยิ่งเพิ่มความรุนแรงขึ้น จากค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายออกซิเจนในน้ำ โดยเฉพาะส่วนที่อยู่ในส่วนลึกของหลุม และที่ผิวบนของหลุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑.8 Mechanism of Electrochemical Corrosion : Steel-Air-Water

3. จุลินทรีย์ต่างๆ

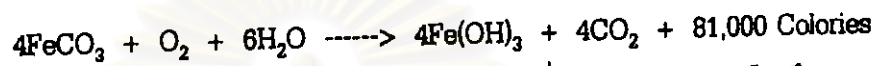
ระบบระบายความร้อนแบบเปิดที่ใช้หอทำความเย็น มักมีปัญหาที่เกิดจากจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งเจริญเติบโต และขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วบนโครงสร้างต่างๆ การที่ระบบหมุนเวียนแบบเปิดมีปัญหาเรื่องจุลินทรีย์มากก็ไม่ใช่เรื่องแปลก เพราะน้ำสัมผัสกับอากาศอยู่ตลอดเวลาในอากาศ นอกจากมีฝุ่นละอองแล้ว ยังมีสิ่งที่มีชีวิตขนาดเล็กเป็นจำนวนมากอีกด้วย การสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำจึงเปิดโอกาสให้สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเหล่านี้เข้าไปอาศัยในน้ำได้ โดยปกติน้ำมักเป็นแหล่งอาศัยที่ดีสำหรับจุลินทรีย์ จึงปรากฏว่า จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้เป็นอย่างดีในหอทำความเย็น เนื่องจากสภาวะแวดล้อมของหอทำความเย็นเหมาะสมสำหรับการขยายพันธุ์ กล่าวคือมีทั้งแสงแดด อาหาร อุณหภูมิที่เหมาะสม จุลินทรีย์ที่พบในระบบดังกล่าวได้แก่ แบคทีเรีย (bacteria), สาหร่าย (algae), ฟันไจ (fungi)

3.1 แบคทีเรีย

แบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในระบบระบายความร้อนแบบเปิดที่ใช้หอทำความเย็น มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ตัวที่เป็นปัญหาต่อระบบหมุนเวียนน้ำ ได้แก่ แบคทีเรียเมือก (bacteria slimes), แบคทีเรียเหล็ก (iron bacteria), แบคทีเรียซัลเฟต (sulfate-reducing bacteria)

แบคทีเรียเมือก (bacteria slimes) แบคทีเรียนี้ถูกเรียกตามลักษณะปรากฏของมัน คือ เกาะเป็นเมือกอยู่บนผิววัสดุ ผลเสียหายที่เกิดจากแบคทีเรียเมือกนี้ คือ มันเป็นฉนวนกันความร้อน ทำให้เกิดเป็นสนิมผุกร่อนเป็นหลุม และขวางการไหลของน้ำ

แบคทีเรียเหล็ก (iron bacteria) อันที่จริงแบคทีเรียชนิดนี้ เป็นพวกเดียวกับแบคทีเรียเมือก แต่เนื่องจากมันกินเหล็ก จึงเรียกว่าเป็นแบคทีเรียเหล็ก การเจริญเติบโตต้องอาศัยออกซิเจน ซึ่งใช้เปลี่ยนเหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริกที่มีสีแดง ตามสมการ



เมื่อมีแบคทีเรียเหล็กเจริญเติบโตอยู่ในท่อหรือส่วนอื่นๆ มักจะจับตัวเป็นเมือกหนาและเหนียว ปัญหาที่เกิดขึ้นก็เป็นเช่นเดียวกับแบคทีเรียเมือก เนื่องจากแบคทีเรียชนิดนี้กินเหล็ก ปัญหาเรื่องการผุกร่อนแบบ plating จึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและรวดเร็ว

แบคทีเรียซัลเฟต (sulfate-reducing bacteria) เป็นแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจน ในการเจริญเติบโต ดังนั้นมันจึงอาศัยอยู่ในใต้กลุ่มตะกอนหรือตะกักรัน หรือในบริเวณที่ไม่มีการเคลื่อนไหว หรือมีการเคลื่อนไหวน้อย แบคทีเรียชนิดนี้สามารถเปลี่ยนซัลเฟตเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นก๊าซที่กัดโลหะมาก โดยจะทำปฏิกิริยากับเหล็กในระบบให้เกิดเป็นเหล็กซัลไฟด์ ซึ่งเหล็กซัลไฟด์จะเป็น cathodic กับเหล็ก เร่งการกัดกร่อนขึ้นไปตามสมการ



3.2 สาหร่าย (algae)

สาหร่ายหรือตะไคร่น้ำที่พบในทอระบายความร้อนมักจะเป็นประเภทที่มีสีเขียว บางครั้งอาจพบพวกสีน้ำตาลบ้าง ตะไคร่น้ำเหล่านี้จับเป็นแผ่นหรือเมือกคล้ายวุ้นอยู่บนโครงสร้างของหอ ถ้าปัญหานี้เกิดรุนแรงมันอาจขวางทางลม หรืออุดตันท่อส่งน้ำ หรืออุดรูตัวกระจายน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของทอระบายความร้อนลดน้อยลง อีกทั้งยังเป็นการเร่งสนิมให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การห้ามสาหร่ายมิให้เจริญเติบโตบนทอระบายความร้อน อาจกระทำได้ยาก เพราะสาหร่ายมีคลอโรฟิลล์ จึงสามารถปรุงอาหารได้ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศ และพลังงานจากแสงแดด

3.3 ฟันใจ (fungi)

ฟันใจไม่มีคลอโรฟิลล์เหมือนสาหร่าย ดังนั้นมันจึงต้องการอาหารจากภายนอก อาหารของฟันใจได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีชีวิตหรือตายแล้ว เมื่อฟันใจเติบโตอยู่ในทอระบายความร้อน มันใช้เซลล์โลสที่มีอยู่ในมันเป็นอาหาร ดังนั้นฟันใจจึงเป็นต้นเหตุที่ทำให้โครงสร้างไม้ของทอระบายความร้อนผุกร่อน

การควบคุมและป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้น

1. การป้องกันการเกิดตะกรัน

P208 COMPLEXES มีส่วนผสมของสาร organic polymer ซึ่งจะปิดเป็นโครงสร้างผลึกของตะกรันชนิดต่างๆ ให้เปลี่ยนแปลงจนไม่สามารถเกิดการตกผลึกเกิดเป็นตะกรันได้ ทำให้มันสามารถละลายอยู่ในน้ำได้ ถึงแม้ว่าจะอยู่ในสภาวะเกินกว่าระดับจุดอิ่มตัวพอดี (saturated) ของมันก็ตาม กระบวนการนี้เรียกว่า threshold effect ทำให้เราสามารถเพิ่มระดับความเข้มข้นของเกลือแร่ต่างๆ เพิ่มขึ้น ตามค่าที่แสดงข้างล่างนี้

ระดับสูงสุดของสารละลายที่ยอมให้ได้ในระบบน้ำหล่อเย็นหมุนเวียน

ความเป็นด่างทั้งหมด 600 ppm as CaCO_3

ความกระด้างทั้งหมด 1,200 ppm as CaCO_3

ซิลิกา 150 ppm as CaCO_3

นอกจากนี้ สาร organic polymer นี้ยังทำหน้าที่ปรับสภาพตะกอน และสารแขวนลอยในน้ำ ให้อยู่ในสภาพที่ไหลลื่นมากขึ้น ช่วยให้ตะกอนและสารแขวนลอยในน้ำกระจายตัว (disperse) ได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ไม่เกาะติดผนังโลหะและสามารถกำจัดทิ้งไปได้โดยการบลัดออฟ

2. การป้องกันการกัดกร่อน

สาร chromium complex ใน I 93 complex เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง ในการทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนแบบที่ใช้กับขั้วบวก (anodic inhibitor) ด้วยการทำให้เกิดโพลาไรเซชัน (polarisation) โดยการสร้างฟิล์มคอมเพล็กซ์ของ chromate ที่บริเวณขั้วบวก (anode) ก่อน แล้วจึงแผ่ขยายปกคลุมที่ผิวของโลหะทั้งหมด และฟิล์มที่สร้างขึ้นนี้ สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีเท่าๆ กับฟิล์มที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติบนผิวเหล็กที่ไม่เป็นสนิม (stainless steel)

3. การควบคุมและป้องกันจุลินทรีย์

ในการเนื้ของระบบน้ำหล่อเย็นที่มีจุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่แล้ว โดยเฉพาะสาหร่ายหรือตะไคร่น้ำ จำเป็นอย่างมากที่ต้องมีการทำความสะอาด โดยการขูดสาหร่ายหรือตะไคร้ให้ออกจากผิววัสดุให้หมด หรือให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ก่อน เพราะการใส่ยาฆ่าสาหร่ายหรือตะไคร่น้ำ อาจไม่ได้ผล ถ้ามันจับกันเป็นดินหนา เนื่องจากน้ำยาไม่อาจซึมลงไปฆ่าถึงชั้นล่างได้ ทำให้สาหร่ายหรือตะไคร่น้ำที่อยู่ภายในยังมีชีวิตอยู่พร้อมที่จะกลับคืนมาแพร่พันธุ์ได้

AC 12 COMPLEX สารเคมีแบบ NON-OXIDISING ซึ่งมีฤทธิ์ทำอันตรายต่อจุลินทรีย์ สาหร่าย และตะไคร่น้ำโดยเฉพาะ แต่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอื่นๆ และไม่ก่อความเสียหายให้กับวัสดุอุปกรณ์อื่นๆ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

สรุปค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. INSTALLATION AND OPERATING COST OF RECYCLE WASTE WATER FOR COOLING SYSTEM

1. INSTALLATION COST:		3,308,000	BAHT
1.1 ARKAL FILTER : CAPACITY 6-8 M3/HR		250,000	BAHT
1.2 MICROFILTRATION: CAPACITY 4-6 M3/HR		1,900,000	BAHT
1.3 REVERSE OSMOSIS: CAPACITY 4-6 M3/HR		1,158,000	BAHT
2. DEPRECIATION COST:		330,800	BAHT
USEFUL LIFE: 10 Yrs, Salvage value: nil			
3. SAVING COST:		1,825,393	BAHT
3.1 WATER CONSUMPTION REDUCTION: 65%		1,101,830	BAHT
	CITY	R/O	
CYCLES OF CONCENTRATION (N)	5	10	
TOTAL BLOW DOWN: (M3/HR)	8.28	4.12	
TOTAL VOLUME (M3/D)	222.24	98.88	
We will use R/O Water = 100 M3/D, remaining 20 M3/D to add in water cost saving = 222.24 + 20			
Therefore, volume of water savings = 242.24 X 330 X 12 B/Unit = 969,270 BAHT			
We will use R/O Concentrate for any purpose 36M3/D (Toilet, Plant) = 36 X 330 X 12 B/Unit = 142,560			
3.3 CHEMICAL COST SAVING: 33%		356,886	BAHT
	CITY	R/O	
CORROSION & SCALE INHIBITOR	KURITA T-6800	KURITA S-8200	
CONSUMPTION (PPM)	60	60	
KG/D	13.33	5.93	
B/D	2,388.07	1,304.60	
TOTAL COST B/D	3,266.77	2,174.30	
TOTAL COST SAVING: (3,266.77-2,174.30) X 330 = 356,886 BAHT			
Additional needed either for City or R/O water:			
SLIME CONTROL: NEOTABLET 200 @ 217, 5.6 KG/2DAY = 607.6 BHT/D			
POLYCRIN A-511 @ 179, 20.5 KG/2 WEEKS = 262.1 BHT/D			
3.4 pH CONTROL FOR BLOW DOWN (pH 5.5-9) = 2 B/M3X 222.24 X 330 M3		146,678	BAHT
3.5 ADDITIONAL ESTIMATED SAVINGS ON HEATEXCHANGERS		260,000	BAHT
See attached file (Quality of cooling water) for justification			
3.6 OPPORTUNITY COST TO PREVENT PRODUCTION SHUT DOWN			
Because we use less city water, the back up time will be longer			
4. OPERATING COST		408,748	BAHT
4.1 ELECTRICITY CONSUMPTION (8.0 KW X 330 X 24 X 1.8 B/UNIT)		114,048	BAHT
4.2 MEMBRANE REPLACEMENT COST		291,700	BAHT
* MICRON FILTER 30 & 5 MICRON (4 X250 X 7 pcs + 6 X 350 X 7 pcs)		= 21,700	
* CMF MODULE 6 X 85,000 X 1/3		= 170,000	
* R/O MEMBRANE 6X 25,000 X 1/3		= 50,000	
* CLEANING		= 50,000	
5. NET ANNUAL SAVING (3-2-4)		1,118,045	Baht/Yr
6. PAYBACK PERIOD:		3.0	Years
7. INTERNAL RATE OF RETURN		33.85%	

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุกัญญา กิจเจริญช่างรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม 2510 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2532 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2538



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย