

การประเมินแนวทางการบริหารจัดการน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นในโรงงานระยองโอเลฟินส์

นายชินวัฒน์ ไตรศุภโชค



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EVALUATION OF WATER MANAGEMENT FOR COOLING TOWER BLOWDOWN IN  
RAYONG OLEFINS PLANT

Mr. Chinnawat Traisupachok



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering  
Department of Environmental Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินแนวทางการบริหารจัดการน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นในโรงงานระยองโอเลฟินส์
โดย	นายชินวัฒน์ ไตรศุภโชค
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.จิรโชติ ภัทรนาวิก

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีเชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.จิรโชติ ภัทรนาวิก)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉริยา สุริยวงค์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.วศิมน เรืองเล็ก)

ชินวัฒน์ ไตรศุภโชค : การประเมินแนวทางการบริหารจัดการน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นใน  
โรงงานระยองโอเลฟินส์ (EVALUATION OF WATER MANAGEMENT FOR COOLING  
TOWER BLOWDOWN IN RAYONG OLEFINS PLANT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รศ. ดร.สุธา ขาวเจียร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.จิรัชิต ภัทรนาวิก, 175 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาแนวทางการบริหารจัดการน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นของโรงงานผลิต  
โอเลฟินส์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยเมมเบรน 2 กระบวนการคือ  
กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส โดยวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อ  
ประเมินแนวทางในการลดการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยจะทำการประเมินทั้งทางด้าน  
วิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาสภาวะการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานได้จริง จาก  
การทดลองในการประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมพบว่า ทั้งระบบรีเวิร์สออสโมซิสและฟอร์เวิร์ด  
ออสโมซิสมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้ง 2 กระบวนการ โดยที่รูปแบบที่  
สามารถนำไปใช้งานได้ของระบบรีเวิร์สออสโมซิสคือ รูปแบบการออกแบบการเดินระบบแบบ 1  
หน่วย 1 ขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 และการออกแบบการเดินระบบแบบ 1 หน่วย  
หลายขั้นตอน ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 และ 70 สามารถนำไปใช้งานได้จริง ส่วนระบบ  
ฟอร์เวิร์ดออสโมซิสที่ใช้เมมเบรนชนิด TW30-1812-50 เป็นเมมเบรนในการทดลอง ใช้  
โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 700 มก./ล.เป็นฟีดโซลูชันและใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความ  
เข้มข้น 0.5 โมลาร์ (39,500 มก./ล.) เป็นดรอว์โซลูชัน ให้ฟลักซ์สูงที่สุดที่ 0.32 ล./ตร.ม./ชม. โดย  
ประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นกับจำนวนผลต่างของความเข้มข้นและพื้นที่เมมเบรน นอกจากนี้ในส่วน  
ของกระบวนการแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายและนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการทาง  
ความร้อนพบว่าทำให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายได้  
ต้องกระทำร่วมกับการเป่าอากาศ และให้ประสิทธิภาพการคัดแยกเฉลี่ยที่ร้อยละ 57.7 ที่เวลา 5 ชม.  
และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อยแม้จะผ่านไป 10 ชม. และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้  
ถึงร้อยละ 84.9 โดยทุกความเข้มข้นให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ในส่วนของการประเมินความเป็นไปได้  
ในทางเศรษฐศาสตร์พบว่าระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่รูปแบบการออกแบบการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1  
ขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ให้ต้นทุนในการบำบัดน้ำ 1 หน่วยต่ำที่สุดคือ 22.83  
บาท/ลบ.ม. ส่วนกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์เพราะ  
เนื่องจากเพียงเฉพาะส่วนของเมมเบรนเท่านั้นก็มีต้นทุนที่สูงกว่าระบบรีเวิร์สออสโมซิสทั้งระบบถึงกว่า

10 เท่าตัว		
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....



# # 5470172521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: COOLING TOWER BLOWDOWN / WATER REUSE / WASTEWATER / OLEFINS

CHINNAWAT TRAISUPACHOK: EVALUATION OF WATER MANAGEMENT FOR COOLING TOWER BLOWDOWN IN RAYONG OLEFINS PLANT. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., CO-ADVISOR: JIRACHOTE PHATTARANAWIK, Ph.D., 175 pp.

The research is to study the recycling of wasted water blowdown from olefins plant's cooling tower management method. Therefore, two apparatuses of wasted water treatment such as Reverse osmosis system and Forward osmosis system are considered. The objective of the research is to decrease amount of wasted water released into environment. For the optimum design of operating system, both Engineering and Economical aspects are estimated. Firstly, the engineer possibility evaluation revealed that, Reverse osmosis and Forward osmosis systems are capable of recycling wasted water. The suitable design of Reverse osmosis system is 1 unit 1 stage at treatment 50% efficiency, 1 unit multistage at treatment 50 %, 60% and 70 % efficiency. For the Forward osmosis system apparatus used ammonium bicarbonate as a draw solution. The drawn solution concentration 0.5 molar (39,500 mg./l.) generates the highest flux 0.32 l/m<sup>2</sup>/h. In the draw solution removal and recovery by heating process experiment shows the result that heating only cannot separates ammonium bicarbonate and phase to gas but also need to blow the air bubbling at the same time. The removal efficiency can be increased to 57.7 % at 5 hours. However, the recovery efficiency is 84.9% of removal. The economical evaluation shows that the Reverse osmosis system design, 1 unit 1 stage at treatment 50 % efficiency, is the lowest cost of wasted water treatment method (22.83 Bath/m<sup>3</sup>). In contrast, the Forward osmosis system's capital cost value in the membrane path is 10 times higher than whole system of Reverse osmosis system.

Department: Environmental  
Engineering

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Field of Study: Environmental  
Engineering

Co-Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ทางผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณผู้มีความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. สุชา ขาวเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.จิรัชติ ภัทรนาวิก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมผู้สละเวลาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการปฏิบัติ ตลอดจนหลักในการดำเนินงานวิจัยและแก้ไขสิ่งบกพร่องทุกขั้นตอนในการทำวิจัย รวมทั้งตรวจทานและแก้ไขความถูกต้องจนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัฉริยา สุริยะวงศ์ และดร.วศิมน เรื่องเล็กที่ให้ความกรุณาเป็นคณะกรรมการสอบและให้คำชี้แนะและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล ผู้สละเวลาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ให้สามารถผ่านอุปสรรคต่างๆ ไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำการวิจัย

คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัย คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณ นส.กฤติกา วัฒนวิสุทธิ์ นส.ลักษิกา กองวิเชียร นายเอกลักษณ์ เข้มเพชร

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้องและญาติๆทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและให้การสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ต
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์อัตราการใช้น้ำ อัตราการเกิดน้ำเสียและน้ำสูญเสียและ ลักษณะของน้ำที่ใสและน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิต โอเลฟินส์.....	2
1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการบำบัดน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ .....	2
1.2.3 เพื่อศึกษาและนำเสนอแนวทางการจัดการและศักยภาพของเทคโนโลยีและประเมิน ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์เพื่อการบำบัดน้ำเสียจากหอหล่อเย็นและนำน้ำ เสียกลับมาใช้ใหม่.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์อัตราการใช้น้ำและคุณภาพของตัวอย่างน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็น ภายในโรงงานระยองโอเลฟินส์.....	2
1.3.2 ทำการทดลองศึกษาหลักการและความเป็นไปได้ของระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสโดย ใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเป็นครอสโซลูชัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับ การออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับ ห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	2

1.3.3	ศึกษาการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA การบำบัดน้ำโคลดาวน์จากหอหล่อเย็น.....	2
1.3.4	ศึกษาการแยกแอมโมเนียออกจากน้ำและนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส .....	3
1.3.5	เปรียบเทียบฟลักซ์ที่ได้ พลังงานที่ใช้ ประสิทธิภาพการบำบัดและประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์และปริมาณน้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ของทั้ง 2 กระบวนการ ...	3
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4.1	เป็นเครื่องมือประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้เทคโนโลยีเพื่อการบำบัดน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานระยองโอเลฟินส์.....	3
1.4.2	ทราบถึงแนวทางเลือกในการจัดการน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่.....	3
1.4.3	ทราบถึงศักยภาพ และต้นทุนของเทคโนโลยีและแนวทางการจัดการที่นำมาใช้ลดและควบคุมอัตราการเกิดน้ำเสียและนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่.....	3
บทที่ 2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1	การใช้น้ำในภาคอุตสาหกรรม (Industrial water usage) .....	4
2.2	โรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์.....	4
2.2.1	ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางสายอัลเคน (Alkane Intermediates).....	4
2.2.2	ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางสายโอเลฟินส์ (Olefin Intermediates) .....	5
2.2.3	ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางสายอะโรมาติกส์ (Aromatic Intermediates) .....	5
2.3	กระบวนการผลิตโอเลฟินส์ .....	5
2.3.1	กระบวนการผลิตเอทิลีน .....	5
2.3.1.1	การทำให้โมเลกุลแตกตัว (Cracking unit) .....	6
2.3.1.2	การอัดเพื่อเพิ่มความดัน .....	6
2.3.1.3	การแยกเพื่อทำให้บริสุทธิ์ (Separation unit).....	7
2.3.2	กระบวนการผลิตโพรพิลีน .....	7

2.3.3	แผนผังทิศทางการใช้น้ำในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ .....	7
2.4	การบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่.....	10
2.5	ระบบกรองรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO).....	13
2.5.1	กลไกการทำงานของระบบรีเวิร์สออสโมซิส.....	17
2.5.2	เมมเบรนสำหรับกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส .....	17
2.5.2.1	แบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต.....	17
2.5.2.2	แบ่งตามการใช้งาน.....	19
2.5.3	ส่วนประกอบสำคัญต่างๆ ของระบบรีเวิร์สออสโมซิส.....	19
2.5.3.1	หน่วยบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment).....	19
2.5.3.2	เครื่องสูบน้ำที่มีแรงดันสูง .....	20
2.5.3.3	โมดูลชนิดต่างๆ ของระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	20
2.5.4	ระบบควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ต้องระบายทิ้ง .....	25
2.5.5	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	25
2.5.5.1	แรงดัน.....	25
2.5.5.2	อุณหภูมิและพีเอช .....	26
2.5.5.3	การสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของสารละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ (Concentration polarization, CP).....	26
2.5.5.4	ความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	28
2.5.6	การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	30
2.5.7	การออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	32
2.5.7.1	อัตราเร็วของน้ำที่ซึมผ่าน (Water flux) .....	32
2.5.7.2	การรั่วไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (Salt flux).....	33
2.5.7.3	ประสิทธิภาพการสกัดกั้น (Rejection factor) หรือร้อยละการสกัดกั้น.....	33

2.5.7.4 ประสิทธิภาพการกรอง (Recovery factor) หรือ ร้อยละการบำบัด.....	34
2.5.7.5 ความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	34
2.5.7.6 แรงดันลด (Pressure drop).....	34
2.5.7.7 ปัจจัยการเกิดการสะสมตัวของสารละลายที่ไม่ผ่านการกรอง (Concentration polarization factor) .....	35
2.5.8 การจัดเรียงเมมเบรนในระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	36
2.6 ฟอว์เวิร์ดออสโมซิส (Forward osmosis, FO).....	36
2.6.1 การฟื้นฟูความเข้มข้นของดรอว์โซลูชัน .....	41
2.6.2 การใช้งานฟอว์เวิร์ดออสโมซิส .....	41
2.7 การบำบัดน้ำเพื่อการผลิตอื่นๆ .....	41
2.7.1 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis , ED).....	41
2.7.2 การออกแบบอิเล็กโทรไดอะไลซิส .....	43
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
2.8.1 ประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส.....	44
2.8.2 แรงดันที่ใช้ในการบำบัดน้ำโบลวดารน์จากหอล่อเย็นในระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	44
2.8.3 การบำบัดน้ำโบลวดารน์จากหอล่อเย็นด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส .....	45
2.8.4 การออกแบบระบบบำบัดด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส .....	46
2.8.5 กระบวนการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการฟอว์เวิร์ดออสโมซิสโดยใช้แอมโมเนียม ไบ คาร์บอเนตเป็นดรอว์โซลูชัน .....	48
2.8.6 ปริมาณฟลักซ์ที่ได้จากการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการฟอว์เวิร์ดออสโมซิส .....	48
2.8.7 ต้นทุนการใช้พลังงานและพื้นที่เมมเบรนในการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการฟอว์เวิร์ด ออสโมซิสเปรียบเทียบกับกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส.....	48
2.8.8 การออกแบบระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิส.....	49
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง.....	51

3.1	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี .....	51
3.1.1	อุปกรณ์สำหรับการทดลอง .....	51
3.1.2	อุปกรณ์สำหรับวัด.....	51
3.1.3	สารเคมี.....	51
3.2	ขั้นตอนการศึกษา.....	52
3.2.1	การวัดองค์ประกอบของน้ำเสียโบลด์วานจากหอหล่อเย็น .....	53
3.2.2	การออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA.....	54
3.2.3	ศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส.....	55
3.2.4	การศึกษาความเป็นไปได้ของการแยกคอรอโซลูชันออกจากสารละลายและนำกลับมาใช้ใหม่.....	57
3.2.5	การประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ .....	59
บทที่ 4	ผลการทดลอง.....	61
4.1	การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง .....	61
4.1.1	ศึกษาอัตราการใช้น้ำ ทิศทางการไหลของน้ำ ในระบบของหอหล่อเย็น .....	61
4.1.2	การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ .....	61
4.2	การออกแบบระบบบำบัดกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส.....	63
4.2.1	หน่วยบำบัดเบื้องต้น .....	63
4.2.2	การออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	65
4.2.3	ความต้องการพื้นฐานของโปรแกรม .....	65
4.2.4	ขั้นตอนการออกแบบ .....	68
4.2.5	ผลการออกแบบ .....	70
4.3	การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสต่อการบำบัดน้ำเสียจากหอหล่อเย็น.....	84
4.3.1	การทดสอบเบื้องต้น.....	84

4.3.2 ผลการทดลอง.....	84
4.4 การศึกษาการแยกดรอว์โซลูชันออกจากน้ำและนำกลับมาใช้ใหม่ .....	89
4.4.1 การแยกดรอว์โซลูชันออกจากน้ำ .....	89
4.4.1.1 การให้ความร้อนและการเป่าอากาศ .....	89
4.4.1.2 เวลา.....	93
4.4.1.3 ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต.....	93
4.4.2 การนำดรอว์โซลูชันกลับมาใช้ใหม่.....	93
4.5 การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์.....	95
4.5.1 ต้นทุนการติดตั้ง.....	96
4.5.1.1 หน่วยบำบัดเบื้องต้น.....	96
4.5.1.2 ระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	97
4.5.1.3 ระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส .....	98
4.5.2 ต้นทุนการเดินระบบ .....	99
4.5.3 ต้นทุนการบำรุงรักษา .....	103
4.5.4 การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ .....	104
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	106
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	106
5.1.1 การศึกษาอัตราและทิศทางการใช้น้ำและองค์ประกอบของน้ำเสียโพลีเมอร์จาก หอหล่อเย็น .....	106
5.1.2 หน่วยบำบัดเบื้องต้น .....	106
5.1.3 ผลการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	106
5.1.4 การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส .....	107
5.1.5 การศึกษาการแยกดรอว์โซลูชันออกจากน้ำ.....	107



5.1.6 การศึกษาการนำตรอวโซลูชันกลับมาใช้ใหม่ .....	107
5.1.7 การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ .....	108
5.1.7.1 ต้นทุนติดตั้ง .....	108
5.1.7.2 ต้นทุนเดินระบบ .....	108
5.1.7.3 ต้นทุนบำรุงรักษา .....	108
5.1.7.4 ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด .....	109
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	110
รายการอ้างอิง .....	111
ภาคผนวก ก .....	117
ภาคผนวก ข .....	123
ภาคผนวก ค .....	128
ภาคผนวก ง .....	130
ภาคผนวก จ .....	163
ภาคผนวก ฉ .....	168
ภาคผนวก ช .....	173
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	175

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระดับสูงสุดของสารละลายที่ยอมให้มีได้ในน้ำหมุนเวียนของหอหล่อเย็น .....	8
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำเลี้ยงในหม้อต้มน้ำ .....	9
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานขั้นต่ำของน้ำทดแทนในหม้อต้มน้ำ.....	9
ตารางที่ 2.4 แรงดันออสโมซิสของสารประกอบบางชนิดที่ 25 °ซ .....	14
ตารางที่ 2.5 ดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำเข้าระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	15
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติต่างๆ ของโมดูลทั้ง 4 ชนิด.....	25
ตารางที่ 2.7 ความสามารถของระบบรีเวิร์สออสโมซิสในการกำจัดเกลือต่างๆ .....	29
ตารางที่ 2.8 ความสามารถของระบบรีเวิร์สออสโมซิสในการกำจัดสารอินทรีย์.....	30
ตารางที่ 2.9 คุณภาพน้ำโบลวทาวน์.....	45
ตารางที่ 2.10 ผลการเปรียบเทียบค่าดัชนีความต้องการใช้พลังงานรวมในการบำบัดน้ำ 1 หน่วย กับพื้นที่เมมเบรนที่ต้องการระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำทะเลด้วยระบบฟอร์เวิร์ด ออสโมซิสทำงานร่วมกับระบบรีเวิร์สออสโมซิสและระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 2 หน่วย .....	49
ตารางที่ 2.11 สมการต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส.....	50
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน .....	54
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่างๆของน้ำเสียจากหอหล่อเย็นและน้ำป้อนเข้าสู่หอหล่อเย็น .....	62
ตารางที่ 4.2 ลำดับขั้นตอนการออกแบบ .....	68
ตารางที่ 4.3 การกำหนดรูปแบบการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส .....	71
ตารางที่ 4.4 ผลการออกแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง .....	83
ตารางที่ 4.5 จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุเมมเบรนของการทดลองที่ใช้ตรอวโซลูชันเป็น แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 31,600 มก./ล. ....	87
ตารางที่ 4.6 จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุเมมเบรนของการทดลองที่ใช้ตรอวโซลูชันเป็น แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 39,500 มก./ล. ....	88

ตารางที่ 4.7	ต้นทุนติดตั้งหน่วยบำบัดเบื้องต้น .....	96
ตารางที่ 4.8	ต้นทุนติดตั้งระบบปริเวีร์สออสโมซิส .....	97
ตารางที่ 4.9	ต้นทุนติดตั้งของระบบฟอร์เวีร์ดออสโมซิสในส่วนของเมมเบรนและท่อบรรจุที่มีการ ใช้ตรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 31,600 มก./ล.....	99
ตารางที่ 4.10	ต้นทุนติดตั้งของระบบฟอร์เวีร์ดออสโมซิสในส่วนของเมมเบรนและท่อบรรจุที่มี การใช้ตรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 39,500 มก./ล. ....	99
ตารางที่ 4.11	ต้นทุนพลังงานเดินระบบ .....	100
ตารางที่ 4.12	ต้นทุนเดินระบบในส่วนของพลังงานต่อวัน.....	101
ตารางที่ 4.13	ต้นทุนเดินระบบในส่วนของสารเคมีและคาทริจฟิลเตอร์ .....	102
ตารางที่ 4.14	ต้นทุนบำรุงรักษาของระบบปริเวีร์สออสโมซิส .....	104
ตารางที่ 4.15	ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด.....	105

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1	ผังแสดงกระบวนการผลิตเอทีลินและโพรพิลีน .....	6
ภาพที่ 2.2	สมดุลของน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ในหน่วย ลบ.ม./ชม.....	8
ภาพที่ 2.3	ภาพตัดขวางของเมมเบรนเซลลูโลสอะซิเตดที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM) กำลังขยาย 400 เท่า.....	18
ภาพที่ 2.4	ภาพตัดขวางของเมมเบรนโพลีเอไมด์ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน .....	18
ภาพที่ 2.5	ส่วนประกอบต่างๆของโมดูลแบบแผ่น .....	21
ภาพที่ 2.6	ส่วนประกอบต่างๆ ของโมดูลแบบท่อ .....	22
ภาพที่ 2.7	ส่วนประกอบต่างๆ ของโมดูลแบบม้วน .....	23
ภาพที่ 2.8	ขนาดของเส้นใยกลาง .....	24
ภาพที่ 2.9	ส่วนประกอบต่างๆ ของโมดูลแบบเส้นใยกลาง.....	24
ภาพที่ 2.10	อิทธิพลของอุณหภูมิและพีเอชที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมมเบรน .....	26
ภาพที่ 2.11	การเกิดการสะสมของสารละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ในระบบรีเวิร์สออสโม ซิส .....	27
ภาพที่ 2.12	แผนภูมิแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการกำจัดสารละลายที่ส่งผลต่อคุณภาพ ของน้ำที่ผ่านการบำบัด .....	28
ภาพที่ 2.13	แผนภูมิแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิสและ ประสิทธิภาพการบำบัดที่มีผลต่อคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด .....	28
ภาพที่ 2.14	การเดินระบบแบบต่อเนื่อง .....	31
ภาพที่ 2.15	การเดินระบบแบบกะ .....	32
ภาพที่ 2.16	ระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสที่มีโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นดรอว์โซลูชัน .....	37
ภาพที่ 2.17	แรงดันออสโมติกที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารละลายที่ 25 °ซ .....	40
ภาพที่ 2.18	แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการกรองน้ำและการรั่วไหลของสารละลายของดรอว์โซลู ชันแต่ละชนิด .....	40

ภาพที่ 2.19 ส่วนประกอบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์ 1 เซลล์.....	43
ภาพที่ 2.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของเมมเบรนแต่ละท่อนจากการคำนวณ.....	47
ภาพที่ 2.21 เปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านการบำบัดของเมมเบรนแต่ละท่อนจากการ คำนวณด้วยสมการกับใช้โปรแกรม ROSA A) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 35,000 มก./ล. B) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 38,000 มก./ล. ....	47
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม ROSA.....	55
ภาพที่ 3.2 เมมเบรนรุ่น TW30-1812-50.....	56
ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ในการทดลองการศึกษากระบวนการฟอว์เวิร์ดออสโมซิส.....	57
ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ในการทดลองการแยกคอลลอยด์ออกจากสารละลายและนำกลับมาใช้ใหม่ ของกระบวนการฟอว์เวิร์ดออสโมซิส .....	58
ภาพที่ 3.5 การวัดปริมาณแอมโมเนียม .....	59
ภาพที่ 3.6 สรุปขั้นตอนการทดลองของงานวิจัย .....	60
ภาพที่ 4.1 แผนผังแสดงทิศทางการไหลของหอยห่อเย็น.....	61
ภาพที่ 4.2 แผนผังแสดงทิศทางการไหลของส่วนต่างๆ ของระบบรีเวิร์สออสโมซิส ภายใน เส้นประคือหน่วยบำบัดเบื้องต้น.....	63
ภาพที่ 4.3 แผนผังแสดงทิศทางการไหลของถังกรองทราย.....	64
ภาพที่ 4.4 แผนผังแสดงทิศทางการไหลของถังกรองทราย.....	65
ภาพที่ 4.5 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 1 หน่วยบำบัด 1 ขั้นตอน .....	66
ภาพที่ 4.6 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 1 หน่วยบำบัดหลายขั้นตอน .....	66
ภาพที่ 4.7 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบหลายหน่วย หน่วยละ 1 ขั้นตอน .....	67
ภาพที่ 4.8 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบหลายหน่วยหน่วยละหลายขั้นตอน .....	67
ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบระหว่างฟลักซ์กับขนาดท่อบรรจุที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน.....	72



ภาพที่ 4.23	เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 50 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน .....	81
ภาพที่ 4.24	เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 60 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน .....	81
ภาพที่ 4.25	เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 70 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน .....	82
ภาพที่ 4.26	เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 80 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน .....	82
ภาพที่ 4.27	แผนผังระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิส .....	85
ภาพที่ 4.28	เปรียบเทียบการเดินระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสโดยใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต .....	86
ภาพที่ 4.29	ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกครอวโซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 3,950 มก./ล .....	90
ภาพที่ 4.30	ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกครอวโซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7,900 มก./ล .....	90
ภาพที่ 4.31	ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกครอวโซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15,900 มก./ล .....	91
ภาพที่ 4.32	ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกครอวโซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 23,700 มก./ล .....	91
ภาพที่ 4.33	ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกครอวโซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นเริ่ม 31,600 มก./ล .....	92
ภาพที่ 4.34	ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกครอวโซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นเริ่ม 39,500 มก./ล .....	92

ภาพที่ 4.35 ร้อยละประสิทธิภาพการนำดรอโซลูชันที่คัดแยกแล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เฉลี่ย  
ของความเข้มข้นต่างๆ..... 94

ภาพที่ 4.36 แผนผังแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของหน่วยฟื้นฟูความเข้มข้น..... 95





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานอุตสาหกรรม มีการใช้น้ำในหลายภาคส่วน ทั้งในกระบวนการผลิต ในหม้อต้มไอน้ำ หอหล่อเย็น หรือเพื่อการอุปโภค บริโภค อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ทำให้เกิดน้ำเสีย และน้ำสูญเสียในปริมาณมากและส่งผลกระทบต่อด้านสิ่งแวดล้อม การขาดแคลนน้ำ ต้นทุนของการทำน้ำสะอาด และการปรับปรุง ฟื้นฟู คุณภาพน้ำที่เพิ่มขึ้นเป็นต้นทุนที่ทางโรงงานอุตสาหกรรมต้องแบกรับ จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ทางโรงงานอุตสาหกรรมต้องหาวิธีการต่างๆ เพื่อลดอัตราการใช้น้ำในกระบวนการผลิต การลดต้นทุนในส่วนนี้สามารถทำได้ทั้งการจำกัดปริมาณการใช้น้ำสะอาดในกระบวนการต่างๆ ลง อันจะทำให้เกิดน้ำเสียน้อยลง ซึ่งเป็นการลดที่แหล่งกำเนิดและการนำน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ กลับมาใช้ใหม่ซึ่งเป็นการลดที่ปลายทางและการที่จะสามารถบริหารจัดการกับน้ำเหล่านี้ ทางโรงงานอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในกระบวนการต่างๆ ของตัวเอง เส้นทางของน้ำ รวมถึงความปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านกระบวนการแล้ว ซึ่งจะช่วยให้จัดหาเทคโนโลยีหรือแนวทางบริหารจัดการที่เหมาะสมได้

ในการผลิตของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ต่างๆ น้ำจะถูกใช้ในกระบวนการผลิตตามหน่วยต่างๆ ซึ่งคุณภาพของน้ำที่มีการใช้งานก็แตกต่างกัน คุณภาพน้ำที่มีการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ 1.น้ำที่มีคุณภาพเดียวกันหรือใกล้เคียงกับน้ำประปา 2.น้ำที่มีคุณภาพเดียวกันหรือใกล้เคียงกับน้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำที่ปราศจากไอออน (Demineralization) 3.น้ำจากกระบวนการผลิตอื่นๆ ภายหลังเมื่อน้ำเข้าสู่กระบวนการผลิตแล้วจะเกิดการสัมผัสกับความปนเปื้อนทำให้คุณภาพของน้ำต่ำลงจนมีคุณภาพไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน ต้องระบายออกจากกระบวนการผลิตหรือมีการสูญเสียไประหว่างการเดินระบบ และรับน้ำที่มีคุณภาพตามที่ต้องการเติมกลับเข้ามาในระบบเพื่อเป็นการทดแทนน้ำที่สูญเสียไป ดังนั้นหากมีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ภายในหน่วยการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ คุณภาพของน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดต้องเทียบเท่าคุณภาพน้ำทั้ง 3 ประเภท

เพื่อเป็นการลดการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม และลดการใช้ทรัพยากรน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม งานวิจัยฉบับนี้จึงถูกจัดทำขึ้น เพื่อศึกษากระบวนการบำบัดน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสม โดยสามารถนำมาปรับใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปิโตรเคมีได้ กระบวนการบำบัดน้ำ

และนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สามารถกระทำได้หลายวิธีการเช่น การใช้น้ำแบบชั้นบันได การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การใช้เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane) เป็นต้น แต่ทั้งหมดมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการกำจัดความปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำ ซึ่งน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดก่อนนำน้ำมาใช้ใหม่นี้จะมีคุณภาพดีขึ้น แต่ไม่เทียบเท่ากับน้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค โดยแต่ละวิธีการก็มีประสิทธิภาพและต้นทุนที่แตกต่างกัน การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีการใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในด้านต่างๆ ดังนี้คือ คุณภาพน้ำที่แต่ละหน่วยการผลิตที่จะนำน้ำกลับไปใช้ต้องการ คุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้ว ประสิทธิภาพการบำบัด ต้นทุน ค่าใช้จ่ายต่างๆ ของแต่ละเทคโนโลยี

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หัตถการใช้น้ำ อัตราการเกิดน้ำเสียและน้ำสูญเสียและลักษณะของน้ำที่ใช้และน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์

1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการบำบัดน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

1.2.3 เพื่อศึกษาและนำเสนอแนวทางการจัดการและศักยภาพของเทคโนโลยีและประเมินความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์เพื่อการบำบัดน้ำเสียจากหอหล่อเย็นและนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์หัตถการใช้น้ำและคุณภาพของตัวอย่างน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นภายในโรงงานระยองโอเลฟินส์

1.3.2 ทำการทดลองศึกษาหลักการและความเป็นไปได้ของระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสโดยใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเป็นดรอว์โซลูชัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง

1.3.3 ศึกษาการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA การบำบัดน้ำไบลวดาว์นจากหอหล่อเย็น

1.3.4 ศึกษาการแยกแอมโมเนียออกจากน้ำและนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส

1.3.5 เปรียบเทียบพลั๊กซ์ที่ได้ พลังงานที่ใช้ ประสิทธิภาพการบำบัดและประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์และปริมาณน้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ของทั้ง 2 กระบวนการ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นเครื่องมือประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้เทคโนโลยีเพื่อการบำบัดน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานระยองโอเลฟินส์

1.4.2 ทราบถึงแนวทางเลือกในการจัดการน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

1.4.3 ทราบถึงศักยภาพ และต้นทุนของเทคโนโลยีและแนวทางการจัดการที่นำมาใช้ลดและควบคุมอัตราการเกิดน้ำเสียและนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การใช้น้ำในภาคอุตสาหกรรม (Industrial water usage)

น้ำเป็นทรัพยากรที่สามารถใช้ได้ไม่มีวันหมด (Renewable) ในอดีตมนุษย์นำน้ำมาใช้ในการอุปโภค บริโภค ทำเกษตรกรรม คมนาคม แต่การเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมทำให้ทรัพยากรน้ำเป็นที่ต้องการมากขึ้น เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมต้องใช้น้ำเป็นปริมาณมหาศาลในแต่ละวันเพื่อผลิตสินค้าและบริการ บางประเทศปัญหาการขาดแคลนน้ำเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อสังคม และเศรษฐกิจของประเทศอย่างกว้างขวาง น้ำสะอาดจึงเป็นที่ต้องการมากขึ้นเพราะแหล่งน้ำที่มีคุณภาพดีมีจำนวนลดลงไปเรื่อยๆ (Fane, 2007) จากการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ การปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ การรั่วไหลของสิ่งปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้คุณภาพของแหล่งน้ำลดลงและยังมีผลกระทบต่อทรัพยากรสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำอีกด้วย ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งด้วยตัวชี้วัดต่างๆ เพื่อรักษาคุณภาพของน้ำผิวดิน

#### 2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์

อุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์เป็นอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลาง โดยใช้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นในการผลิต เพื่อป้อนให้กับอุตสาหกรรมขั้นปลาย อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลางนี้แบ่งผลิตภัณฑ์ได้ตามสายของปิโตรเคมีขั้นต้น ดังนี้

##### 2.2.1 ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางสายอัลเคน (Alkane Intermediates)

ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางสายอัลเคน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางที่ผลิตจากมีเทน เช่น ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) แอมโมเนีย (Ammonia) ฟอสจีน (Phosgene) เมทานอล (Methanol) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์บางชนิดข้างต้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เลยโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการใดอีก เช่น เมทานอล อาจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือเป็นสารช่วยละลายน้ำแข็งในกระบวนการผลิตเพื่อป้องกันการอุดตันของน้ำแข็งในท่อที่เย็นจัด เนื่องจากมีคุณสมบัติละลายน้ำได้สูง หรือแอมโมเนีย อาจนำไปใช้เป็นสารทำความเย็น (Refrigerant) ในเครื่องทำความเย็น เป็นต้น

### 2.2.2 ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีชั้นกลางสายโอเลฟินส์ (Olefin Intermediates)

ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีชั้นกลางสายโอเลฟินส์ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีชั้นกลางจากเอทิลีน (Ethylene) เช่น เอทิลีนไดคลอไรด์ (Ethylene Dichloride, EDC) ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer, VCM) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, EG) เอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide, EO) เป็นต้น และผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีชั้นกลางจากโพรพิลีน (Propylene) ได้แก่ ออกโซแอลกอฮอล์ (Oxo Alcohol) อะคริโลไนทริล (Acrylonitrile) เป็นต้น (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2553)

### 2.2.3 ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีชั้นกลางสายอะโรมาติกส์ (Aromatic Intermediates)

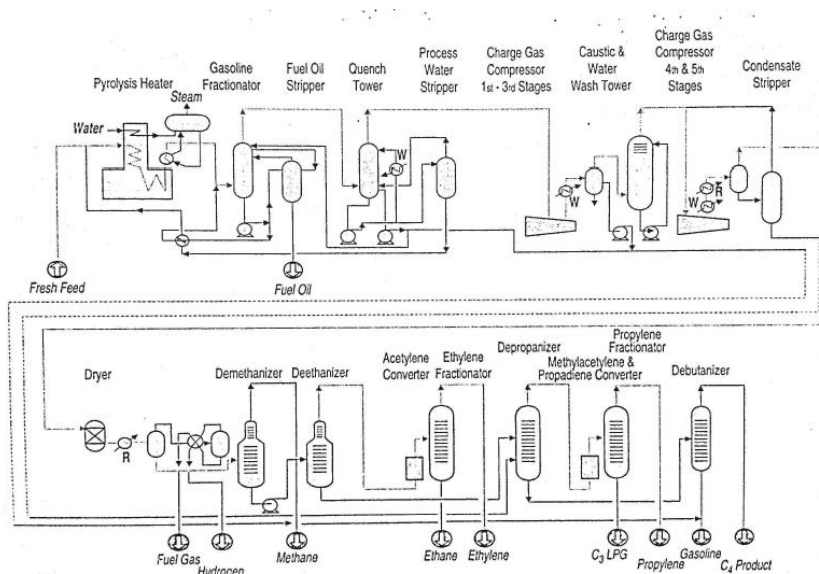
เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีที่ใช้วัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์อะโรมาติกส์ขั้นต้น ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากเบนซีน เช่น เอทิลเบนซีน (Ethyl Benzene, EB) สไตรีนโมโนเมอร์ (Styrene Monomer, SM) ไสโคลเฮกเซน (Cyclohexane) เป็นต้น (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2553)

## 2.3 กระบวนการผลิตโอเลฟินส์

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้วว่าโอเลฟินส์เป็นกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีสายกลางประเภทหนึ่ง ผลิตภัณฑ์หลักของสายนี้คือ เอทิลีนและโพรพิลีน แต่นอกจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดแล้วยังมีระบบสาธารณูปโภคอื่นๆ อีกที่ทำหน้าที่สนับสนุนหน่วยการผลิต เช่น น้ำ ไอน้ำ ไฟฟ้า ระบบหล่อเย็น เป็นต้น (Robert, (2005), Ren และคณะ, (2006) และ อลงกต ตั้งจิตนามกร, (2553))

### 2.3.1 กระบวนการผลิตเอทิลีน

ในกระบวนการผลิตเอทิลีนมีกระบวนการทางปิโตรเคมีที่ซับซ้อนมากมาย (ภาพที่ 2.1) บางหน่วยการผลิตก็มีอุณหภูมิสูงถึงเกือบ 900 องศาเซลเซียส ในขณะที่บางกระบวนการอุณหภูมิก็ต่ำถึง -140 องศาเซลเซียส เอทิลีนสามารถผลิตได้จากสารตั้งต้นได้หลายชนิด อาทิ แนฟธา ก๊าซธรรมชาติ อีเทน เป็นต้น โดยสารตั้งต้นเหล่านี้ถ้าอยู่ในสถานะก๊าซที่ผ่านการแคร็กกิ้ง (Cracking) แล้วควรจะต้องมีองค์ประกอบของอีเทน (Ethane) โพรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) อย่างไม่อย่างหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งอย่างก็ได้เท่านั้น แต่ถ้าอยู่ในสถานะของเหลวสามารถใช้ได้ทั้งแอลพีจี (LPG) จนถึงแวกคัมแก๊สออยล์ (Vacuum gas oil) ทั้งนี้สารตั้งต้นต่างชนิดกันก็จะให้ปริมาณเอทิลีนที่ได้ไม่เท่ากัน ใช้หลักการทำให้โมเลกุลแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) หรือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการคือ



ภาพที่ 2.1 ผังแสดงกระบวนการผลิตเอทิลีนและโพรพิลีน (Robert, 2005)

### 2.3.1.1 การทำให้โมเลกุลแตกตัว (Cracking unit)

พลังงานจะสูญเสียไปกับหน่วยการผลิตนี้อย่างมาก โดยใช้กระบวนการแตกตัวโมเลกุลด้วยความร้อนและไอน้ำ หรือสตีมแครกกิง (Steam Cracking) จะต้องใช้ความร้อนสูงถึง 750 – 900 °ซ ทั้งนี้ขึ้นกับสารตั้งต้น ถึงปฏิกิริยาที่ถูกรอกแบบไว้ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น โพรพิลีน บิวตะไดอิน เบนซีน หรือไฮโดรเจน เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการแครกกิงแล้ว จะต้องถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว (เหลือประมาณ 40 องศาเซลเซียส) ด้วยน้ำหรือน้ำมันจาก เควนซ์ทาวเวอร์ (Quench tower) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทำปฏิกิริยาต่อไปอีก ก๊าซเสียที่ได้จากขั้นตอนนี้ยังสามารถนำไปใช้อุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำได้ด้วย

### 2.3.1.2 การอัดเพื่อเพิ่มความดัน

หลังจากก๊าซผ่านกระบวนการแครกกิงและถูกลดอุณหภูมิแล้ว จะอัดตัวไปด้วยน้ำ และมีสภาพเป็นกรดอยู่ ก็จะถูกอัดด้วยแรงดัน 32-37 บาร์ จำนวน 4-5 ขั้นตอน น้ำและผลิตภัณฑ์ก็จะแยกส่วนกัน น้ำจะกลับไปให้เควนซ์ทาวเวอร์ จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่บีบอัด 3 ขั้นตอนแรกจะส่งไปยังไพโรไลซิสแก๊สโซลีนสตริปเปอร์ (Pyrolysis gasoline stripper) ในช่วงนี้ผลิตภัณฑ์จะถูกส่งไปยังหน่วยกำจัดก๊าซกรดเพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และไฮโดรเจนไดซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ด้วย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งน้ำเสียจากกระบวนการนี้ต้องได้รับการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

### 2.3.1.3 การแยกเพื่อให้บริสุทธิ์ (Separation unit)

หลังจากผลิตภัณฑ์ออกจากหน่วยการอัดแล้วจะเข้าสู่กระบวนการควบแน่นโดยใช้ความเย็นจัดก่อนจะเข้าสู่กระบวนการกำจัดมีเทน (Demethanizer) และอีเทน (Deethanizer) กำจัดไฮโดรเจน แล้วถึงจะเป็นกระบวนการกลั่นเพื่อให้ได้เอทิลีนบริสุทธิ์

### 2.3.2 กระบวนการผลิตโพรพิลีน

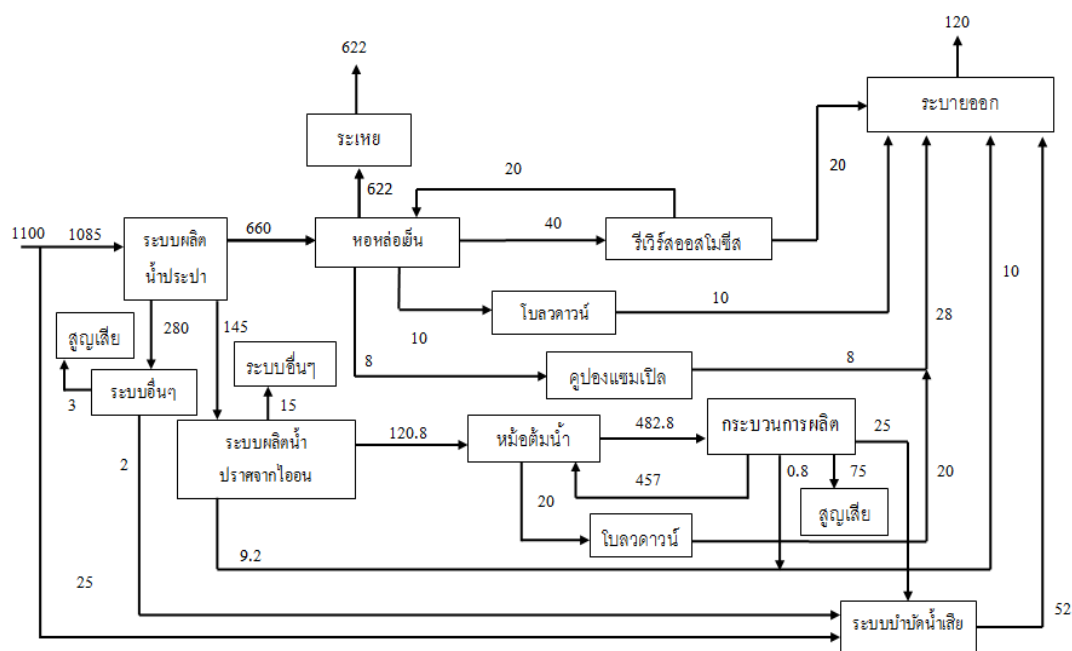
การผลิตโพรพิลีนก็มีกระบวนการใกล้เคียงกันกับเอทิลีนแต่จะแตกต่างกันคือใช้หลักการการดึงไฮโดรเจนออก (Dehydrogenation) โดยผ่านเข้าเตาปฏิกรณ์ที่เรียกว่าโอเลฟเล็กซ์ (Oleflex Reactor System) โดยโพรพิลีนสามารถใช้สารตั้งต้นได้ดังต่อไปนี้ เช่น โพรเพน (Propane) บิวเทน (Butane) ไอโซบิวเทน (Isobutane) หรือไอโซเพนเทน (Isopentane) เป็นต้น จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการอัดแล้วเมื่อจะเข้าสู่กระบวนการกลั่นจึงจะแยกสายกันออกมาเป็นเอทิลีนหรือโพรพิลีน

หลังจากนั้นเอทิลีนและโพรพิลีนจะถูกลดอุณหภูมิลงให้เหลือ  $-140$  องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อให้อยู่ในสถานะของเหลวแทนก๊าซเพื่อให้ง่ายต่อการขนส่ง ดังนั้นการจับเก็บหรือการขนส่งต้องมีวิธีการควบคุมหรือเทคนิคพิเศษเพื่อให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของเหลวตลอดเวลา

### 2.3.3 แผนผังทิศทางการใช้น้ำในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์

สุจิตรา พรรัตนพิทักษ์ (2553) ได้ทำการศึกษาอัตราการใช้น้ำในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์มีอัตราการใช้น้ำเป็นปริมาณ 1,100 ลบ.ม./ชม. และมีการใช้น้ำของหน่วยการผลิตเป็นดังภาพที่ 2.2 จากภาพสามารถจำแนกหน่วยการผลิตจากการใช้น้ำได้ดังนี้

1. หน่วยการผลิตที่ใช้น้ำจากน้ำประปาเป็นแหล่งน้ำเข้าสู่ระบบ ระบบผลิตน้ำประปาของทางโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์มีความสามารถในการผลิตน้ำ 1,085 ลบ.ม./ชม. เพื่อป้อนเข้าสู่หน่วยการผลิตที่ใช้น้ำประปาเป็นแหล่งน้ำเข้าสู่ระบบได้แก่ หอหล่อเย็น (Cooling tower) ระบบผลิตน้ำปราศจากไอออน (Demineralization) และระบบส่วนอื่นๆ โดยหอหล่อเย็นมีอัตราการใช้น้ำถึง 660 ลบ.ม.ต่อชม. เป็นปริมาณที่มากที่สุดในกลุ่มของหน่วยกระบวนการผลิตต่างๆ ของโรงงานผลิตโอเลฟินส์ที่มีการใช้น้ำประปาเป็นแหล่งน้ำและมีอัตราการสูญเสียน้ำไปกับการเดินระบบเพียงเฉพาะการระเหยก็มีปริมาณมากถึง 622 ลบ.ม./ชม. ตารางที่ 2.1 แสดงระดับสูงสุดของสารละลายที่ยอมให้มีได้ในน้ำหมุนเวียนของหอหล่อเย็น



ภาพที่ 2.2 สมดุลของน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ในหน่วย ลบ.ม./ชม.

(สุจิตรา พรรัตน์พิทักษ์, 2553)

ตารางที่ 2.1 ระดับสูงสุดของสารละลายที่ยอมให้มีได้ในน้ำหมุนเวียนของหอหล่อเย็น

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย
ความเป็นด่างทั้งหมด	500	มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต
ความกระด้างทั้งหมด	1,200	มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต
ซิลิกา	150	มก./ล. ซิลิกอนไดออกไซด์

ทีมา (มันสิน ตัญกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2545)

2. หน่วยการผลิตที่ใช้น้ำจากหน่วยผลิตน้ำปราศจากไอออนเป็นแหล่งน้ำเข้าสู่ระบบ โดยหน่วยการผลิตที่ใช้น้ำจากหน่วยผลิตน้ำปราศจากไอออนของทางโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นแหล่งน้ำเข้าสู่ระบบได้แก่ หม้อไอน้ำ และระบบส่วนอื่นๆ โดยหม้อไอน้ำมีอัตราการใช้น้ำถึง 120.8 ลบ.ม./ชม. ถือว่ามากที่สุดในกลุ่มของหน่วยการผลิตต่างๆของโรงงานผลิตโอเลฟินส์ที่มีการใช้น้ำจากหน่วยผลิตน้ำปราศจากไอออนเป็นแหล่งน้ำเข้าสู่ระบบ และมีอัตราการสูญเสียน้ำไปกับการเดินระบบถึง 75 ลบ.ม./ชม. ซึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำเลี้ยงและมาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนในหม้อต้มน้ำเป็นไปตามตารางที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3



**ตารางที่ 2.2** มาตรฐานคุณภาพน้ำเลี้ยงในหม้อต้มน้ำ

ขนาดของหม้อต้มน้ำ (บาร์)	ของแข็งละลาย น้ำทั้งหมด (มก./ล.)	ความเป็นต่างทั้งหมด (มก./ล.แคลเซียม คาร์บอเนต)	ซิลิกา (มก./ล.)	สารแขวนลอย ทั้งหมด (มก./ล.)
0 - 20.68	3,500	700	125	300
20.75 - 31.02	3,000	600	90	250
31.09 - 41.37	2,500	500	50	150
41.43 - 51.71	2,000	400	35	100
51.78 - 62.05	1,500	300	20	60
62.12 - 68.95	1,250	250	8	40
69.02 - 103.42	1,000	200	2.5	20
103.49 - 137.49	750	150	1	10
มากกว่า 137.49	500	100	0.5	5

ที่มา (มันลิน ตันซูลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2545)

**ตารางที่ 2.3** มาตรฐานขั้นต่ำของน้ำทดแทนในหม้อต้มน้ำ

ขนาดของหม้อต้มน้ำ (บาร์)	เหล็ก (มก./ล. เหล็ก)	ทองแดง (มก./ล. ทองแดง)	ความกระด้าง (มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต)
0 - 20.68	0.100	0.050	0.300
20.75 - 31.02	0.050	0.025	0.300
31.09 - 41.37	0.030	0.020	0.200
41.43 - 51.71	0.025	0.020	0.200
51.78 - 62.05	0.020	0.015	0.100
62.12 - 68.95	0.020	0.015	0.100
69.02 - 103.42	0.010	0.010	ตรวจไม่พบ
103.49 - 137.49	0.010	0.010	ตรวจไม่พบ

ที่มา (มันลิน ตันซูลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2545)

3. หน่วยการผลิตที่ใช้น้ำจากหน่วยการผลิตอื่นๆ เป็นแหล่งน้ำเข้าสู่ระบบ ซึ่งหน่วยการผลิตที่ใช้น้ำจากหน่วยการผลิตอื่นๆ เป็นแหล่งน้ำเข้าสู่ระบบของทางโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ โดยนัยแล้วก็คือ ระบบที่รองรับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตอื่นๆ ของทางโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ ซึ่งระบบที่มีการรองรับได้แก่ ระบบบำบัดน้ำเสียและระบบบำบัดด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) ทั้ง 2 ระบบมีการรับน้ำเสียจากกระบวนการอื่นๆ ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันคือ 52 และ 40 ลบ.ม./ชม.ตามลำดับ

จากภาพที่ 2.2 พบว่าโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์มีการใช้น้ำ 1100 ลบ.ม./ชม. โดยปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นที่ตรวจสอบได้ที่ส่วนของการระบายออกเป็นปริมาณ 120 ลบ.ม./ชม. ซึ่งรับน้ำเสียจากส่วนต่างๆ ได้แก่ น้ำจากระบบรีเวิร์สออสโมซิส 20 ลบ.ม./ชม. จากการไหลดาวน์ของท่อหล่อเย็น 10 ลบ.ม./ชม. จากบ่อพักน้ำ (Diversion box) ที่รับน้ำจากการไหลดาวน์ของหม้อต้มน้ำ และท่อหล่อเย็นบางส่วน 28 ลบ.ม./ชม. จากระบบผลิตน้ำปราศจากไอออนและกระบวนการผลิตภายหลังจากการปรับเสถียร 10 ลบ.ม./ชม. และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากบ่อบำบัดน้ำเสีย 52 ลบ.ม./ชม. น้ำในส่วนที่เกิดจากการสูญเสียได้แก่ จากการระเหยของท่อหล่อเย็น 622 ลบ.ม./ชม. จากหม้อต้มน้ำและกระบวนการผลิต 75 ลบ.ม./ชม. และการใช้น้ำในส่วนระบบอื่นๆ ที่ยังไม่ได้รับการตรวจสอบได้แก่ ส่วนของดาวนสตรีม (Downstream) 290 ลบ.ม./ชม. และส่วนของน้ำประปาที่ใช้ในอาคาร 5 ลบ.ม./ชม. ซึ่งทำให้เกิดน้ำเสียส่งต่อไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย 2 ลบ.ม./ชม. เกิดการสูญเสีย 3 ลบ.ม./ชม

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้นทำให้ทราบว่าองค์ประกอบของน้ำทิ้งที่ออกจากหน่วยการผลิตต่างๆ มีค่าของแข็งละลายน้ำในปริมาณที่สูง ดังนั้นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่จำเป็นต้องมีศักยภาพในการจัดการกับของแข็งละลายน้ำ ซึ่งพิจารณาแล้วว่าเทคโนโลยีเมมเบรนเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการบำบัด และหน่วยการผลิตที่ได้ทำการเลือกในการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ในงานวิจัยนี้คือ ท่อหล่อเย็น เนื่องจากปริมาณของแข็งละลายน้ำที่สูง (2,000 – 2,500 มก./ล.) มีการใช้น้ำและสูญเสียน้ำเป็นปริมาณมาก และมีความเหมาะสมในการนำมาบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

## 2.4 การบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่

Wintgens และคณะ (2005) ได้กล่าวว่าในการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่เป็นเรื่องธรรมดาที่มีการปฏิบัติมานานแล้ว แต่นั้นยังต้องเผชิญกับอุปสรรคต่างๆรวมทั้งการยอมรับจากประชาชน เพราะไม่มีมาตรฐานใดมารองรับคุณภาพ การบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่นั้นต้องคำนึงถึงหน่วยการใช้น้ำที่จะนำน้ำกลับไปใช้ใหม่ด้วยว่าต้องการน้ำในคุณภาพระดับใด หากเทคโนโลยีเหล่านั้นมีศักยภาพ

เพียงพอก็จะเป็นการส่งเสริมให้มีการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ ในภาคอุตสาหกรรมมีการใช้น้ำหมุนเวียนซ้ำในระบบเช่น หอหล่อเย็น น้ำเลี้ยงหม้อต้มน้ำ หรือระบบการผลิตอื่นๆ

เมมเบรนเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงในการบำบัดน้ำเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่การเติมน้ำกลับสู่ระบบน้ำใต้ดินจนถึงการทำน้ำดื่ม ในการใช้กระบวนการบำบัดด้วยเมมเบรนจะใช้ขนาดรูพรุนของเมมเบรนแต่ละชนิดในการกำจัดสารแต่ละชนิดเรียงลำดับจากใหญ่ไปเล็กดังนี้

1. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เป็นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.05 – 10 ไมครอน สามารถกำจัดจุลชีพต่างๆในน้ำ เช่น แบคทีเรีย ฟังไจ ยีสต์ และไวรัสบางชนิดได้รวมทั้งของแข็งแขวนลอย มีอัตราการกรองสูงถึง 10 – 100 ลบ.ม./ตร.ม./วัน และใช้แรงดันที่ต่ำมาก (1 – 2 บาร์) ซึ่งเกือบเท่ากับอัตราการกรองของถังกรองทราย แต่เนื่องจากรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดการอุดตันได้ง่าย นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้ในการบำบัดเบื้องต้นให้กับระบบบำบัดน้ำอื่นๆ (Wintgens และคณะ, (2005), ภาศัลย์ ใจรังษี, (2547) และ มั่นสิน ตันทุลเวศม์ และคณะ, (2554))

2. อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.001-0.02 ไมครอน สามารถกำจัดไวรัสและสารอินทรีย์ขนาดโมเลกุลเล็กได้ถึง 20 นาโนเมตร สามารถใช้แทนถังกรองทรายได้ ดังนั้นคอลลอยด์ขนาดประมาณ 0.001 – 0.1 ไมครอน ได้เป็นอย่างดี ทำให้ไม่ต้องใช้สารเคมีจำพวกโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) และตะกอนสลัดจ์ลงได้ อัลตราฟิลเตรชันมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การสกัดหรือแยกสารในน้ำเสียและนำกลับมาใช้ใหม่ รวมทั้งในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อผลิตน้ำปลอดเชื้อโรคในอุตสาหกรรมยาและใช้ในทางการแพทย์ เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสามารถใช้งานที่แรงดันต่ำ และมีอัตราการกรองน้ำที่สูงกว่าระบบรีเวิร์สออสโมซิสมาก (Wintgens และคณะ, (2005) และ มั่นสิน ตันทุลเวศม์ และคณะ, (2554))

3. นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) เป็นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า 0.002 ไมครอน พัฒนาขึ้นมาในช่วงหลังของปี ค.ศ.1970 สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กกว่า 20 นาโนเมตร และไอออนที่เป็นมัลติวาเลนต์ (Multivalent) แต่ไม่สามารถกำจัดไอออนที่มีวาเลนต์เท่ากับ 1 ได้ แต่เดิมใช้เพื่อกำจัดสาร Trihalomethanes (THM) และเพื่อกำจัดความกระด้างในน้ำใต้ดินแทนกระบวนการปูน-โซดา (Lime-Soda Softening) ซึ่งต้องใช้สารเคมีในปริมาณมาก นอกจากนี้นาโนฟิลเตรชันมีขีดความสามารถที่ใกล้เคียงกับกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสมาก ในปัจจุบันนี้มักใช้งานในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter) รวมทั้งสาร Disinfection Byproducts (DBP) (Wintgens และคณะ, (2005) และ มั่นสิน ตันทุลเวศม์ และคณะ, (2554))

4. รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO) เป็นเมมเบรนชนิดเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable) สามารถกำจัดสารละลายได้ทุกชนิด

โดยปกติแล้ว ไมโครฟิลเทรชันและอัลตราฟิลเทรชันมักถูกใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สามเพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ และกำจัดเชื้อโรค ซึ่งยังเป็นระบบบำบัดเบื้องต้นให้กับระบบนาโนฟิลเทรชันและรีเวิร์สออสโมซิสอีกด้วย แต่ในการออกแบบและการเดินระบบจริงพบว่าไม่สามารถกำจัดจุลชีพได้ทั้งหมดเพราะความเสียหายที่ผิวของเมมเบรน นอกจากนี้ยังมีการใช้ผงถ่านกัมมันต์ (Podered activated carbon, PAC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและสิ่งปนเปื้อนขนาดเล็กอื่นๆร่วมกับไมโครฟิลเทรชันหรืออัลตราฟิลเทรชันอีกด้วย โดยเติมผงถ่านกัมมันต์ลงไปเพื่อให้เกิดการดูดติดผิว (Adsorption) ของสารอินทรีย์ละลายน้ำกับผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งผงถ่านกัมมันต์นี้จะถูกกั้นด้วยเมมเบรนไม่สามารถผ่านไปกับน้ำได้ เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำอย่างหนึ่ง และหากต้องการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ จุลชีพในน้ำ (รวมทั้งไวรัสด้วย) เพราะเป็นสาเหตุของโรคภัยไข้เจ็บต่างๆ ในน้ำเสียมักมีจุลชีพอยู่ในระดับสูง เมมเบรนทุกชนิดมีความสามารถในการกำจัดจุลชีพเพียงพออยู่แล้ว (เมมเบรนไมโครฟิลเทรชันอาจไม่เพียงพอในการกำจัดไวรัส) แต่อย่างไรก็ตามในการบำบัดน้ำจึงควรมีการเพิ่มขึ้นตอนในการฆ่าเชื้อโรคด้วย (Wintgens และคณะ, 2005)

ปกติน้ำไหลตามจากท่อหล่อเย็นจะมีค่าของแข็งละลายอยู่ที่ 2,000 – 2,500 มก./ล. ในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าของแข็งละลายดังกล่าววิธีที่เป็นที่นิยมคือการใช้เทคโนโลยีเมมเบรน เช่น ระบบรีเวิร์สออสโมซิส อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis) เป็นต้น ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยระบบรีเวิร์สออสโมซิสนั้น ก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่ระบบควรมีการบำบัดเบื้องต้นเสียก่อนเพื่อกำจัดค่าคุณภาพของน้ำอื่นๆที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนเช่น ความกระด้าง (Hardness) ความเป็นด่าง (Alkalinity) เป็นต้น หน่วยบำบัดเบื้องต้นที่ได้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือ เมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเทรชัน ค่าที่ใช้ในการบ่งบอกคือ ค่าดัชนีตะกอนหรือเอสดีไอ (Silt density index, SDI) จะบ่งบอกถึงปริมาณของแข็งในน้ำซึ่งน้ำที่จะเข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิสหรือเมมเบรนชนิดอื่นๆได้ควรรอยู่ที่ น้อยกว่า 5 ค่าดัชนีตะกอนมีค่าต่ำหมายความว่ามีความสะอาดหรือสารแขวนลอยอื่นๆ ต่ำ (Kaliappan และคณะ, 2005) ค่าเอสดีไอนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$SDI = \frac{(1 - \frac{t_0}{t_f})}{t_1} \times 100 \quad (1)$$

$t_0$  = เวลาในหน่วยวินาที ที่ใช้ในการกรองน้ำเริ่มแรกเพื่อให้ได้น้ำกรองในปริมาตร 500 มล.

$t_1$  = เวลาในหน่วยวินาที ที่ใช้ในการกรองน้ำ 15 นาที โดยไม่วัดปริมาตร ความดัน 2 บาร์

$t_f$  = เวลาในหน่วยวินาที ที่ใช้ในการกรองน้ำหลังจากกรองน้ำผ่านไปแล้ว 15 นาที ให้ได้ 500 มล.

ในการทดลองเพื่อวัดค่าดัชนีตะกอนในเวลา  $t_1 = 15$  นาที แล้วกระดาดกรองอุดตันจนไม่สามารถกรองน้ำต่อได้ น้ำตัวอย่างนี้ไม่สามารถเข้าสู่ระบบเมมเบรนได้

## 2.5 ระบบกรองรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO)

เป็นระบบกรองด้วยเมมเบรน ที่มีความละเอียดมากที่สุดในปัจจุบันนี้ อาศัยปัจจัยสำคัญ 2 ประการ คือ แรงดันและเมมเบรน ด้วยความละเอียดในการกรองประมาณ 0.0001 ไมครอน ดังนั้นระบบรีเวิร์สออสโมซิส นี้จึงถูกนำมาใช้ในการกรองเพื่อผลิตน้ำบริสุทธิ์ โดยเฉพาะในบางประเทศที่ไม่มีแหล่งน้ำจืด ระบบรีเวิร์สออสโมซิสถูกนำมาใช้ในการกรองน้ำทะเลให้เป็นน้ำจืด และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำที่มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดเกลือออกจากน้ำทะเลด้วยวิธีการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิมแล้วมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยเฉพาะด้านการใช้พลังงาน (Altaee, 2012) หลักการทำงานของระบบกรองนี้จะต้องอาศัยการเพิ่มแรงดันให้น้ำให้สูงกว่าแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) เพื่อให้น้ำไหลผ่านเยื่อกรองที่มีความละเอียดสูงนี้ได้ โดยที่โมเลกุลของน้ำและสารละลายต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำจะถูกระบบรีเวิร์สออสโมซิสนี้แยกส่วนออกจากกัน โดยที่เยื่อกรองจะยอมให้เพียงโมเลกุลของน้ำบริสุทธิ์เท่านั้นที่ไหลผ่านเยื่อกรองออกไปสู่ออกน้ำดื่มได้ ส่วนสารละลายที่ประกอบไปด้วยโลหะหนัก ไนโตรเจน แบคทีเรีย และสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำจะถูกขับออกทางท่อน้ำทิ้งไป ซึ่งแรงดันออสโมติกนี้เกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารละลายสองชนิด โดยปกติในธรรมชาติน้ำจะแพร่จากสารละลายความเข้มข้นต่ำไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง หากมีการนำเอาแผ่นเมมเบรนมาทับไว้จะพบว่าระดับน้ำทั้งสองฝั่งของแผ่นเมมเบรนจะมีระดับไม่เท่ากัน น้ำในฝั่งสารละลายเข้มข้นสูงจะมีปริมาณสูงขึ้น ผลต่างของระดับน้ำนี้จึงเรียกว่า แรงดันออสโมติก แรงดันออสโมติกนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 ดังนี้

$$\Pi = nCRT \quad (2)$$

$\Pi$  = แรงแดันออสโมติกในหน่วย บาร์

n = จำนวนไอออนในสารประกอบ

C = ความเข้มข้นของสารละลายในหน่วย โมล/ลิตร

R = ค่าคงที่ของก๊าซมีค่า  $8.2 \times 10^{-5}$  บาร์·ลบ.ม./โมล/(273°ซ)

T = อุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวินหรือ 273+°ซ

**ตารางที่ 2.4** แรงแดันออสโมซิสของสารประกอบบางชนิดที่ 25 °ซ

สารประกอบ	ความเข้มข้น		แรงแดันออสโมติก (บาร์ ที่ 25 °ซ)
	มก./ล.	โมล/ล.	
NaCl	35,000	0.6	27.44
NaCl	1,000	0.0171	0.79
NaHCO	1,000	0.0119	0.88
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,000	0.00705	0.41
MgSO <sub>4</sub>	1,000	0.00831	0.25
MgCl <sub>2</sub>	1,000	0.0105	0.67
CaCl <sub>2</sub>	1,000	0.009	0.57
ซูโครส	1,000	0.00292	0.07
เด็กซ์โตรส	1,000	0.00555	0.14

ที่มา (มันสิน ตันตุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2545)

ตารางที่ 2.4 ได้แสดงแรงแดันออสโมติกของสารบางชนิดที่คำนวณได้ที่ 25 องศาเซลเซียส เพื่อความรวดเร็วในการกรองอาจต้องใช้แรงแดัน 20.68 - 68.95 บาร์ หรือมากกว่า เพราะหากปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยตัวเองจะเกิดขี้และปฏิกิริยาจะหยุดเมื่อเข้าสู่สมดุล ระบบรีเวิร์สออสโมซิสจึงถูกนำมาผลิตน้ำดื่มเพื่อการบริโภค เพื่อใช้ในการผลิตอุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องดื่ม การผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงบำบัดน้ำเสียของหอหล่อเย็นอีกด้วย เพื่อให้การกรองมีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้อย่างยาวนานจึงจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ

ตารางที่ 2.5 ดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำเข้าระบบรีเวิร์สออสโมซิส

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
1. ความขุ่น (Turbidity)	< 1	เอ็นทียู	
1.1 ของแข็งแขวนลอย			
1.2 คอลลอยด์	< 5	เอสดีไอ	
2. ออกไซด์ของโลหะ			
2.1 เหล็ก			ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและพีเอช
ออกซิเจน < 0.5 , pH < 0.6	4	มก./ล.	
ออกซิเจน 0.5 – 5 มก./ล. พีเอช 6 - 7	0.5	มก./ล.	
ออกซิเจน 5-10 มก./ล. พีเอช >7	0.05	มก./ล.	
2.2 สารประกอบอลูมิเนียม			
คอลลอยด์ของอลูมิเนียม	0.05	มก./ล.	ถ้ามากกว่า 0.1 มก./ล. ต้องปรับพีเอช ให้สูงกว่า 6.7 หรือต่ำกว่า 6.5
3. การตกผลึก			
3.1 เกลือซัลเฟต			
ไม่มีการเติมสารป้องกันการตกผลึก (Anti sealants)			- ทั้งนี้ค่าการละลายขึ้นกับปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำทั้งหมด ถ้าหากในน้ำมีปริมาณเกลือละลายอยู่มากค่าการละลายจะมีค่าสูงขึ้นและอุณหภูมิของน้ำ
CaSO <sub>4</sub>	< 0.8 K <sub>sp</sub>	ไอพีบี	
BaSO <sub>4</sub>	< 0.8 K <sub>sp</sub>	ไอพีบี	
SrSO <sub>4</sub>	< 0.8 K <sub>sp</sub>	ไอพีบี	
มีการเติมสารป้องกันการตกผลึก (Anti sealants) ความเข้มข้น 10 มก./ล.			- ไอพีบี (IPb) คือ ผลคูณไอออนในน้ำที่จากระบบรีเวิร์สออสโมซิส (Brine)
CaSO <sub>4</sub>	< 1.2 K <sub>sp</sub>	ไอพีบี	
BaSO <sub>4</sub>	< 40 K <sub>sp</sub>	ไอพีบี	
SrSO <sub>4</sub>	< 8 K <sub>sp</sub>	ไอพีบี	

ตารางที่ 2.5 ดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำในระบบรีเวิร์สออสโมซิส (ต่อ)

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
3.2 แคลเซียมคาร์บอเนต			แอลเอสไอ (langelier saturation index, LSI) คือ ดัชนีบ่งชี้การเกิดตะกรันของแคลเซียมคาร์บอเนต
	< 0	แอลเอสไอ	
	0-1	แอลเอสไอ	ต้องเติมสารป้องกันการตกผลึก 10 มก./ล.
	>1	แอลเอสไอ	ต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนเข้าระบบรีเวิร์สออสโมซิส
3.3 ซิลิกา	$SiO_{2b} < SiO_{2At}$	มก./ล.	$SiO_{2b}$ ปริมาณซิลิกาในน้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิส $SiO_{2At}$ ปริมาณซิลิกาที่ยอมรับได้ที่สภาวะพีเอช และอุณหภูมิที่เดินระบบ
4. สารอินทรีย์	> 150	ดอลตัน	สารอินทรีย์บางชนิดขึ้นกับ พีเอช ถึงแม้จะมีขนาดเล็กกว่า 150 ดอลตัน ก็ตาม
5. คลอรีนอิสระ	< 0.01	มก./ล.	ยกเว้นเมมเบรนชนิดเซลล์ลูโลสอะซิเตด จะสามารถรับได้ถึง 1 มก./ล.

ที่มา (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2555)

ตามตารางที่ 2.5 แต่อย่างไรก็ตามระบบรีเวิร์สออสโมซิสยังคงมีข้อจำกัดอยู่ โดยไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว (แต่ไม่เสมอไปเพราะระบบรีเวิร์สออสโมซิสสามารถกำจัดสารอินทรีย์และเอมีน (Amines) ได้เช่นเดียวกับกรดอ่อนและด่างอ่อนทั่วไปทั้งๆ ที่กรดอินทรีย์และเอมีนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) และมีความเป็นพิษที่อยู่ในน้ำเช่น ยาปราบศัตรูพืช (Pesticides) ฟีนอล (Phenol) แอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และทั้งนี้ไม่มีระบบรีเวิร์สออสโมซิสเครื่องใดสามารถรับประกันได้ว่าสามารถกรองน้ำที่ปราศจากจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด เพราะอาจมีรอยรั่วตามรอยต่อหรือฉีกขาดของแผ่นเมมเบรน ดังนั้นในบางอุตสาหกรรมที่ต้องการน้ำ



ที่มีความสะอาดมากๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมผลิตยา หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ น้ำที่ผ่านการกรองแล้วต้องมีการกำจัดจุลินทรีย์ก่อนนำไปใช้ และถึงแม้ว่ากระบวนการทางเมมเบรนจะสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้หลากหลายแต่กระบวนการเมมเบรนควรใช้เพื่อการกำจัดของแข็งละลายน้ำจึงจะเหมาะสมที่สุด(มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และคณะ, 2554)

### 2.5.1 กลไกการทำงานของระบบรีเวิร์สออสโมซิส

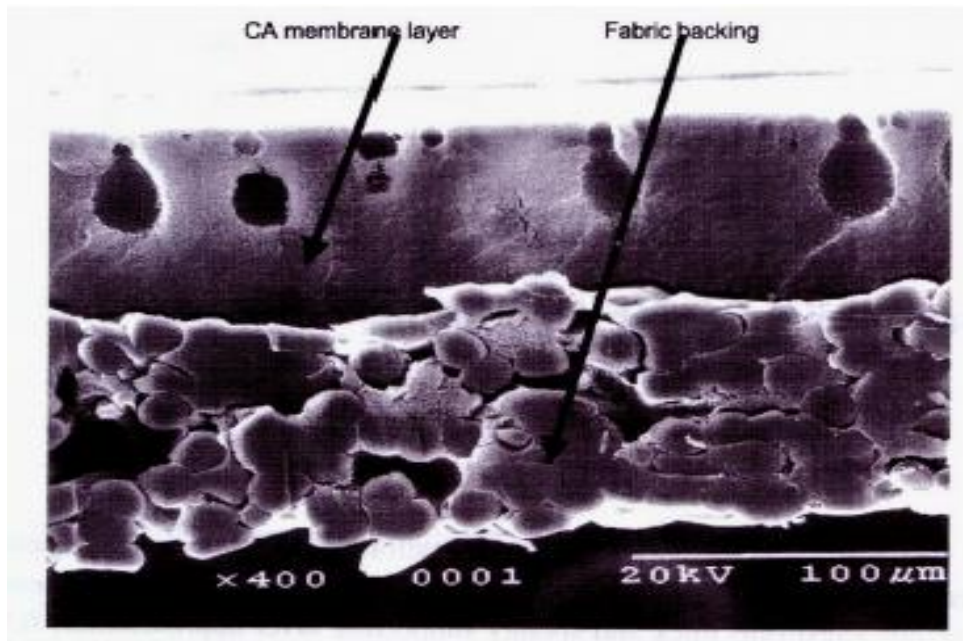
กลไกของรีเวิร์สออสโมซิสมี 2 ประการคือ กลไกในการกำจัดเกลือ (Salt rejection) และกลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ โดยกลไกในการกำจัดเกลือจะขึ้นกับจำนวนวาเลนซ์ (Valence) ของไอออนต่างๆ ไอออนที่มีวาเลนซ์สูงจะถูกเมมเบรนผลักได้ไกลกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ และแรงผลักนี้จะทำให้เกิดชั้นน้ำซึ่งปกคลุมผิวหน้าและบางส่วนของภายในรูพรุนของเมมเบรน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการผลิตแผ่นเมมเบรนในปัจจุบันยังไม่ถึงขั้นอุดมคติ ทำให้ยังคงเกิดการรั่วไหลของไอออนต่างๆ ประมาณร้อยละ 1-10 ของความเข้มข้นทั้งหมด ดังนั้นสารอนินทรีย์ที่ไม่มีประจุไฟฟ้าเช่น ก๊าซต่างๆ จึงไม่ถูกผลักจากเมมเบรน ส่วนกลไกในการกำจัดสารอินทรีย์จะใช้หลักการการกรองติดค้าง (Sieve) สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนหรือมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 200 ดาลตัน จะไม่สามารถผ่านไปได้

### 2.5.2 เมมเบรนสำหรับกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส

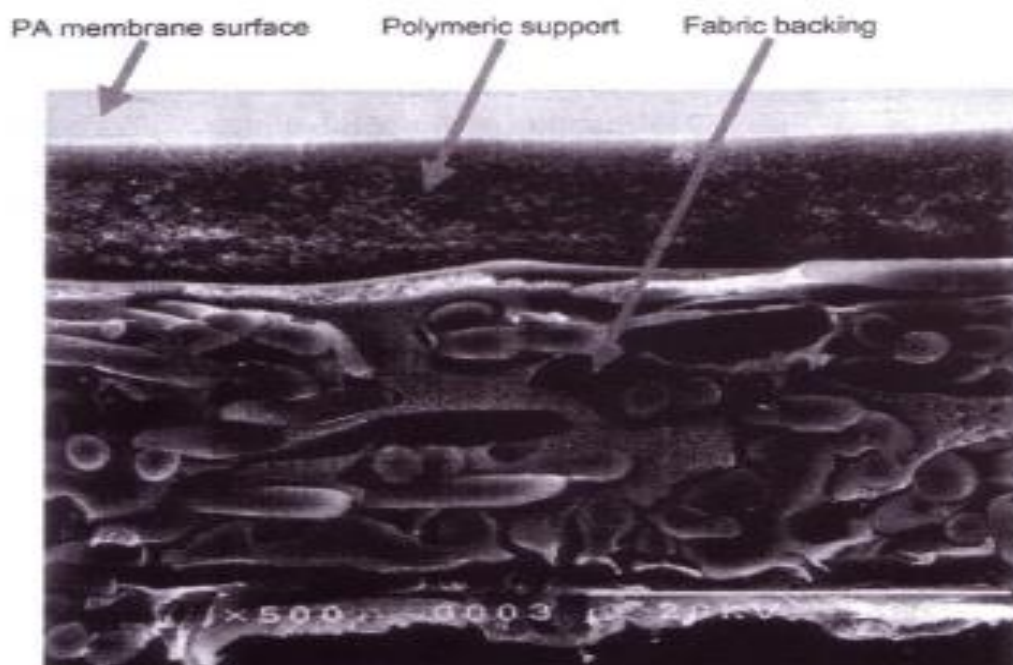
เมมเบรนสำหรับกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสสามารถแบ่งได้ดังนี้

#### 2.5.2.1 แบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต

เมมเบรนผลิตมาจากโพลีเมอร์ 2 ประเภท คือ เซลลูโลส (Cellulose) (ภาพที่ 2.3) และโพลีเอไมด์ (Polyamide) (ภาพที่ 2.4) เซลลูโลสที่ใช้ผลิตเมมเบรนมี 2 ประเภท คือ เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) และ เซลลูโลสไตรอะซิเตต (Cellulose triacetate) ซึ่งไม่สามารถทนต่อกรดหรือด่างหรือที่อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เพราะจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพ ส่วนเมมเบรนที่ผลิตจากโพลีเอไมด์มีความทนทานต่อกรดหรือด่างและอุณหภูมิได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมมเบรนชนิดเซลลูโลสจะทนทานต่อสารออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing agent) ได้ดีกว่า เช่น สามารถทนทานต่อคลอรีนที่ความเข้มข้นได้ไม่เกิน 1 มก./ล. เป็นเวลานานๆ และ ไม่เกิน 10 – 20 มก./ล. ได้เป็นครั้งคราวในระยะเวลานั้นๆ



ภาพที่ 2.3 ภาพตัดขวางของเมมเบรนเซลลูโลสอะซิเตดที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM) กำลังขยาย 400 เท่า (แสง เกิดประทุม, 2555)



ภาพที่ 2.4 ภาพตัดขวางของเมมเบรนโพลีเอไมด์ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (แสง เกิดประทุม, 2555)

### 2.5.2.2 แบ่งตามการใช้งาน

1. เมมเบรนสำหรับกรองน้ำทะเล หรือน้ำที่มีปริมาณของแข็งละลายน้ำมากกว่า 10,000 – 50,000 มก./ล. ใช้แรงดันในการกรอง 55.16 – 68.95 บาร์ ประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่าร้อยละ 99.3

2. เมมเบรนสำหรับกรองน้ำกร่อย หรือน้ำที่มีปริมาณของแข็งละลายน้ำมากกว่า 2,000 – 10,000 มก./ล. ใช้แรงดันในการกรอง 13.79 – 20.68 บาร์ ประสิทธิภาพในการกำจัดประมาณร้อยละ 99

3. เมมเบรนสำหรับกรองน้ำที่มีไอออนประจุ  $2^+$  และ  $2^-$  ขึ้นไป ใช้แรงดันในการกรอง 6.89 – 13.77 บาร์ ประสิทธิภาพในการกำจัดประมาณร้อยละ 98 – 99 และ หากน้ำมีไอออนประจุ  $1^+$  และ  $1^-$  ประสิทธิภาพการกำจัดจะอยู่ที่ร้อยละ 60 -70 เมมเบรนชนิดนี้จะเรียกว่า นาโนฟิลเทรชัน

4. เมมเบรนเพื่อลดการอุดตัน (Low fouling membrane) เป็นเมมเบรนที่ออกแบบให้ผิวหน้าของเมมเบรนไม่มีประจุไฟฟ้า โดยเคลือบสารบางชนิดที่ผิวหน้าของเมมเบรน มักใช้กับน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วหรือน้ำที่มีอนุภาคขนาดเล็กสูง จึงช่วยลดการอุดตันที่เกิดจากอนุภาคได้ดี

5. เมมเบรนที่ออกแบบเพื่อใช้แยกตัวถูกละลายที่เป็นสารอินทรีย์ เรียกว่า ไฮเปอร์ฟิลเทรชันเมมเบรน (Hyper filtration membrane) ใช้คัดแยกสารที่มีโมเลกุลต่างๆ หรือก๊าซ มักใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม (แสง เกิดประทุม, 2555)

### 2.5.3 ส่วนประกอบสำคัญต่างๆ ของระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ระบบรีเวิร์สออสโมซิสมีส่วนประกอบที่สำคัญต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 2.5.3.1 หน่วยบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment)

หน่วยนี้มีหน้าที่ในการเตรียมน้ำก่อนเข้าระบบรีเวิร์สออสโมซิส จุดมุ่งหมายในการบำบัดเบื้องต้นได้แก่

1. กำจัดคอลลอยด์และสารแขวนลอย วิธีการที่มักใช้ในการกำจัดพวกสารแขวนลอยได้แก่ ถังกรองทราย หรือคาร์ทริดจ์ฟิลเตอร์ (Cartridge filter) หน่วยโคแอกกูเลชัน/ฟล็อกคูเลชัน (Coagulation / Flocculation)

2. ปรับและควบคุมระดับพีเอช และอุณหภูมิของน้ำดิบ

3. ป้องกันหรือควบคุมการเกิดตะกอนของสารต่างๆ ซึ่งสามารถอุดตันท่อหรือเมมเบรน เช่น หน่วยเติมสารเคมีป้องกันการเกิดตะกอน (Anti-scalant)

4. ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ เพื่อป้องกันมิให้มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การเติบโตของจุลินทรีย์เกิดจากการที่มีสารอินทรีย์ที่มากับน้ำดิบและจุลินทรีย์เหล่านั้นใช้สารอินทรีย์เป็นอาหารในการเจริญเติบโต วิธีการที่ควบคุมจุลินทรีย์กระทำได้นี้คือ กำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำเบื้องต้นด้วยการใช้ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ดูดซับสารอินทรีย์ หรือ เติมนคลอรีนให้กับน้ำดิบจนมีปริมาณตกค้าง 1 – 2 มก./ล. เช่น หน่วยยูวี หรือ ฆ่าเชื้อโรคด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (UV/Sodium hypochlorite, NaOCl)

5. กำจัดน้ำมันหรือไขมัน ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ

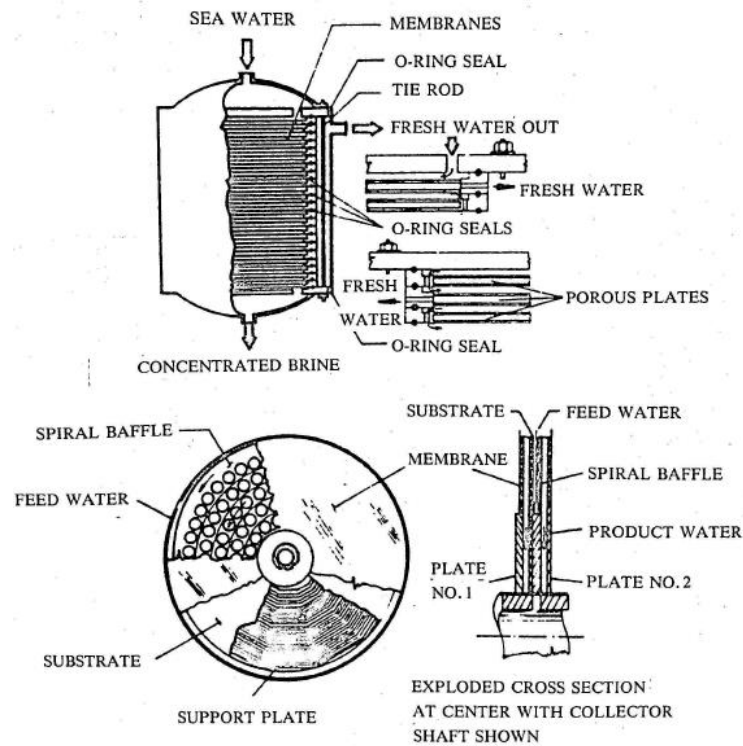
2.5.3.2 เครื่องสูบน้ำที่มีแรงดันสูง

ในการกรองน้ำแรงดันของเครื่องสูบน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้มีการกรองเกิดขึ้น การกรองน้ำจึงอาจใช้แรงดันที่ต่ำมาก ในขณะที่การกรองน้ำทะเลอาจต้องใช้แรงดันสูงถึง 68.95 บาร์ หรือมากกว่าซึ่งขึ้นกับคุณภาพของน้ำดิบ เครื่องสูบน้ำที่ใช้อาจเป็นแบบหอยโข่ง (Centifugal pump) หรือแบบ Positive Displacement ก็ได้ ในการควบคุมอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำทั้ง 2 ชนิดสามารถกระทำได้โดยใช้ท่อ Bypass และ Back Pressure Valve

2.5.3.3 โมดูลชนิดต่างๆ ของระบบรีเวิร์สออสโมซิส

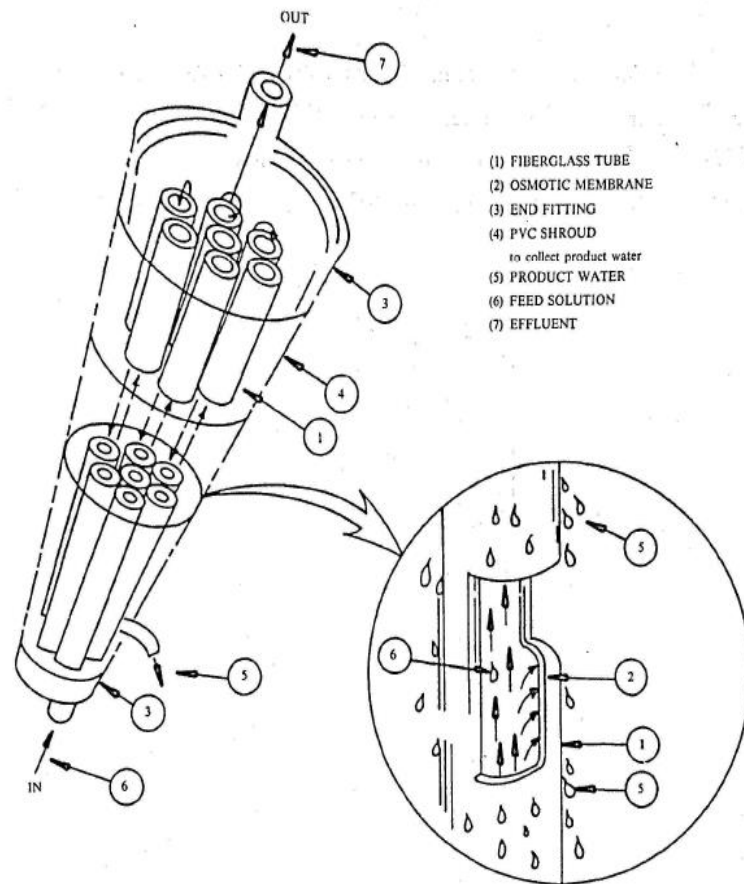
เนื่องจากเมมเบรนมีความเปราะบาง ต้องรับแรงดันสูง จึงอาจเกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องมีภาชนะรองรับเมมเบรนหรือ โมดูล (Module) เพื่อปกป้องเมมเบรน ในปัจจุบันมีการสร้างโมดูลชนิดต่างๆ 4 ประเภท ได้แก่

1. แบบแผ่น (Plate and Frame) (ภาพที่ 2.5) แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous plate) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนและสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับและไหลออกจากโมดูล โมดูลชนิดนี้ใช้เมมเบรนที่ผลิตจากเซลลูโลสอะซิเตด แต่โมดูลแบบนี้ต้นทุนการติดตั้งและบำรุงรักษาสูงมาก



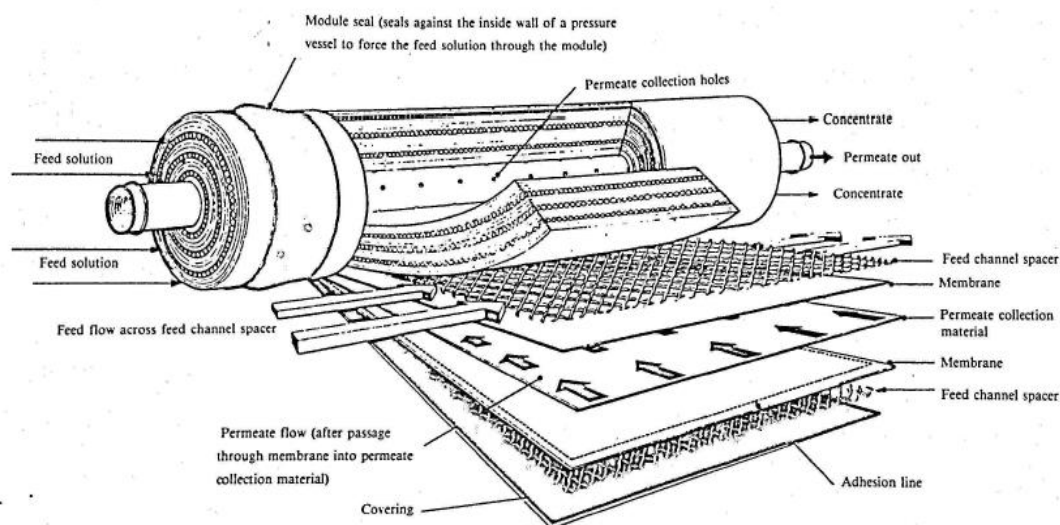
ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบต่างๆของโมดูลแบบแผ่น (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

2. แบบท่อ (Tubular) (ภาพที่ 2.6) เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรน ให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 มม. และยึดติดไว้ในท่ออีกอันหนึ่งที่ผลิตด้วยกระดาษหรือผลิตด้วยใยสังเคราะห์ และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรนไม่ให้เกิดการฉีกขาดในระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถซึมผ่านแผ่นเมมเบรนและท่อรองรับ ออกไปสู่ภายนอก โมดูลชนิดนี้ใช้เมมเบรนที่ผลิตจากเซลลูโลสอะซิเตด เทคนิคนี้ผลิตน้ำได้น้อยแต่ทำความสะอาดได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้กับกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ต้องการแยกน้ำออกจากสารละลายต่างๆ



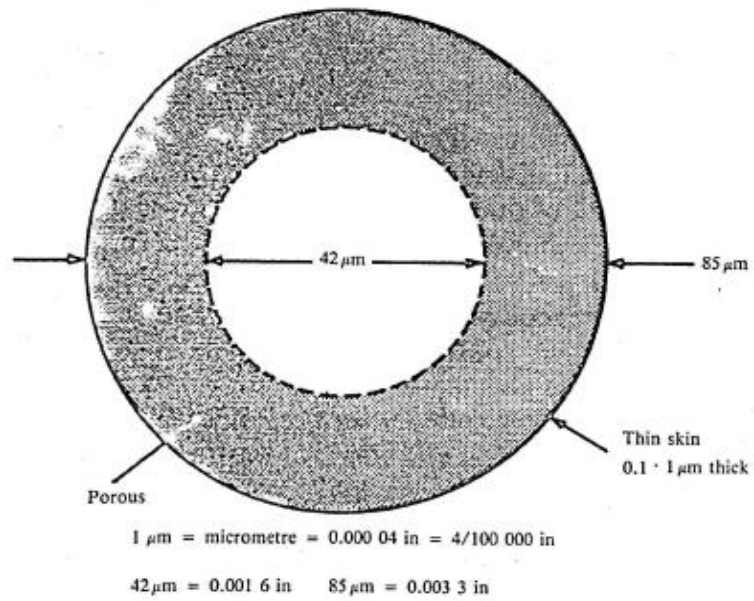
ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบต่างๆ ของโมดูลแบบท่อ (มันสิน ตัณชุลเวศม์, 2542)

3. แบบม้วน (Spiral wound) (ภาพที่ 2.7) โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรน 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่กลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นทั้ง 3 รอบท่อเจาะรู โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วยโพลีโพรพิลีน คลุมปิดด้านนอกอีกชั้นหนึ่ง ขอบของเมมเบรนทั้ง 3 แผ่น จะอุดด้วยกาว ส่วนขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและยึดติดกับท่อเจาะรู น้ำจะไหลซึมจากผิวด้านนอก ของเมมเบรนเข้ามาตามแนวรัศมีผ่านรูที่เจาะไว้เข้ามาในท่อด้วยแรงดัน โมดูลชนิดนี้อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 0.1 0.2 หรือ 0.3 ม. และมีความยาวต่าง ๆ กัน แต่มักไม่เกิน 1 ม. และใช้เมมเบรนที่ผลิตจากเซลลูโลสอะซิเตด ในการใช้งานน้ำดิบจะถูกบังคับให้ไหล (ในแนวแกนของโมดูล) เข้าไปตามแผ่นตะแกรงจากนั้นแรงกดอัดทำให้น้ำซึมผ่านเมมเบรน (ตามแนวรัศมีของโมดูล) ลงไปถึงแผ่นรองรับซึ่งทำหน้าที่ส่งน้ำที่กรองไปยังท่อเจาะรูเพื่อนำออกจากโมดูล

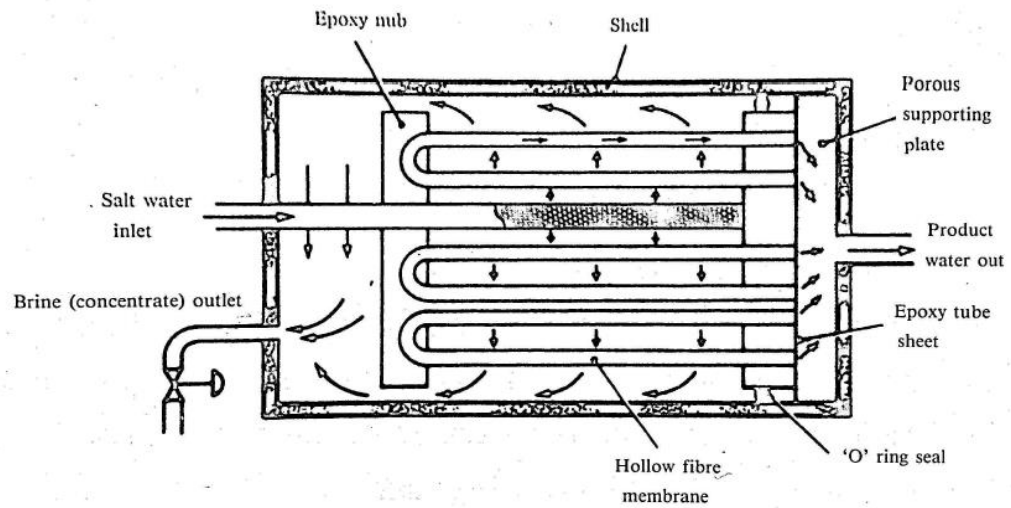


ภาพที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆ ของโมดูลแบบม้วน (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

4. แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) (ภาพที่ 2.8) เริ่มแรกโมดูลแบบเส้นใยกลวงใช้เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุโพลีเอไมด์ ภายหลังมีการพัฒนาให้สามารถใช้เมมเบรนที่ผลิตจากเซลลูโลส ไตรอะซิเตดได้ เมมเบรนที่ผลิตจากโพลีเอไมด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 50 – 85 ไมครอน และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและเมมเบรนที่ผลิตจากเซลลูโลส ไตรอะซิเตดจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 200 – 300 ไมครอน ในการนำเมมเบรนไปใช้กระทำได้โดยนำเมมเบรนมามีตรวมกันแล้ววางเป็นรูปเกือกม้า ปลายทั้ง 2 ข้างติดตั้งอยู่ที่ทางน้ำออก เส้นใยเมมเบรนที่เหลือจะอยู่ภายในถังทรงกระบอก และน้ำที่เข้ามาในถังด้วยแรงดันจะซึมผ่านเส้นใยเมมเบรนออกไป



ภาพที่ 2.8 ขนาดของเส้นใยกลวง (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)



ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบต่างๆ ของโมดูลแบบเส้นใยกลวง (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)



ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติต่างๆ ของโมดูลทั้ง 4 ชนิด

ชนิดของ โมดูล	ชนิดของ เมมเบรน	ความหนาแน่น ของการบรรจุ (ตร.ม/ลบ.ม.)	พีเอช	ความสะอาด ในการทำ ความสะอาด	การกรอง สารละลาย	ฟลักซ์ของน้ำ (ลบ.ม./ตร.ม. / วัน)
แบบแผ่น	เซลลูโลส อะซิเตด	450	2 - 8	พอใช้	ดีมาก	0.5
แบบท่อ	เซลลูโลส อะซิเตด	150	2 - 8	ดีมาก	ดีมาก	0.5
แบบม้วน	เซลลูโลส อะซิเตด	750	2 - 8	ดี	ดีมาก	0.5
แบบเส้นใย กลวง	โพลีเอไมด์	7,500 - 15,000	4 - 11	พอใช้	ดี	0.2 - 0.5

\* ที่แรงดัน 40 บรรยากาศ

ที่มา (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

#### 2.5.4 ระบบควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ต้องระบายทิ้ง

กระทำได้โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้มข้น (Concentrate) หรือ Rejected water ให้มีอัตราการไหลตามกำหนดโดยดูจาก ค่าประสิทธิภาพการบำบัด (% Recovery) เช่น หากออกแบบให้มีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 ก็ต้องควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้มข้นให้เท่ากับ  $100 - 60 = 40$  ร้อยละ 40 ของน้ำที่เข้า ซึ่งน้ำที่ผ่านการกรอง (Permeate) ออกมาจะมีการไหลเป็นแบบอิสระ (ที่ความดัน 1 บรรยากาศเสมอ) ในระยะเริ่มแรกเมื่อแผ่นเมมเบรนยังสะอาดอยู่อัตราการกรองจะสูงเกินไป จึงต้องเปิดวาล์วน้ำเสียเพื่อให้มีแรงดันลดลงซึ่งจะทำให้อัตราการกรองลดลงด้วย เมื่ออายุการกรองเพิ่มขึ้น จึงปรับวาล์วเพื่อรักษาอัตราการกรองให้อยู่ที่ระดับเดิม เครื่องสูบน้ำของระบบเมมเบรนจึงนิยมใช้เป็นแบบที่สามารถปรับอัตราน้ำเข้าได้ (Variable Speed Motor)

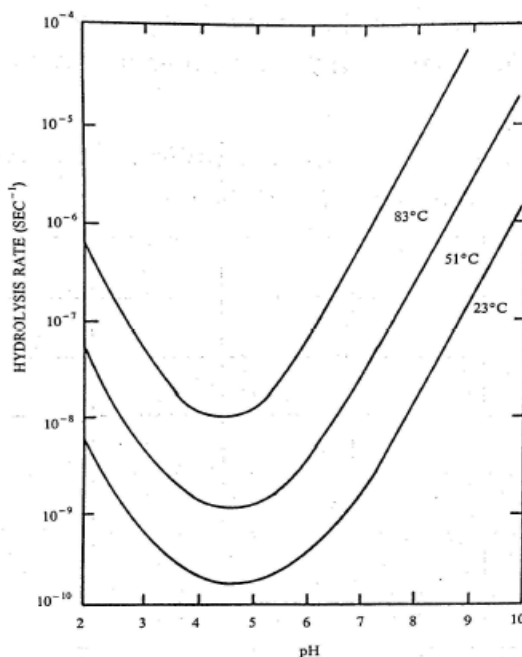
#### 2.5.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบรีเวิร์สออสโมซิส

##### 2.5.5.1 แรงดัน

การเพิ่มแรงดันจะช่วยให้ผลิตน้ำได้มากขึ้นและแทบไม่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงาน แต่หากใช้แรงดันน้ำสูงเกินไปจะทำให้โครงสร้างของเมมเบรนเกิดการอัดตัวแน่น (Compaction) น้ำซึมผ่านได้ยาก (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

### 2.5.5.2 อุณหภูมิและพีเอช

อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นช่วยให้อัตราการกรองดีขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมคือช่วง 15 – 30 องศาเซลเซียส ช่วยให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 – 5 แต่ไม่ทำให้เกิดการรั่วไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ระบบรีเวิร์สออสโมซิสในการบำบัดน้ำที่มีอุณหภูมิสูง จากภาพที่ 2.10 จะพบว่าควรปรับพีเอชของน้ำให้อยู่ในช่วง 3 – 7 (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

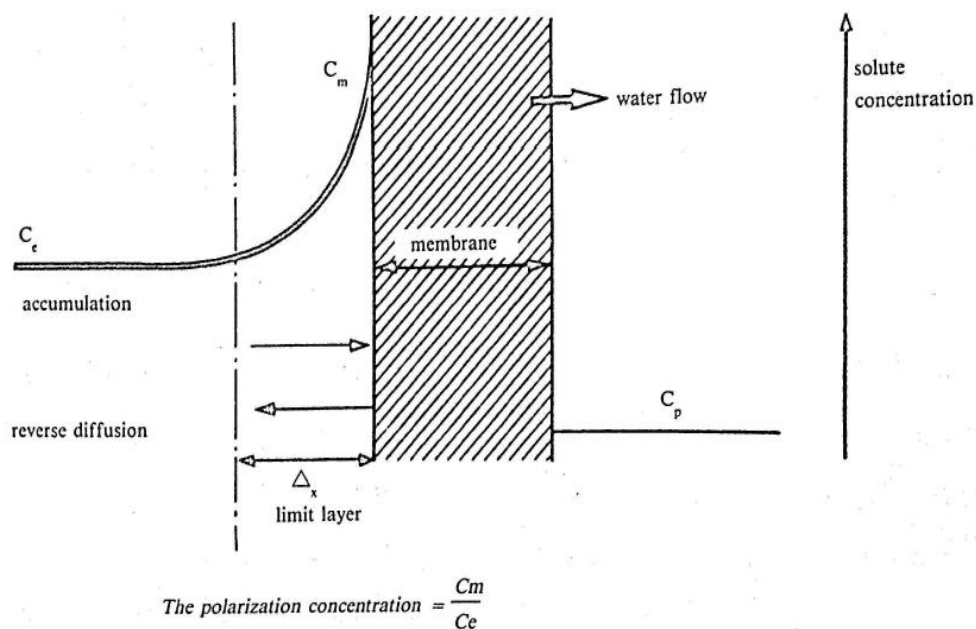


ภาพที่ 2.10 อิทธิพลของอุณหภูมิและพีเอชที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมมเบรน (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.5.5.3 การสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของสารละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ (Concentration polarization, CP)

ในระบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) ใดๆ รวมทั้งระบบรีเวิร์สออสโมซิสด้วย จะมีชั้นน้ำที่เรียกว่า บาวดารีเลเยอร์ (Boundary layer) อยู่ติดกับผิวหน้าของเมมเบรน ชั้นน้ำดังกล่าวจะแยกอยู่อย่างอิสระโดยไม่ผสมกับน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ภายนอก ความหนาของชั้นน้ำจะแปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำและความปั่นป่วน น้ำสะอาดจะซึมผ่านชั้นน้ำนี้และทะลุผ่านแผ่นเมมเบรนออกไปทำให้เกิดการสะสมของสารละลายต่างๆ ขึ้นในชั้นน้ำจนมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมสหลายเท่า ระดับการเกิดการสะสมของสารละลายนี้ อาจแสดงได้ด้วย

อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุดของสารละลายในชั้นน้ำที่ผิวหน้าของเมมเบรน ( $C_m$ ) และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส ( $C_e$ ) (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

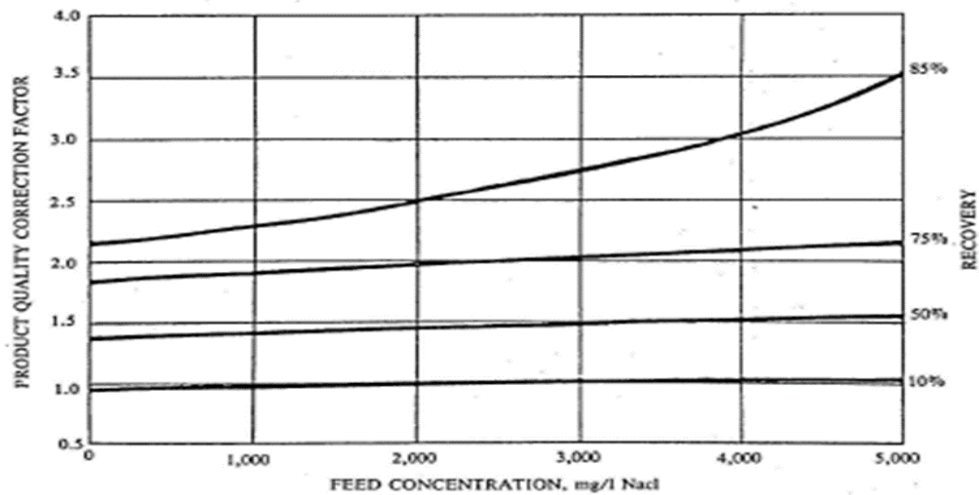


ภาพที่ 2.11 การเกิดการสะสมของสารละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ในระบบรีเวิร์สออสโมซิส (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

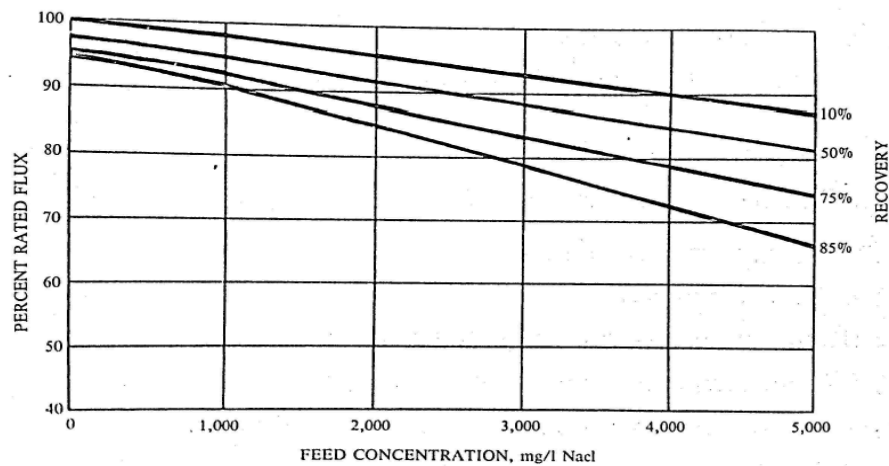
ผลเสียที่เกิดขึ้นกับระบบรีเวิร์สออสโมซิสจากการสะสมของสารละลายที่ไม่ผ่านเมมเบรน คือ

1. ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้น ทำให้อัตราการผลิตน้ำสะอาดลดลง
2. ทำให้มีการรั่วไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (Salt flux) เพิ่มขึ้นทำให้คุณภาพน้ำที่ได้ต่ำลง
3. อายุของเมมเบรนสั้นลง เสื่อมสภาพเร็วขึ้น
4. ทำให้มีการตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและหรือแคลเซียมซัลเฟต หรือสารประกอบอื่นๆ ทำให้เกิดตะกอนในโมดูลและเมมเบรน

#### 2.5.5.4 ความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส



ภาพที่ 2.12 แผนภูมิแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการกำจัดสารละลายที่ส่งผลต่อคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัด (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)



ภาพที่ 2.13 แผนภูมิแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิสและประสิทธิภาพการบำบัดที่มีผลต่อคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

ภาพที่ 2.12 และ ภาพที่ 2.13 แสดงถึงอิทธิพลของสารละลายที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบรีเวิร์สออสโมซิส เมื่อความเข้มข้นของน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการรั่วไหลของสารละลายทำให้การรั่วไหลเกิดมากขึ้นและแรงดันออสโมติกก็เพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.7 ความสามารถของระบบรีเวิร์สออสโมซิสในการกำจัดเกลือต่างๆ

ไอออน	อัตราการสกัด (%)	อัตราการรั่วไหล (%)	ความเข้มข้นสูงสุด (%)
ประจุบวก			
โซเดียม (Na <sup>+</sup> )	94-96	5	3-4
แคลเซียม (Ca <sup>2+</sup> )	96-98	3	*
แมกนีเซียม (Mg <sup>2+</sup> )	96-98	3	*
โพแทสเซียม (K <sup>+</sup> )	94-96	5	3-4
เหล็ก (Fe <sup>2+</sup> )	98-99	2	*
แมงกานีส (Mn <sup>2+</sup> )	98-99	2	*
อลูมิเนียม (Al <sup>3+</sup> )	99*	1	5-10
แอมโมเนียม (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	88-95	8	3-4
ทองแดง (Cu <sup>2+</sup> )	98-99	1	8-10
นิกเกิล (Ni <sup>2+</sup> )	98-99	1	10-12
สังกะสี (Zn <sup>2+</sup> )	98-99	1	10-12
สตรอนเชียม (Sr <sup>2+</sup> )	96-99	3	-
ความกระด้าง (Ca and Mg)	96-98	3	*
แคดเมียม (Cd <sup>2+</sup> )	96-98	3	8-10
เงิน (Ag <sup>+</sup> )	94-96	5	*
ปรอท (Hg <sup>2+</sup> )	96-98	3	-
ประจุลบ			
คลอไรด์ (Cl <sup>-</sup> )	94-95	5	3-4
ไบคาร์บอเนต (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	95-96	4	5-8
ซัลเฟต (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	99*	1	8-12
ไนเตรต (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	93-96	6	3-4
ฟลูออไรด์ (F <sup>-</sup> )	94-96	5	3-4
ซิลิเกต (SiO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> )	95-97	4	-
ฟอสเฟต (PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	99*	1	10-14
โบรไมด์ (Br <sup>-</sup> )	94-96	5	3-4
โบเรท (B <sub>4</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	35-70**	-	-
โครเมต (CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	90-98	6	8-12
ไซยาไนด์ (CN <sup>-</sup> )	90-95**	-	4-12
ซัลเฟต (SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	98-99	1	8-12
ไฮโอซัลเฟต (S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	99*	1	10-14
เฟอร์โรไซยาไนด์ (Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup> )	99*	1	8-14

\* ควรใช้วิธีการกำจัดด้วยการตกตะกอนทางเคมี ส่วนไอออนอื่นๆ ควบคุมด้วยความเข้มข้นสูงสุด

\*\* ขึ้นกับค่าพีเอช

- ไม่มี

ที่มา (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2542)

ตารางที่ 2.8 ความสามารถของระบบรีเวิร์สออสโมซิสในการกำจัดสารอินทรีย์

	น้ำหนักโมเลกุล	อัตราการสกัดกั้น (%)	ความเข้มข้นสูงสุด (%)
ซูโครส	342	100	25
แลคโตส	360	100	25
โพรตีน	10000+	100	10 - 20
กลูโคส	198	99.9	25
ฟีนอล	94	*	-
อะซิติก	60	*	-
ฟอร์มัลดีไฮด์	30	*	-
สีย้อม	400-900	100	-
บีโอดี (BOD)		90 - 99	-
ซีโอดี (COD)		80 - 95	-
ยูเรีย	60	40 - 60	คล้ายคลึงกับเกลือ
แบคทีเรียและไวรัส	50000 - 500000	100	-
ไฟโรเจน	1000 - 5000	100	-

\* คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรนที่นำมาใช้  
ที่มา (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

ตารางที่ 2.7 และ ตารางที่ 2.8 แสดงประสิทธิภาพในการกรองสารละลายชนิดต่างๆ  
ที่เมมเบรนสามารถกรองได้

#### 2.5.6 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิส

การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสสามารถกระทำได้ทั้งแบบกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง  
(Continuous) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดีของการเดินระบบแบบกะเมื่อเปรียบเทียบกับเดินระบบแบบต่อเนื่อง

1. สามารถรองรับน้ำได้เมื่อคุณภาพเกิดการเปลี่ยนแปลง
2. สามารถทำความสะอาดได้ง่าย

3. คุณภาพของน้ำที่ผ่านการกรองแล้วสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการนำน้ำที่ผ่านการกรองแล้วมากรองอีกครั้งหนึ่ง

4. คุณภาพของน้ำที่ผ่านการกรองแล้วสามารถควบคุมที่ทางออกได้

5. มีจำนวนหน่วยการบำบัดน้อย

6. ลงทุนต่ำ

7. สามารถขยายได้ง่าย

ข้อเสียของการเดินระบบแบบกะเมื่อเปรียบเทียบกับ การเดินระบบแบบต่อเนื่อง

1. ได้น้ำที่ผ่านการบำบัดไม่ต่อเนื่อง

2. ได้คุณภาพน้ำไม่คงที่

3. ต้องการพลังงานมาก

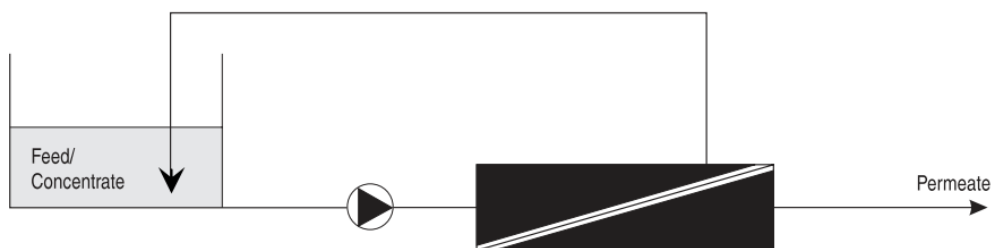
4. ต้องการเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่

5. ต้นทุนการเดินระบบสูง

การเดินระบบส่วนใหญ่มักเป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่องเพราะได้ปริมาณและคุณภาพของน้ำคงที่



ภาพที่ 2.14 การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Dow Chemical Company, 2012)



ภาพที่ 2.15 การเดินระบบแบบกะ (Dow Chemical Company, 2012)

### 2.5.7 การออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ในการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณความสามารถที่ต้องการของเมมเบรนหรือก็คือการประมาณจำนวนเมมเบรนที่ต้องการใช้งานให้เหมาะสมกับสมบัติของน้ำและอัตราการบำบัด ซึ่งการประมาณนี้จะทำให้ทราบถึงต้นทุนที่ต้องใช้ (Altaee, 2012) ในปัจจุบันนี้มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถเชื่อถือได้ในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้ได้รับการพัฒนาโดยผู้ผลิตเมมเบรนและมีการใช้งานกันเป็นที่แพร่หลาย เช่น โปรแกรม ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) หรือ Integrated Membrane Solutions (IMS) โปรแกรม ROSA (Dow Chemical Company, 2013a) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาโดยบริษัท ดาวเคมีคอล จำกัด (Dow Chemical Company) มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส หรือนาโนฟิลเทรชัน โดยการป้อนค่าดัชนีชี้วัดต่างๆ ของน้ำเข้าสู่โปรแกรม ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณอัตราส่วนขององค์ประกอบต่างๆ ในน้ำที่เป็นไปได้และประมาณจำนวนเมมเบรน ความสามารถที่รองรับได้ของเมมเบรน รวมถึงข้อแนะนำอื่นๆ ในการเดินระบบออกมา

#### 2.5.7.1 อัตราเร็วของน้ำที่ซึมผ่าน (Water flux)

อัตราเร็วของน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรน ซึ่งเท่ากับอัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรน เช่น มล./ตร.ม.-วินาที เป็นต้น ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3 (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2542)

$$F_w = A (\Delta P - \Delta \pi) \quad (3)$$

$F_w$  = Water flux หน่วย ลบ.ม./ตร.ม./วัน

$A$  = สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผ่านเมมเบรน หน่วย ลบ.ม./ตร.ม./วัน/บาร์



$\Delta P$  = ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน หน่วย บาร์

$\Delta \pi$  = ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน หน่วย บาร์

จากสูตรจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นจะได้อัตราเร็วของน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรนมากขึ้น

### 2.5.7.2 การรั่วไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (Salt flux)

สำหรับในสภาวะอุดมคติ เมมเบรนต้องไม่ยอมให้สารละลายไหลซึมผ่านได้ แต่ในความเป็นจริงเมมเบรนไม่สามารถทำได้จึงยังคงมีสารละลายที่เล็ดลอดออกไปได้ ในระบบที่มีการรั่วไหลของสารละลายสูงน้ำที่ผ่านการบำบัดจึงมีคุณภาพต่ำ การรั่วไหลของสารละลายนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส ไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงดัน อัตราการรั่วไหลของสารละลาย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2542)

$$F_S = B(C_O - C_P) \quad (4)$$

$F_S$  = Salt flux หน่วย กรัม/ตร.ม./วัน

$B$  = สัมประสิทธิ์การไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน หน่วย ม./วัน

$$= (1 - R_j)F_W / R_j \text{ (Altaee, 2012)}$$

$C_O$  = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส หน่วย กรัม/มล.

$C_P$  = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำที่ผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิส หน่วย กรัม/มล.

ในน้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงจะมีการรั่วไหลของสารละลายมาก ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันเพื่อให้ได้น้ำสะอาดมากขึ้นเพื่อมาเจือจางสารละลายที่รั่วไหล

### 2.5.7.3 ประสิทธิภาพการสกัดกั้น (Rejection factor) หรือร้อยละการสกัดกั้น

เมมเบรนที่ดีต้องมีประสิทธิภาพการสกัดกั้นสูงๆ ในสภาวะอุดมคติเมมเบรนต้องมีประสิทธิภาพการสกัดกั้นสารละลายเท่ากับ 1 หรือร้อยละ 100 โดยประสิทธิภาพการสกัดกั้น สามารถหาได้จากสมการที่ 5 (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2542)

$$R_j = 100(C_O - C_P) / C_O \\ = 100(1 - C_P / C_O)$$

แต่

$$C_P = F_S / F_W$$

ดังนั้น

$$R_j = 100(1 - F_S / C_O F_W) \quad (5)$$

#### 2.5.7.4 ประสิทธิภาพการกรอง (Recovery factor) หรือ ร้อยละการบำบัด

อัตราส่วนระหว่างปริมาตรน้ำที่กรองได้ต่อปริมาตรน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส ร้อยละการบำบัด สามารถหาได้จากสมการที่ 6 (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

$$R = 100 Q_p / Q_o \quad (6)$$

$Q_p$  = อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ผ่านการกรอง

$Q_o$  = อัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ปกติประสิทธิภาพการกรองอยู่ที่ประมาณร้อยละ 50 -70 เพราะต้องมีการระบายน้ำเข้มข้นทิ้งเพื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่สะสมอยู่ในระบบรีเวิร์สออสโมซิส แต่อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบมักตั้งค่า R ไว้ที่ร้อยละ 90

#### 2.5.7.5 ความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส

เนื่องจากใน 1 ท่อของเมมเบรน (Vessel) จะบรรจุเมมเบรนที่มีลักษณะเป็นท่อน (Element) หลายๆ ท่อนบรรจุอยู่ภายใน ซึ่งตรงกลางของท่อจะเป็นท่อรับน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรนเข้ามาและเมื่อน้ำจะไหลผ่านท่อไปตลอดตามความยาวของท่อนเมมเบรน ซึ่งความเข้มข้นของน้ำก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นความเข้มข้นจึงไม่เท่ากัน ความเข้มข้นเฉลี่ยนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 (Altaee, 2012)

$$C_{fc} = (C_f / R) \ln (1 / 1 - R) \quad (7)$$

$C_{fc}$  = ความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส หน่วย มก./ล.

$C_f$  = ความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส หน่วย มก./ล.

#### 2.5.7.6 แรงดันลด (Pressure drop)

จากสาเหตุที่ว่าความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดความยาวของท่อเมมเบรนและแรงเสียดทาน (Friction) ทำให้แรงดันที่ไหลลดลงซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8 (Altaee, 2012)

$$P_{cd} = 0.01 n q^{1.7} \text{cave} \quad (8)$$

$P_{cd}$  = แรงดันลดทางฝั่งของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส หน่วย บาร์

$n$  = จำนวนท่อนเมมเบรนใน 1 ท่อ

$q_{cave}$  = อัตราการไหลฝั่งของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส หน่วย ลบ.ม./ชม. ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$= (Q_f + Q_c)/2$$

$Q_f$  = อัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส หน่วย ลบ.ม./ชม.

$Q_c$  = อัตราการไหลของน้ำที่มีความเข้มข้นสูง หน่วย ลบ.ม./ชม.

#### 2.5.7.7 ปัจจัยการเกิดการสะสมตัวของสารละลายที่ไม่ผ่านการกรอง

(Concentration polarization factor)

สามารถหาได้จากสมการที่ 9 (Altaee, 2012)

$$CP = (C_w - C_p)/(C_b - C_p) \quad (9)$$

$CP$  = Concentration polarization factor

$C_w$  = ความเข้มข้นของน้ำที่ผิวหน้าของเมมเบรน หน่วย มก./ล.

$C_b$  = ความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส มก./ล.

$C_p$  = ความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านเมมเบรน มก./ล.

แต่เมื่อเทียบกับ  $C_w$  และ  $C_b$  แล้ว  $C_p$  มีค่าน้อยมากดังนั้นจะได้ว่า

$$CP = C_w/C_b \quad (10)$$

หรือ

$$CP = C_p/(1-R_f) * C_b \quad (11)$$

แต่บริษัท Dow Chemical Company (2013) แนะนำให้ใช้สมการที่ 12

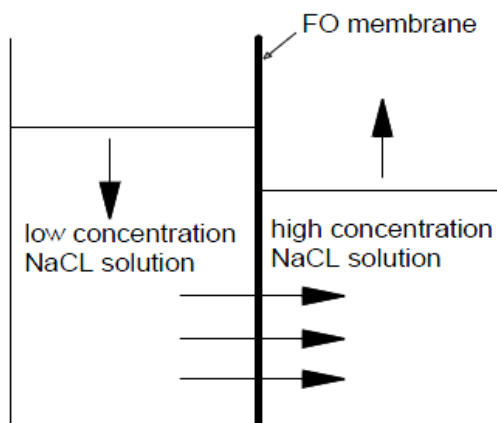
$$CP = \text{EXP}(0.7R) \quad (12)$$

### 2.5.8 การจัดเรียงเมมเบรนในระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ระบบกรองเมมเบรนมักสร้างเป็นชุดย่อยหลายๆ ชุดรวมกัน ชุดย่อยนี้เรียกว่า อาเรย์(Array) แต่ละอาเรย์ ประกอบด้วยหลายท่อแรงดันสูง อย่างที่ได้อธิบายไปแล้วว่าในท่อแรงดันสูงจะบรรจุโมดูล หรือ Element เป็นจำนวน 1 – 6 ท่อน ถ้าหากต้องการผลิตน้ำ 416.67 ลบ.ม./วัน ก็สร้างเป็นชุดเล็ก ขนาด 83.33 ลบ.ม./ชม. จำนวน 5 อาเรย์เป็นต้น ปกติชุดเมมเบรนขนาด 83.33 ลบ.ม./ชม. เป็นขนาดที่เหมาะสม แต่ก็อาจสร้างให้มีขนาดเล็กกว่านี้ได้ จำกัดแต่ละชุดไม่ให้มีขนาดใหญ่เกิน 416.67 ลบ.ม./ชม. หากต้องการรองรับให้ได้มากกว่านี้ก็ต้องใช้วิธีเพิ่มจำนวนขั้นตอน (Stage) ต่อแบบอนุกรมกัน โดยปกติเมมเบรนแต่ละชุดกรองจะกรองน้ำได้ไม่เกินร้อยละ 50 ถ้าต่อกัน 2 ขั้นตอนจะได้ประมาณร้อยละ 50 – 75 แต่ถ้าต่อกันเป็น 3 ขั้นตอนจะได้ร้อยละ 75 ขึ้นไป ในกรณีที่ใช้โมดูลแบบม้วน การเดินระบบ 2 ขั้นตอนจะผลิตน้ำกรองได้มากกว่าร้อยละ 75 โดยให้ท่อแรงดันสูง บรรจุโมดูล 7 ม้วนหรือเวียนน้ำความเข้มข้นสูงกลับมาบำบัดใหม่ และอัตราการกรองไม่ควรเกิน 0.6 ลบ.ม./ตร.ม./วัน ส่วนแบบเส้นใยกลวงไม่ควรกรองเกิน 0.04 ลบ.ม./ตร.ม./วัน (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และคณะ, 2554)

### 2.6 ฟอว์เวิร์ดออสโมซิส (Forward osmosis, FO)

ฟอว์เวิร์ดออสโมซิสหรือไดเรกทออสโมซิส (Direct osmosis) คือ ระบบที่อาศัยปรากฏการณ์ออสโมซิสเป็นแรงในการขับเคลื่อนระบบ เมมเบรนของฟอว์เวิร์ดออสโมซิสคือส่วนที่มีบทบาทสำคัญในระบบ ด้วยคุณสมบัติเช่นเดียวกับเมมเบรนของระบบรีเวิร์สออสโมซิสคือเป็นเยื่อเลือกผ่าน ดังนั้นจึงสามารถคัดกรองสารละลายได้แทบทุกชนิดไม่ให้น้ำผ่านไปกับน้ำได้ เมื่อน้ำได้แพร่ผ่านเมมเบรนไปแล้ว สารละลายฝั่งความเข้มข้นต่ำเรียกว่า ฟีดโซลูชัน (Feed solution) ซึ่งเป็นสารละลายที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จะมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นในขณะที่สารละลายฝั่งความเข้มข้นสูงเรียกว่า ดรอว์โซลูชัน (Draw solution) จะเจือจางลงจากน้ำที่แพร่ผ่านเข้ามา ปริมาณน้ำที่ขึ้นอยู่กับแรงดันออสโมติกก็จะลดลงเรื่อยๆ เพราะแรงดันออสโมติกที่เป็นแรงขับเคลื่อนระบบต้องอาศัยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ฝั่ง ของเมมเบรน โดยเฉพาะดรอว์โซลูชัน เมื่อผลต่างความเข้มข้นระหว่างสารละลายที่ป้อนเข้าสู่ระบบกับดรอว์โซลูชันมีมากขึ้น แรงดันออสโมติกก็ยิ่งมากขึ้นด้วย ดังภาพที่ 2.16 ซึ่งสุดท้ายแล้วความเข้มข้นของสารทั้ง 2 ฝั่งของเมมเบรนก็จะมีระดับที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน การแพร่ของน้ำก็จะหยุดลง (Junyou, 2011)



ภาพที่ 2.16 ระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสที่มีโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นดรอว์โซลูชัน (Junyou, 2011)

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบรีเวิร์สออสโมซิสแล้วพบว่ามีความแตกต่าง ดังนี้ (Cath และคณะ, 2006; Lay และคณะ, 2012)

1. ใช้เมมเบรนที่มีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่านเช่นเดียวกับระบบรีเวิร์สออสโมซิส
2. ไม่ต้องใช้แรงดันสูง
3. ใช้แรงดันออสโมติกเป็นแรงขับเคลื่อนจึงพึ่งพาแรงดันจากเครื่องสูบน้ำต่ำ
4. บำบัดน้ำได้คุณภาพสูงมีคุณภาพใกล้เคียงกันกับระบบรีเวิร์สออสโมซิส
5. มีความต้องการการใช้พลังงาน (ไฟฟ้า) ต่ำ
6. เกิดฟาวลิงจากการอุดตันน้อย

ดรอว์โซลูชัน คือส่วนสำคัญของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส เพราะเป็นองค์ประกอบที่สร้างแรงขับเคลื่อนให้กับระบบ เริ่มแรกมีการศึกษาคุณสมบัติของสารละลายหลากหลายชนิด เพื่อค้นหาดรอว์โซลูชันที่มีความเหมาะสมซึ่ง Junyou (2011) ได้ทำการรวบรวมเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่ทำการทดลองเกี่ยวข้องกับดรอว์โซลูชันชนิดต่างๆ ไว้ดังนี้

Batchelder (1965) ได้ทำการศึกษาการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide,  $\text{SO}_2$ ) และแอมโมเนีย (Ammonia,  $\text{NH}_3$ ) เป็นดรอว์โซลูชัน เมื่อผ่านการใช้งานแล้ว จึงทำการกำจัดสารละลาย

ทั้ง 2 ด้วยการให้ความร้อน สารละลายทั้ง 2 จะเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซระเหยออกไปเพื่อให้ได้น้ำสะอาด

Frank (1972) ได้ทำการทดลองโดยใช้อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulfate,  $Al_2(SO_4)_3$ ) เป็นดรรวโซลูชัน ซึ่งให้แรงดันออสโมติกสูง เมื่อภายหลังการใช้งานแล้วได้ทำการกำจัดอลูมิเนียมซัลเฟตด้วยวิธีการตกตะกอนโดยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide,  $Al(OH)_3$ ) และ แคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate,  $CaSO_4$ ) ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินจะกำจัดด้วยการเติมกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid,  $H_2SO_4$ ) หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide,  $CO_2$ ) เกิดเป็นตะกอนแคลเซียมซัลเฟตหรือแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate,  $CaCO_3$ ) และพีเอชของน้ำจะเท่ากับ 7 ดังนั้นจึงได้น้ำสะอาดภายหลังการตกตะกอนทางเคมีแล้ว

Kravath และ Davis (1975) ได้ทำการศึกษา โดยใช้กลูโคส (Glucose) เป็นดรรวโซลูชัน ดึงดูดนํ้าออกจากน้ำทะเล ที่เลือกกลูโคสเพราะเล็งเห็นว่ากลูโคสเป็นแหล่งพลังงานให้กับร่างกายได้ สามารถบริโภคได้ทันทีโดยไม่ต้องกำจัดออก ซึ่งยังคงเป็นวิธีที่ไม่มี การนำดรรวโซลูชันกลับมาใช้ใหม่ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตน้ำดื่ม แต่ควรใช้กับสถานะการณ์ฉุกเฉินจะเหมาะสมกว่า

Stache (1989) ได้ประดิษฐ์ฟอว์เวิร์ดออสโมซิสขึ้นโดยใช้ดรรวโซลูชันเป็น สารประกอบ อินทรีย์จากฟรุคโตส (Fructose) และไกลซีน (Glycine) ในการดึงดูดนํ้าจากน้ำทะเลโดยการนำถุงสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำที่ได้จะสามารถนำไปบริโภคได้ทันที และเช่นเดียวกับการทดลองของ Kravath และ Davis คือวิธีการนี้ควรใช้ในยามฉุกเฉินเท่านั้น

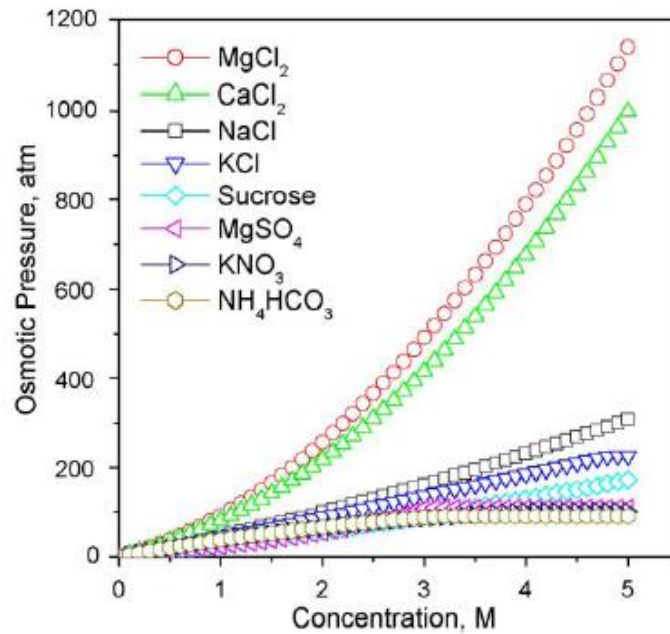
McGinnis (2002) ได้ทำการศึกษาระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสแบบ 2 ขั้นตอน (Two stages) โดยขั้นตอนแรกจะใช้โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate,  $KNO_3$ ) เป็นดรรวโซลูชันในการดึงดูดนํ้าจากฟิดโซลูชันที่เป็นน้ำทะเล ทั้งน้ำทะเลและโพแทสเซียมไนเตรตจะได้รับความร้อน เพราะโพแทสเซียมไนเตรตจะละลายน้ำได้ดีทำให้ได้แรงดันออสโมติกสูง หลังจากนั้นโพแทสเซียมไนเตรตจะถูกทำให้เย็นลง โพแทสเซียมไนเตรตก็จะตกตะกอนทำให้ความเข้มข้นของน้ำลดลงไปอีก และน้ำที่โพแทสเซียมไนเตรตตกตะกอนไปแล้วจะกลายเป็นฟิดโซลูชันเข้าสู่ระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสขั้นที่ 2 ที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นดรรวโซลูชัน และเช่นเดียวกับการทดลองของ Batchelder (1965) เมื่อให้ความร้อนกับดรรวโซลูชันภายหลังเมื่อใช้งานแล้ว ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก็จะกลายเป็นก๊าซ ทำให้ได้น้ำสะอาด วิธีการนี้ยังสามารถนำโพแทสเซียมไนเตรตกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วยโดยการให้ความร้อน แต่

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์อาจไม่เพียงพอกับความต้องการเพราะระเหยกลายเป็นก๊าซ วิธีการนี้ยังสิ้นเปลืองพลังงานเพราะต้องให้ความร้อนกับดรอวโซลูชัน

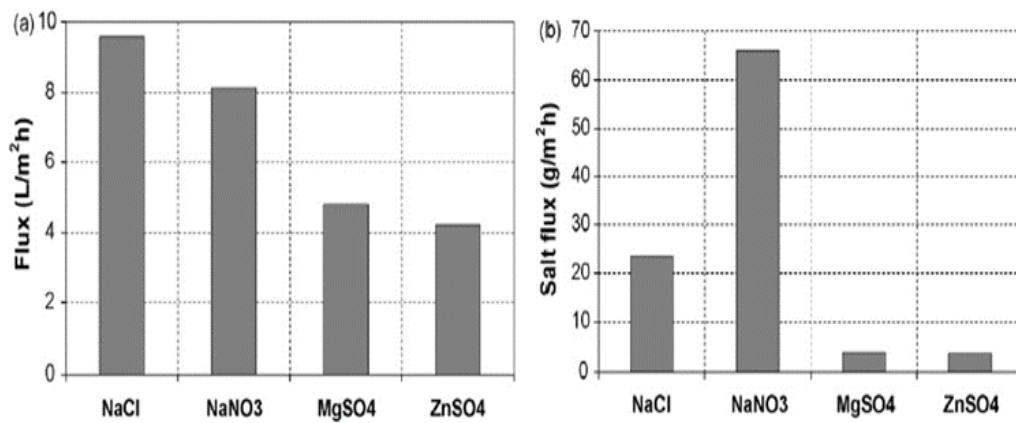
Ling และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการใช้อนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็ก (Magnetic nanoparticle) เป็นดรอวโซลูชันและคุณสมบัติทางเคมีที่ผิวหน้าและอัตราส่วนของสารละลายที่แตกตัวเป็นไอออนต่อปริมาตร 1 ลิตร (Osmolality) ซึ่งมีผลต่อแรงดันออสโมติก พบว่าอนุภาคแม่เหล็กที่มีกรดโพลีอะคริลิก (Polyacrylic acid) เกาะติดอยู่ มีความสามารถสร้างแรงดันออสโมติกและฟลักซ์ได้สูง และยังพบว่าความชอบหรือไม่ชอบน้ำและขนาดอนุภาคมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส นอกจากนี้อนุภาคแม่เหล็กยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการใช้สนามแม่เหล็กดึงออกจากดรอวโซลูชัน

Yen และคณะ (2010) ได้ทำการทดลองสังเคราะห์ดรอวโซลูชันจากสารประกอบ Methylimidazole -based 4 ชนิด พบว่า 2 ชนิดที่มีประจุมีความสามารถในการให้ ฟลักซ์สูงกว่า และเกิด อัตราการรั่วไหลของสารละลายต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารสังเคราะห์ที่มีประจุเหมือนกันพบว่า สารประกอบที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเกิด อัตราการรั่วไหลของสารละลายต่ำกว่า

ดังนั้นการเลือกดรอวโซลูชันให้มีประสิทธิภาพจึงต้องมีคุณสมบัติเฉพาะต่างๆดังนี้ ต้องละลายน้ำได้ง่าย ให้แรงดันออสโมติกที่สูง มีน้ำหนักมวลโมเลกุลน้อย ให้อัตราการกรองน้ำที่สูง และเกิดการรั่วไหลของสารละลายต่ำ พื้นฟูความเข้มข้นได้ง่ายเพื่อสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพราะแต่เดิมแล้วในงานวิจัยแรกเริ่ม ระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสในอุดมคติคือต้องไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย (Zero-liquid discharge, ZLD) และอาศัยแรงดันออสโมติกในการขับเคลื่อน และดรอวโซลูชันบางชนิดสามารถรับประจุได้ด้วย เช่น กลูโคส เป็นต้น (McCutcheon และคณะ, 2005)



ภาพที่ 2.17 แรงดันออสโมติกที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารละลายที่ 25 °ซ  
(Cath และคณะ, 2006)



ภาพที่ 2.18 แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการกรองน้ำและการรั่วไหลของสารละลายของดรอว์โซลูชัน  
แต่ละชนิด (Cornelissen และคณะ, 2008)



### 2.6.1 การฟื้นฟูความเข้มข้นของดรอว์โซลูชัน

ในการฟื้นฟูความเข้มข้นของดรอว์โซลูชันมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการนำดรอว์โซลูชันกลับมาใช้งานใหม่ ไม่สิ้นเปลืองและประหยัดต้นทุนจากการใช้ดรอว์โซลูชัน การฟื้นฟูความเข้มข้นสามารถกระทำได้หลายวิธีการด้วยกัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วได้แก่ การใช้การตกตะกอน การใช้ความร้อน เป็นต้น แต่ในปัจจุบันนิยมใช้ระบบรีเวิร์สออสโมซิสมาเป็นหน่วยฟื้นฟูความเข้มข้น (Cath และคณะ, (2006) และ Achilli และคณะ, (2009))

### 2.6.2 การใช้งานฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

ฟอร์เวิร์ดออสโมซิสมีการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์หลายประการดังนี้ การใช้งานเพื่อการผลิตน้ำสะอาดจากน้ำทะเล (Desalination) (Cath และคณะ, (2006) และ (Quintanilla และคณะ, 2011)) อุตสาหกรรมอาหาร เช่น ผลิตน้ำผลไม้ บำบัดน้ำชะกาก (Leachate) จากหลุมฝังกลบ บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ใช้งานร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Achilli และคณะ, (2009) และ Junyou, (2011)) แต่ส่วนใหญ่แล้วมีวัตถุประสงค์เพื่อการบำบัดน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

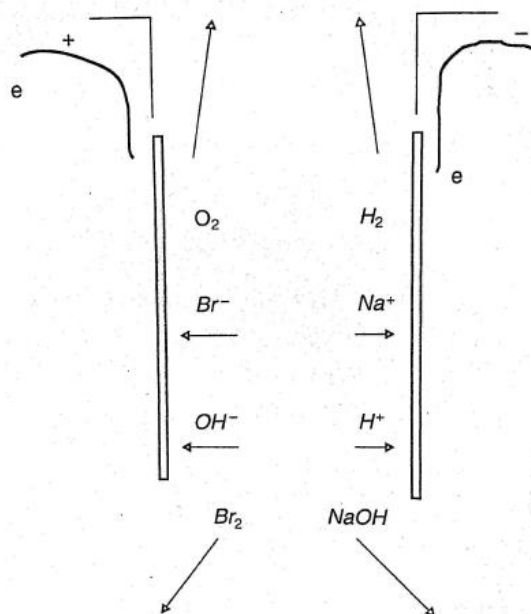
## 2.7 การบำบัดน้ำเพื่อการผลิตอื่นๆ

นอกจากน้ำที่ผ่านกระบวนการเมมเบรนแล้ว ยังมีน้ำที่มีคุณภาพที่สูงกว่านั้นนั่นคือ น้ำปราศจากไอออน เป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์มาก มักใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยาทางการแพทย์ ใช้เป็นตัวทำความสะอาดในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น แต่ในอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์นี้ใช้เป็นน้ำป้อนหม้อต้มน้ำ เนื่องจากกระบวนการบำบัดน้ำโดยกระบวนการเมมเบรนคุณภาพน้ำที่ได้ถึงจะเพียงพอที่จะสามารถใช้บริการได้ก็ตามแต่ไม่สามารถเทียบเคียงได้กับคุณภาพน้ำปราศจากไอออนได้ เนื่องจากยังคงมีแร่ธาตุหลงเหลืออยู่ในน้ำ ดังนั้นหากจะนำน้ำที่ได้ไปใช้งานต่อในหน่วยการผลิตที่ต้องการน้ำที่มีปริมาณไอออนต่ำหรือปราศจากไอออน จำเป็นต้องมีหน่วยกำจัดไอออนภายหลัง เช่น อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) (Dow Chemical Company, 2008) หรือเรซิน (Dow Chemical Company, 2012)

### 2.7.1 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis , ED)

เป็นกระบวนการในการคัดแยกไอออนในกระบวนการทางอุตสาหกรรม และน้ำปราศจากไอออน ซึ่งก็เป็นกระบวนการเมมเบรนชนิดหนึ่ง อิเล็กโทรไดอะไลซิสสามารถนำไปใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำดังนี้ เพื่อผลิตน้ำดื่มจากน้ำทะเล ใช้เป็นหน่วยทำน้ำอ่อน (Water softener) บำบัดความกระด้างจากน้ำใต้ดิน บำบัดน้ำที่มีของแข็งละลายน้ำที่มีความเข้มข้นที่ 40,000

มก./ล. ให้เหลือ 50 มก./ล. หรือต่ำกว่านั้นในเวลา 1.ชม. ที่อัตรา 0.038 ลบ.ม.ต่อชม. เป็นต้น องค์ประกอบมีด้วยกัน 4 ส่วนคือ ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วที่มีประจุไฟฟ้าที่ตรงข้ามกัน และ เมมเบรน 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติในการคัดเลือกประจุ ซึ่งเมมเบรนที่มีคุณสมบัติเป็นประจุบวกจะยินยอมให้ประจุบวกเท่านั้นผ่านไปได้ ส่วนประจุลบจะถูกกักไว้ไม่สามารถผ่านไปได้ โดยปกติเมมเบรนชนิดนี้จะผลิตจากกลุ่มของคาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) หรือกลุ่มของ สารประกอบกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid compounds) เรียกว่า แคตไอออนเมมเบรน (Cation membrane) เช่นเดียวกับกับเมมเบรนที่มีคุณสมบัติเป็นประจุลบ จะยินยอมให้ประจุลบเท่านั้นผ่านไปได้ ซึ่งเมมเบรนชนิดนี้ผลิตจากสไตรีน (Styrene) หรือ เอมีน (Amine) ที่มีแอมโมเนียมจับอยู่ เรียกว่า แอนไอออนเมมเบรน (Anion membrane) ตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะแบ่งเป็น 3 ช่อง ในช่องตรงกลางจะมีการบรรจุเรซิน 2 ชนิด ( Mixed-bed ) โดยปกติระบบของอิเล็กโทรไดอะไลซิสจะประกอบขึ้นจากชุดเซลล์ ตามภาพที่ 2.19 หลากๆ ชุดต่อขนานกัน (Parallel) ตรงกลางจะเป็นน้ำสะอาด (Processed water) และ ประจุต่างๆ จะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนออกไปยังขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านข้างที่มีประจุตรงข้ามเมื่อปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโทรดแต่ละขั้ว และจะระบายออกไป เมื่อผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งประจุต่างๆ ในน้ำที่ช่องตรงกลางจะถูกแยกออกจากน้ำไปจนเกือบหมดและสามารถดื่มได้ ในการเดินระบบ จะเดินระบบแบบกะโดยไม่ใช้แรงดันหรืออุณหภูมิสูงดังเช่นในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส ดังนั้นการบำรุงรักษาจึงต่ำและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่อย่างไรก็ตาม อิเล็กโทรไดอะไลซิสยังคงมีข้อจำกัดอยู่เช่นกัน คือ ไม่สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำที่ไม่มีประจุได้ เช่น สารอินทรีย์ แอลกอฮอล์ เป็นต้น ดังนั้นจึงควรมีหน่วยบำบัดเบื้องต้นเช่น การกรอง การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น เพื่อกำจัดหรือลดปริมาณความเข้มข้นลง



ภาพที่ 2.19 ส่วนประกอบเซลล์อิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Zito, 2011)

### 2.7.2 การออกแบบอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮดรอกไซด์

การออกแบบอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ หากให้วัสดุจำพวกพลาสติกทรงกระบอก (Cylinder) เป็นตัวห่อหุ้มเซลล์อิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ต้องทนต่อแรงดันได้ ดังนั้นหากเดินระบบที่แรงดันไม่สูงก็ไม่จำเป็นต้องใช้กระบอกที่มีขนาดใหญ่ เพราะขนาดของขนาดของกระบอกที่ใหญ่ขึ้นความหนาจะมาก ขึ้นด้วย การออกแบบจะเลือกขนาดของ กระบอกขนาดเล็กที่สุดและความหนาน้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน ซึ่งขนาดของกระบอกก็ไม่ได้แปรผันเป็นเส้นตรงกับราคาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงสถานที่ที่ทำการติดตั้งด้วย เพราะอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นใช้พื้นที่ในแนวตั้ง ขนาดที่เหมาะสมสำหรับครัวเรือนคือ 1.2 – 1.5 ม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 ม. ในการติดตั้งในแนวนอนก็สามารถทำได้แต่จะเกิดปัญหาด้านช่องภายใน ในด้านการใช้งานจริงระบบจะมีขนาด เฉพาะ โดยที่คุณภาพน้ำที่ต้องการคือน้ำที่ผ่านกระบวนการเมมเบรน (รีเวิร์สออสโมซิส) 1- 2 ขั้นตอน และแรงดันที่ใช้อยู่ที่ 2 - 4 บาร์ ซึ่งอัตราการไหลที่รองรับได้ต่อกระบอกเพียง 2 – 3.5 ลบ.ม. เท่านั้น การเพิ่มอัตราการกรองจึงกระทำโดยการเพิ่มจำนวนกระบอกต่อขนานกันไปเรื่อยๆ (Zito, 2011)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 ประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส

Koo และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาใช้ระบบรีเวิร์สออสโมซิสในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลโอเคมีในประเทศมาเลเซียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งมีคุณภาพน้ำทิ้ง ดังนี้ ค่าพีเอช 8 ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีหรือซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) น้อยกว่า 60 มก./ล. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหรือทีดีเอส (Total dissolved solids, TDS) น้อยกว่า 550 มก./ล. การนำไฟฟ้า (Conductivity) น้อยกว่า 780 ไมโครซีเมนต์/ซม. ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS) น้อยกว่า 40 มก./ล. ความกระด้าง (Hardness) น้อยกว่า 70 มก./ล. ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด  $1.8 \times 10^7$  โคโลนี/มล. และนำน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วกลับไปใช้เป็นน้ำเลี้ยงในหม้อต้มน้ำซึ่งคุณภาพน้ำดังนี้ ค่าพีเอช 7-10 ค่าซีโอดี น้อย 10 มก./ล. ของแข็งละลายน้ำ น้อยกว่า 100 มก./ล. ตรวจไม่พบ ค่าการนำไฟฟ้า ของแข็งแขวนลอย และปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด ความกระด้าง น้อยกว่า 2 มก./ล. ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ในการเดินระบบที่ประสิทธิภาพร้อยละ 80 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดความกระด้างของแข็งละลายน้ำ และซีโอดีลดลงร้อยละ 92.1 95.5 และ 87 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าค่าของแข็งละลายน้ำและค่าซีโอดีจะต่ำกว่าค่าคุณภาพหม้อต้มน้ำที่ต้องการก็ตาม แต่ค่าความกระด้างของน้ำสูงกว่าค่าที่ต้องการอยู่เพียงเล็กน้อย คือ 5.8 มก./ล.

### 2.8.2 แรงดันที่ใช้ในการบำบัดน้ำโบลวดาวนจากหอหล่อเย็นในระบบรีเวิร์สออสโมซิส

Kaliappan และคณะ (2005) ได้ทำการทดลองโดยการนำระบบรีเวิร์สออสโมซิสขนาดระดับห้องปฏิบัติการมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการโบลวดาวนของหอหล่อเย็นในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยในเมืองเซเนไน ประเทศอินเดีย โดยน้ำเสียมีคุณภาพดังตารางที่ 2.9 ซึ่งก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยระบบรีเวิร์สออสโมซิสจะมีการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ที่มีขนาดรูพรุน 5 และ 1 ไมครอน และใช้แรงดัน 2.75 3.10 3.44 3.79 และ 4.13 บาร์ พบว่ายิ่งให้แรงดันมากขึ้นก็จะสามารถกำจัดสารละลายต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น สามารถนำน้ำกลับมาได้ร้อยละ 56 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุดคือร้อยละ 89.2 ปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 250 มก./ล. ที่การเดินระบบแรงดัน 4.13 บาร์

ตารางที่ 2.9 คุณภาพน้ำโบลวดาวน

พารามิเตอร์	ปริมาณ
พีเอช	7
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)	3350
ความกระด้างทั้งหมด (มก./ล.)	351
ความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม (มก./ล.)	256
ปริมาณของแข็งละลายน้ำรวม (มก./ล.)	2500
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)	50
คลอไรด์ (มก./ล.)	713
โซเดียม (มก./ล.)	678
โพแทสเซียม (มก./ล.)	54
ซัลเฟต (มก./ล.)	233
เอสดีไอ	8.5

ที่มา (Kaliappan และคณะ, 2005)

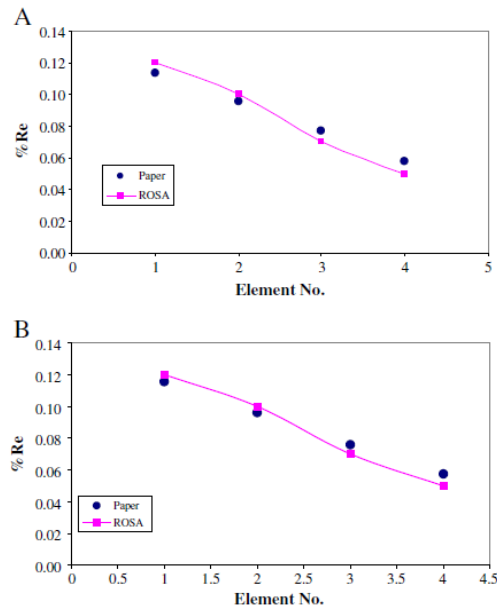
### 2.8.3 การบำบัดน้ำโบลวดาวนจากหողอเย้นด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส

บริษัท Dow chemical company (2008) ได้ทำการบำบัดน้ำโบลวดาวนจากหողอเย้นของโรงไฟฟ้าในเมืองปักกิ่งประเทศจีน ที่มีคุณภาพน้ำโบลวดาวนดังนี้ พีเอช 8.65 – 8.86 ของแข็งแขวนลอย 8.8 – 25.4 มก./ล. ค่าการนำไฟฟ้า 1,620 – 2,790 ไมโครซีเมนต์/ล. ซีไอดี 5.18 – 12.14 มก./ล. ปริมาณความกระด้างทั้งหมด 10.25 – 16.1 มิลลิโมล/ล. คลอไรด์ 182 - 336 มก./ล. ความเป็นด่างทั้งหมด 4.86 – 7.2 มิลลิโมล/ล. ความเป็นด่างที่เกิดจากไฮดรอกไซด์ 0.39 – 0.64 มิลลิโมล/ล. ซัลเฟต 186.33 – 407.88 มก./ล. ซิลิกา 11.8 – 33.4 มก./ล. ค่าต่างๆ เหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเทรชัน รีเวิร์สออสโมซิสและอิเล็กโตรไดอะไลซิส เพื่อนำน้ำกลับไปใช้ใหม่เป็นน้ำเลี้ยงในหม้อต้มน้ำ จะเห็นได้ว่าน้ำโบลวดาวนจะมีค่าความกระด้าง ความเป็นด่าง ซัลเฟต และซิลิกา สูงซึ่งเป็นปรกติของน้ำโบลวดาวน ซึ่งความสามารถในการเกิดตะกรันและความไม่แน่นอนของคุณภาพน้ำเป็นปัญหาสำคัญในการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ การบำบัดเริ่มต้นจากการกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการกรอง โดยจะสามารถลดค่าความขุ่นลงจาก 20 เอ็นทียู ลงเหลือ 4-8 เอ็นทียู หลังจากนั้นน้ำเสียจะผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเทรชัน ซึ่งจะช่วยลดค่าความขุ่นให้ต่ำกว่า 0.4 เอ็นทียู ได้ นอกจากจะช่วยลดความขุ่นแล้วเมมเบรนอัลตราฟิลเทรชันยังทำหน้าที่เป็นหน่วยบำบัดเบื้องต้นหรือระบบป้องกันระบบ

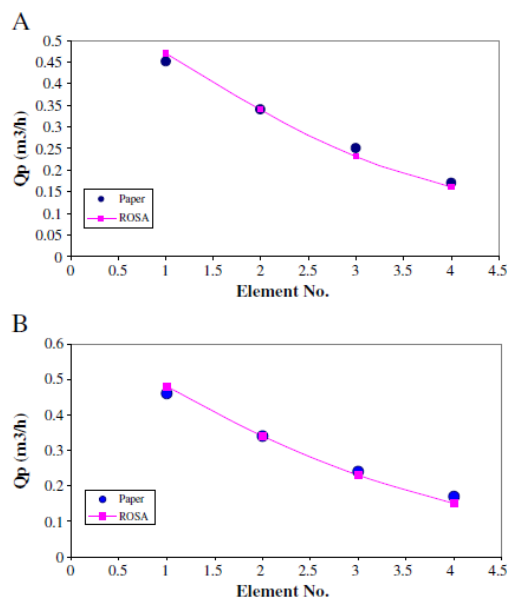
รีเวิร์สออสโมซิสสุดตันจากคอลลอยด์ ของแข็งแขวนลอย แบบที่เรียและสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ อีกด้วย นอกจากนั้นก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิสจะต้องมีการเติมสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ได้แก่ สารป้องกันการเกิดตะกรันและกรดก่อนเข้าระบบรีเวิร์สออสโมซิสขั้นที่ 1 และควบคุมการเติมด้วยเครื่องวัดค่าความต่างศักย์โออาร์พี (Oxygen reduction potential, ORP) แบบออนไลน์ เพื่อป้องกันการเกิดตะกรันของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ระบบรีเวิร์สออสโมซิสขั้นที่ 1 มีประสิทธิภาพในการนำน้ำกลับมาอยู่ที่ร้อยละ 75 ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายอยู่ที่ร้อยละ 97 - 98 ซึ่งของแข็งละลายน้ำและซิลิกาส่วนใหญ่จะถูกกำจัด ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์อยู่ที่ร้อยละ 70 - 80 (ต่ำกว่า 2 มก./ล.) น้ำที่ผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิสขั้นที่ 1 จะมีหน่วยไล่ก๊าซต่างๆ ออกจากน้ำ ที่ต้องมีการไล่ก๊าซออกจากน้ำ เนื่องจากเมมเบรนไม่สามารถกำจัดก๊าซต่างๆ ออกจากน้ำได้ ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่หลงเหลืออยู่ในน้ำจะทำให้เกิดกรดคาร์บอนิก ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น โดยค่าการนำไฟฟ้านี้เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด นอกจากนี้การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ยังสามารถกระทำได้โดยการปรับพีเอชของน้ำ โดยให้พีเอชมีค่าประมาณ 8.2 คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่สามารถกำจัดได้ด้วยเมมเบรน และก่อนที่น้ำจะเข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิสขั้นที่ 2 จะมีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เพื่อปรับพีเอชให้เป็น 9.5 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ซึ่งคุณภาพน้ำที่ผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิสขั้นที่ 2 ควรมีปริมาณซิลิกาต่ำกว่า 10 มก./ล. เมื่อน้ำผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิสขั้นที่ 2 ประสิทธิภาพการนำน้ำกลับมาจะอยู่ที่ร้อยละ 90 ประสิทธิภาพการกำจัดเกลืออยู่ที่ร้อยละ 71 - 93 น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรีเวิร์สออสโมซิสขั้นที่ 2 จะเข้าสู่ระบบอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) เพื่อกำจัดไอออนต่างๆ ในน้ำขั้นสุดท้ายเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำตามที่ต้องการของหม้อต้มน้ำ วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ 14 เมกะโอห์ม-ซม. และปริมาณซิลิกาได้น้อยกว่า 3 มก./ล.

#### 2.8.4 การออกแบบระบบบำบัดด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส

จากการศึกษาของ Altaee (2012) ซึ่งเปรียบเทียบการออกแบบรีเวิร์สออสโมซิสโดยใช้สมการหลักในการคำนวณเปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA ในการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส พบว่าให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกันมากมีความแม่นยำกว่าร้อยละ 95 (ภาพที่ 2.20 - ภาพที่ 2.21) จากการทดลองได้ใช้น้ำที่มีโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 35,000 มก./ล. และ 38,000 มก./ล. เป็นน้ำตัวแทนน้ำที่มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง



ภาพที่ 2.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของเมมเบรนแต่ละท่อนจากการคำนวณ ด้วยสมการกับใช้โปรแกรม ROSA ของเมมเบรนแต่ละท่อน A) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 35,000 มก./ล. B) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 38,000 มก./ล. (Altaee, 2012).



ภาพที่ 2.21 เปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านการบำบัดของเมมเบรนแต่ละท่อนจากการคำนวณด้วยสมการกับใช้โปรแกรม ROSA A) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 35,000 มก./ล. B) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 38,000 มก./ล. (Altaee, 2012)

2.8.5 กระบวนการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสโดยใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเป็นครอวโซลูชัน

McCutcheon และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษากระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสในการผลิตน้ำสะอาดจากน้ำทะเล โดยใช้น้ำที่ต้องการบำบัดเป็นไฮเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และใช้ครอวโซลูชันเป็น แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate) ที่ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ ให้ความร้อนทั้งสารละลายที่ป้อนเข้าสู่ระบบและครอวโซลูชันที่ 50 องศาเซลเซียส และทำการแยกครอวโซลูชันออกจากน้ำโดยการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารละลายแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต กลายเป็นก๊าซแอมโมเนียระเหยออกจากน้ำ และนำก๊าซแอมโมเนียกลับมาใช้เป็นครอวโซลูชันใหม่อีกครั้ง พบว่าให้ฟลักซ์ที่สูงและสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายโดยการให้ความร้อน และผลต่างของแรงดันออสโมติกที่เหมาะสมคืออยู่ระหว่าง 50 -150 บาร์

2.8.6 ปริมาณฟลักซ์ที่ได้จากการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

Chanukya และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษากระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสโดยใช้สารละลายป้อนเข้าสู่ระบบเป็นน้ำทะเล (ไฮเดียมคลอไรด์) ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเป็นครอวโซลูชันที่มีความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 1 – 3.6 โมลาร์ พบว่าหากให้ความร้อนกับระบบที่ 45 องศาเซลเซียส จาก 30 องศาเซลเซียส จะช่วยให้ได้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น จาก 0.05 ถึง 0.12 ลบ.ม./ตร.ม./วัน เป็น 0.12 ถึง 0.18 ลบ.ม./ตร.ม./วัน

2.8.7 ต้นทุนการใช้พลังงานและพื้นที่ที่เมมเบรนในการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเปรียบเทียบกับกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส

Shaffer และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำทะเลให้เป็นน้ำจืดเพื่อการชลประทานให้กับภาคเกษตรกรรม โดยใช้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสทำงานร่วมกับกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส 2 หน่วย ได้ผลตามตารางที่ 2.10 พบว่าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่เทียบเท่ากัน การใช้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสร่วมกับระบบรีเวิร์สออสโมซิสใช้พลังงานในการบำบัดน้ำ 1 ลบ.ม.ต่ำกว่า วัตจากค่าดัชนีการใช้พลังงานรวมต่อหน่วยการผลิต (Specific Energy Consumption, SEC) แต่ใช้พื้นที่เมมเบรนมากกว่าการใช้ระบบรีเวิร์สออสโมซิสเพียงอย่างเดียว 2 ขั้นตอน ในขณะที่เมื่อระบบรีเวิร์สออสโมซิสมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้นพื้นที่ของเมมเบรนที่ต้องการในการใช้งานเพื่อการบำบัดน้ำให้ได้คุณภาพตามที่ต้องการกลับลดลงและใช้น้อยกว่ากระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสหลายเท่า



**ตารางที่ 2.10** ผลการเปรียบเทียบค่าดัชนีความต้องการใช้พลังงานรวมในการบำบัดน้ำ 1 หน่วยกับพื้นที่เมมเบรนที่ต้องการระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำทะเลด้วยระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสทำงานร่วมกับระบบรีเวิร์สออสโมซิสและระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 2 หน่วย

ประสิทธิภาพรวมทั้งระบบ (%)	ระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสทำงานร่วมกับระบบรีเวิร์สออสโมซิส		ระบบรีเวิร์สออสโมซิส 2 หน่วย	
	พลังงานรวม (กิโลวัตต์-ชม./ลบ.ม.)	พื้นที่เมมเบรนทั้งหมด (ตร.ม.)	พลังงานรวม (กิโลวัตต์-ชม./ลบ.ม.)	พื้นที่เมมเบรนทั้งหมด (ตร.ม.)
10	3.03	339,000	3.39	125,000
25	2.40	656,000	2.88	108,000
50	2.93	972,000	3.79	74,000
70	4.49	1,009,000	6.43	43,000

ที่มา (Shaffer และคณะ, 2012)

#### 2.8.8 การออกแบบระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

Kim และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาการออกแบบและประเมินมูลค่าต้นทุนด้านต่างๆ ของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส โดยใช้ตรอวโซลูชันชนิดต่างๆ ดังนี้ แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เมทิลอะซิเตท (Methylacetate) เมทานอล (Methanol) เอทานอล (Ethanol) ไอโซบิวทาโนน (2-Butanone) และ ไอโซโพรพานอล (2-Propanol) ความเข้มข้นชนิดละ 1 – 4 โมล/ล. ในการบำบัดน้ำทะเลและใช้หอกลั่น (Distillation Column) ชนิดถาด (Tray) ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนแบบหนึ่ง ในการฟื้นฟูความเข้มข้นให้กับตรอวโซลูชัน ทั้งนี้เนื่องจากในปัจจุบันระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสยังไม่มีเกณฑ์มาตรฐานในการออกแบบใดๆ ที่เป็นที่ยอมรับ ซึ่งสมการต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 สมการต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิส

ต้นทุนและการออกแบบ	สมการ	หมายเหตุ
ฟลักซ์ ( $J_w$ )	$J_w = A(\pi_{ds.b} - \pi_{sw.b})$	A คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเมมเบรน $\pi_{ds.b}$ , $\pi_{sw.b}$ คือแรงดันออสโมติกของดราวยโซลูชัน และน้ำเสีย
ต้นทุนเมมเบรน		
1. ต้นทุนติดตั้ง	$C_{inv.M} = C_{ref.M} * \left(\frac{Q/J_w}{M_{a.ref}}\right)^{0.6}$	$C_{inv.M}$ ต้นทุนการติดตั้งระบบ (เงิน) $C_{ref.M}$ ต้นทุนการติดตั้งที่อ้างอิง (เงิน) $Q/J_w$ พื้นที่เมมเบรนที่ต้องใช้ (พื้นที่) $M_{a.ref}$ พื้นที่เมมเบรนที่ใช้อ้างอิง (พื้นที่) 0.6 Equipment exponent
2. ต้นทุนติดตั้งรายปี	$C_{ann.inv.M} = C_{inv.M}/L_M$	$C_{ann.inv.M}$ การลงทุนรายปี(เงิน/เวลา) $L_M$ อายุการใช้งาน(เวลา)
ต้นทุนหน่วยพื้นที่		
1. ออกแบบชุดกลั่น		
1.1 ความหนาต่อทรงกระบอก ( $t_v$ )	$t_v = f(P_d R_v H_v)$	$P_d$ แรงดัน $R_v$ รัศมีท่อ $H_v$ ความสูงท่อ
1.2 น้ำหนักต่อทรงกระบอก ( $W_v$ )	$W_v = \pi(D + t_v)(H_v 1.6R_v)(t_v + 0.3)\rho_v$	D สัมประสิทธิ์การแพร่ $\rho_v$ ความหนาแน่นของวัสดุผนัง
2. ต้นทุนติดตั้ง		
2.1 ต้นทุนต่อทรงกระบอก	$C_{DC.V} = MSE^{\alpha + \beta \ln(w_v) + \gamma \ln(w_v)^2}$	$\alpha, \beta, \gamma$ สัมประสิทธิ์ต้นทุนท่อ
2.2 ต้นทุนถาด	$C_{DC.T} = N_T F_{NT} F_{TT} F_{TM} C_{DC.TB}$	$N_T$ จำนวนถาด $F_{NT}$ สัมประสิทธิ์จำนวนถาด $F_{TT}$ สัมประสิทธิ์วัสดุผลิตถาด $F_{TM}$ สัมประสิทธิ์ชนิดของถาด $C_{DC.TB}$ ต้นทุนพื้นฐานของถาด
2.3 ต้นทุนติดตั้งรวม	$C_{inv.DC} = F_M C_{DC.V} + C_{DC.PL} + C_{DC.T}$	$F_M$ สัมประสิทธิ์วัสดุผลิตชุดกลั่น

ที่มา (Kim และคณะ, 2012)

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาใน ณ ห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีในการวิจัยดังนี้

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

1. ชุดทดสอบการกรองด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส
2. สายยาง
3. แผ่นเมมเบรนชนิดโพลีเอไมด์ TW30-1812-50
4. อ่างให้ความร้อน (water bath)
5. เครื่องสูบน้ำชนิดดันใบพัดด้วยระบบแม่เหล็ก (magnet gear pump)
6. เครื่องแก้วต่างๆ
7. วาล์วควบคุมอัตราการไหล
8. ชุดกลั่นสารละลาย (Reflux)
9. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)

##### 3.1.2 อุปกรณ์สำหรับวัด

1. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)
2. พีเอชมิเตอร์
3. เครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure gauge)
4. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
5. เครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductometer)
6. เครื่องมือวัดปริมาณแอมโมเนีย (Ion-selective electrode)

##### 3.1.3 สารเคมี

1. แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium Bicarbonate)
2. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)

### 3.2 ขั้นตอนการศึกษา

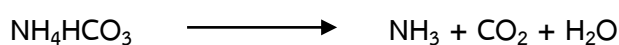
การวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการบริหารจัดการน้ำที่ร่วมกับการใช้เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ โดยน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองนี้คือน้ำเสียโบลว์ดาวน์จากหอหล่อเย็นและทำการประเมินและเปรียบเทียบศักยภาพประสิทธิภาพ ทางวิศวกรรมและต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส เปรียบเทียบกับกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส เพื่อนำเสนอวิธีการที่มีความเหมาะสมทั้งทางด้านวิศวกรรมและต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ การศึกษาแบ่งเป็น 5 ช่วงดังนี้

**การศึกษาช่วงที่ 1** ในขั้นตอนนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ขั้นตอนที่แรกจะเป็นการศึกษาระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของแหล่งน้ำเสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยพิจารณาอัตราการใช้น้ำและปล่อยน้ำเสีย คุณภาพของน้ำที่ใช้และน้ำทิ้งของระบบ ซึ่งจากงานวิจัยของ สุจิตรา พรรัตนพิทักษ์ (2553) พบว่าหอหล่อเย็นมีการใช้น้ำในปริมาณมาก และน้ำทิ้งมีค่าของแข็งละลายน้ำสูง และขั้นตอนที่ 2 คือ การทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์คุณภาพและใช้ในการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส และระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสต่อไป

**การศึกษาช่วงที่ 2** ศึกษาการออกแบบและการทำงานของระบบรีเวิร์สออสโมซิส โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส ซึ่งจากการทดลองของ Altaee (2012) ได้พิสูจน์แล้วว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA สามารถใช้แทนการออกแบบโดยใช้สมการปกติได้ ให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกัน โดยใช้พารามิเตอร์คุณภาพน้ำต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาในช่วงที่ 1 มาทำการออกแบบ

**การศึกษาช่วงที่ 3** ศึกษาการทำงานของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสโดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Lab scale) การทดลองในส่วนนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสในการบำบัดน้ำ ผลของความเข้มข้น (Concentration Gradient,  $\Delta C$ ) ของดรอว์โซลูชัน (Draw Solution) ที่มีอิทธิพลต่อฟลักซ์ โดยจัดทำชุดการทดลองขึ้น ในการดำเนินการทดลองใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นที่ให้แรงดันออสโมติกเทียบเท่ากับน้ำเสียจากหอหล่อเย็นที่วิเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 1 ใช้สารละลายแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต เป็นดรอว์โซลูชันตามการทดลองของ McCutcheon และคณะ (2005) และใช้เมมเบรนในการทดลองเป็นเมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุโพลีเอไมด์ชนิด TFC (Thinfilim Composite) ขนาดพื้นที่การกรอง 60 ตร.ซม.

**การศึกษาช่วงที่ 4** ศึกษากระบวนการแยกตรอวโซลูชันออกจากสารละลายและนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการศึกษาระบวนการแยกตรอวโซลูชันออกจากสารละลายหลังจากที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสแล้ว เพื่อให้ได้น้ำสะอาดและนำตรอวโซลูชันกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง เนื่องจากใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเป็นตรอวโซลูชัน เมื่อแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตสัมผัสกับน้ำจะแตกตัวให้อิออนของแอมโมเนียม และไบคาร์บอเนต และแอมโมเนียมกับไบคาร์บอเนตจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อได้รับความร้อน ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี



การทดลองในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นส่วนของกระบวนการแยกตรอวโซลูชันและน้ำออกจากกัน และการนำตรอวโซลูชันกลับมาใช้ใหม่

**การศึกษาช่วงที่ 5** เปรียบเทียบและประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมของระบบรีเวิร์สออสโมซิสและฟอร์เวิร์ดออสโมซิสในการนำไปใช้งานและประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งนำพารามิเตอร์ที่ได้จากการประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมในด้านต่างๆ เช่น ความต้องการพื้นที่เมมเบรน สารเคมีที่ใช้ในการเดินระบบ แรงดัน พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น และนำไปประเมินในส่วนของความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อประเมินต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด โดยต้นทุนที่จะนำมาใช้ในการประเมินมาจาก 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้ 1. ต้นทุนการติดตั้ง 2. ต้นทุนการเดินระบบ และ 3. ต้นทุนการบำรุงรักษา เนื่องจากระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสยังไม่ได้เป็นที่แพร่หลาย การประเมินต้นทุนติดตั้งจึงทำได้ยาก ถ้าหากหาต้นทุนในส่วนของเมมเบรนไม่ได้ จำเป็นต้องอ้างอิงมูลค่าต้นทุนในส่วนของเมมเบรนจากแหล่งอื่นๆ ตามสมการของ Kim และคณะ (2012)

### 3.2.1 การวัดองค์ประกอบของน้ำเสียไบโวลต์จากหอหล่อเย็น

น้ำทิ้งจากหน่วยการผลิตที่นำมาพิจารณาคือหอหล่อเย็น เนื่องจากหอหล่อเย็นมีการใช้น้ำในปริมาณมาก มีค่าของแข็งละลายน้ำสูง (สุจิตรา พรรัตนพิทักษ์, 2553) พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน (APHA, 2005) เป็นไปตาม ตารางที่ 3.1 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ซ้ำพารามิเตอร์ละ 3 ครั้ง โดยน้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์น้ำประปาและน้ำหล่อเย็นจากระบบหล่อเย็นของโรงงานระยองโอเลฟินส์ โดยน้ำตัวอย่างที่ได้รับมานำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป วิธีการวิเคราะห์ที่ไอออนบวกในการทดลองนี้ใช้เครื่องมือ Inductively coupled plasma (ICP) ยี่ห้อ Jorbin Yvon Horiba รุ่น Ultima 2 ICP-OES ไอออนลบใช้เครื่องมือ Ion Chromatography (IC) ยี่ห้อ Dionex รุ่น ICS -2500 25AD Absorbance

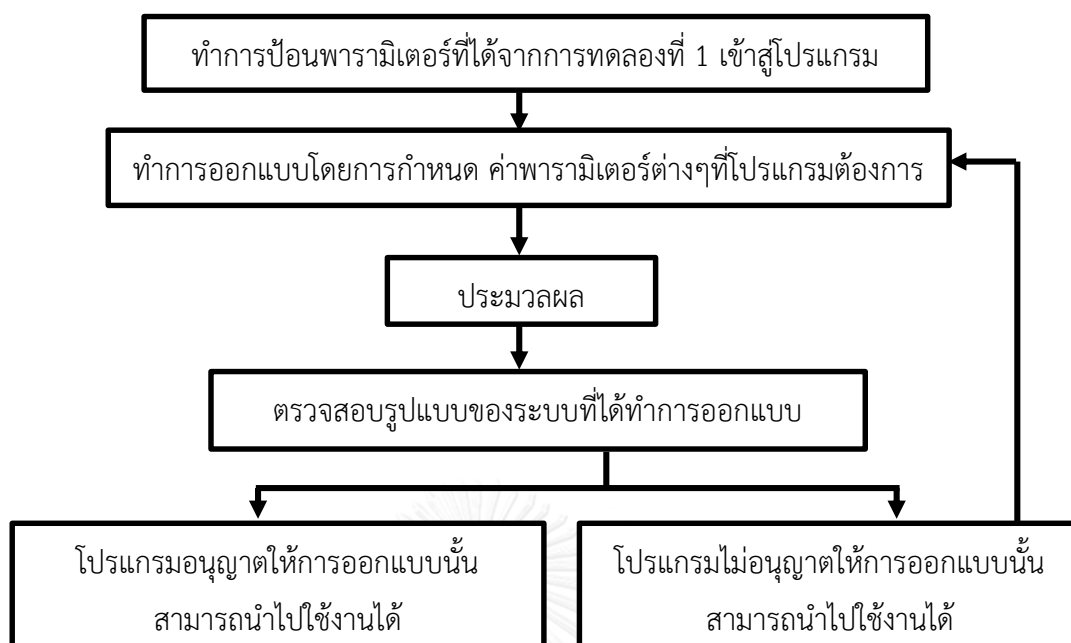
Detector พีเอชใช้เครื่องวัดพีเอชแบบพกพายี่ห้อ Metler Toledo รุ่น Seveneasy ค่าการนำไฟฟ้าใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าแบบพกพายี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Orion star series ส่วนการวิเคราะห์ค่าของแข็งละลายน้ำและไบคาร์บอเนต ใช้วิธีตามทีระบุไว้ใน Standard method for the examination of water and wastewater (APHA, 2005)

### ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ไอออนบวก -โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม	เครื่องมือวิเคราะห์ประจุบวก (Inductively coupled plasma, ICP)
ไอออนลบ - คลอไรด์ ซัลเฟต ไนเตรต	เครื่องมือวิเคราะห์ประจุลบ (Ion Chromatography, IC)
พีเอช	พีเอชมิเตอร์
ของแข็งละลายน้ำ	ระเหยที่ 180 °ซ
ไบคาร์บอเนต	ไตเตรท

#### 3.2.2 การออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA

ในการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA เพื่อหาพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ปริมาณฟลักซ์ ปริมาณของแข็งละลายน้ำ อัตราการไหล จำนวนและชนิดของเมมเบรน และแรงดันที่ต้องการ พลังงานที่ใช้ในการบำบัดน้ำ 1 หน่วย ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 80 ในการใช้งานเพื่อการบำบัดน้ำจากหน่วยการผลิตต่างๆ ที่จำแนกและพารามิเตอร์ต่างๆ ตามการศึกษาช่วงที่ 1 แผนผังการทดลองของการทดลองที่ 2 เป็นไปตามภาพที่ 3.1



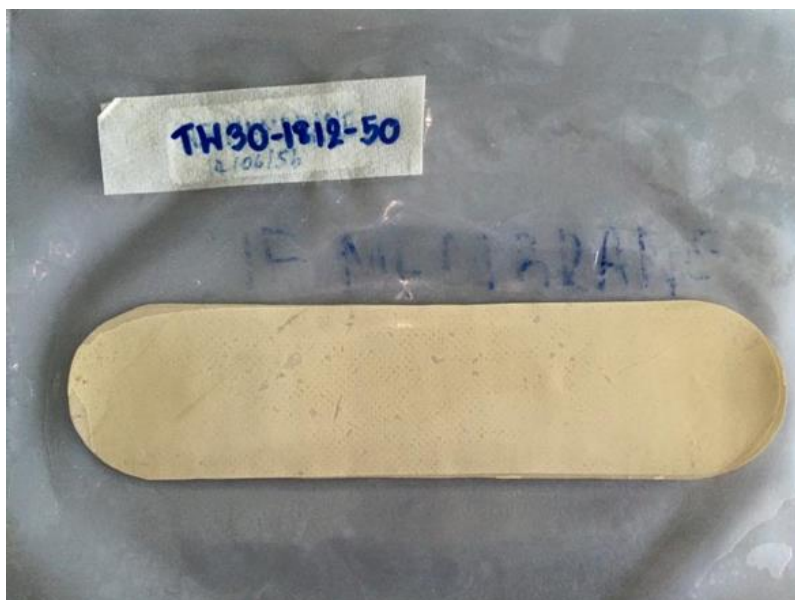
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม ROSA

1. ทำการติดตั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA
2. ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วัดได้จากการทดลองที่ 1
3. กำหนดค่าต่างๆที่ใช้ในการออกแบบดังนี้ อัตราการไหล ประสิทธิภาพในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ จำนวนขั้นตอนการบำบัด ค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Flow factor) ชนิดของเมมเบรน จำนวนเมมเบรน ขนาดท่อบรรจุเมมเบรน ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำ อัตราการเวียนน้ำ
4. ตรวจสอบผลการออกแบบ หาสภาวะการออกแบบที่โปรแกรมอนุญาตให้สามารถนำไปใช้งานได้
5. หากโปรแกรมไม่อนุญาตรูปแบบการออกแบบให้กลับไปปฏิบัติตามข้อที่ 3 อีกครั้ง แต่ให้ปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ดังนี้ จำนวนเมมเบรน ขนาดท่อบรรจุเมมเบรน อัตราการเวียนน้ำ
6. บันทึกข้อมูลการออกแบบที่โปรแกรมอนุญาตให้สามารถนำไปใช้งานได้

### 3.2.3 ศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

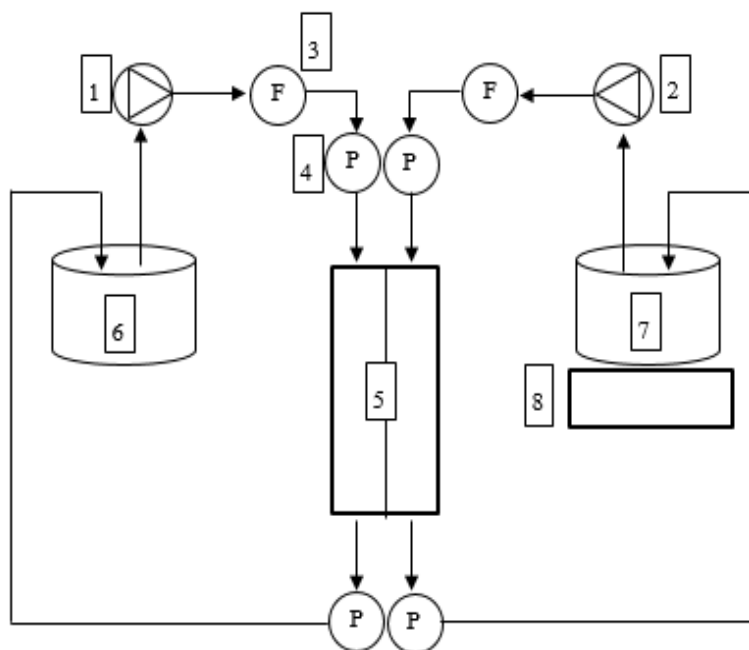
1. ตัดเมมเบรนชนิด TW30-1812-50 ดังภาพที่ 3.2 ติดตั้งเข้ากับช่องบรรจุเมมเบรนในอุปกรณ์ในการทดลองการศึกษากระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสตามภาพที่ 3.3

2. เตรียมสารละลายแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 และ 0.5 โมลาร์ (3,950 7,900 15,800 23,700 31,600 และ 39,500 มก./ล.) ปริมาตร 1 ลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร และนำไปวางบนเครื่องชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น
3. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ให้แรงดันออสโมติกเทียบเท่ากับน้ำเสียจากหอหล่อเย็นที่ได้จากการทดลองที่ 1 ปริมาตร 1 ลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร
4. ปรับแรงดันของทั้งด้านพืดและดรอวโซลูชันให้เท่ากับ 1 บาร์ และอัตราการไหลที่ 10 ล./นาที
5. เก็บข้อมูลน้ำหนักของสารละลายที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3.2 เมมเบรนรุ่น TW30-1812-50





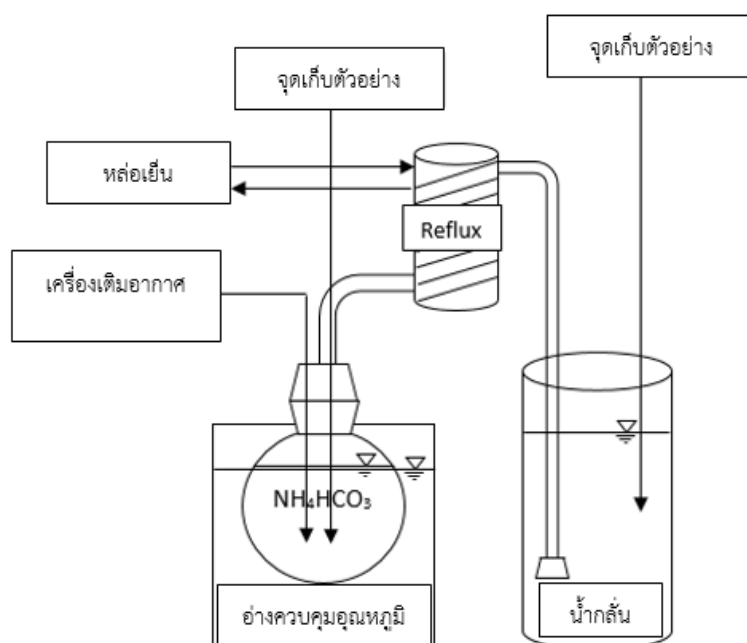
ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ในการทดลองการศึกษากระบวนการฟอว์เวิร์ดออสโมซิส

1. เครื่องสูบน้ำชนิดดันใบพัดด้วยระบบแม่เหล็ก (Magnetic gear pump)
2. เครื่องสูบน้ำชนิดดันใบพัดด้วยระบบแม่เหล็ก (Magnetic gear pump)
3. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล
4. อุปกรณ์วัดแรงดัน
5. แผ่นเมมเบรน
6. ถังเก็บพีดีโซลูชัน
7. ถังเก็บทรอวโซลูชัน
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก

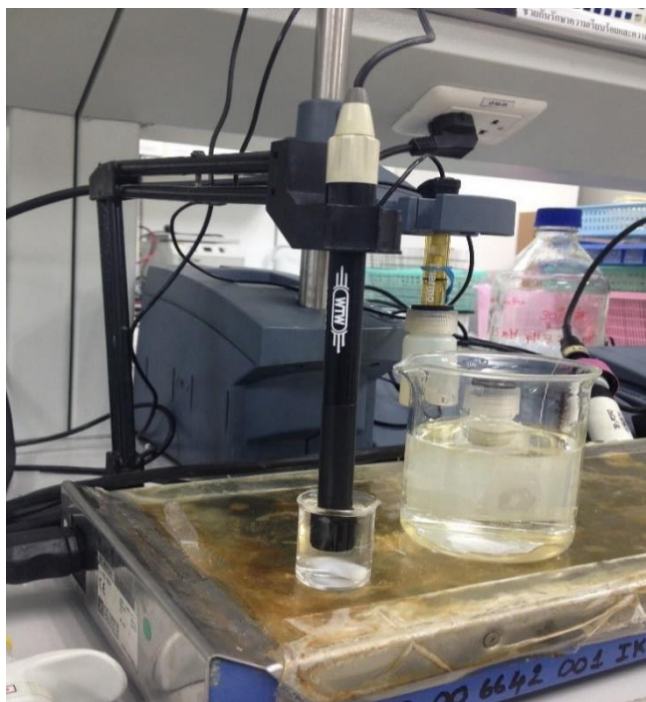
3.2.4 การศึกษาความเป็นไปได้ของการแยกทรอวโซลูชันออกจากสารละลายและนำกลับมาใช้ใหม่

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการแยกทรอวโซลูชันออกจากน้ำโดยใช้ความร้อนและประสิทธิภาพการนำทรอวโซลูชันที่แยกได้กลับมาใช้งานอีกครั้ง

1. เตรียมอุปกรณ์การศึกษาประสิทธิภาพการคัดแยกดรอโซลูชันและนำกลับมาใช้ใหม่ดังภาพที่ 3.4
2. เตรียมสารละลายแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 และ 0.5 โมลาร์ (3,950 7,900 15,800 23,700 31,600 และ 39,500 มก./ล.) และสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 100 300 500 700 และ 900 มก./ล.
3. ให้ความร้อนด้วยอ่างให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับการเป่าอากาศ
4. เตรียมน้ำกลั่นปริมาตร 1 ล. จุ่มสายยางรวมก๊าซลงในน้ำกลั่น
5. ให้ความร้อนด้วยอ่างให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับการเป่าอากาศ
6. เก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชม. โดยเก็บตัวอย่างทั้งสารละลายและน้ำกลั่น
7. ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 100 300 500 700 และ 900 มก./ล. ด้วยโพรวัดปริมาณแอมโมเนียม (Ion-selective electrode ยี่ห้อ WTW รุ่น NH 500/2 และเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า รุ่น Inolab 740) (ภาพที่ 3.5)
8. บันทึกค่าการนำไฟฟ้าที่ได้แล้วนำไปพล็อตกราฟ เพื่อแปลงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายให้กลับมาอยู่ในรูปของความเข้มข้น
9. บันทึกผลการทดลองที่คำนวณได้แล้วนำไปเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดและประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่



ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ในการทดลองการแยกดรอโซลูชันออกจากสารละลายและนำกลับมาใช้ใหม่ของกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส



ภาพที่ 3.5 การวัดปริมาณแอมโมเนีย

### 3.2.5 การประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

เป็นการประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ โดยการนำเอาผลการออกแบบการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

1. นำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ 2 3 และ 4 มาเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุขนาด 1.6 ม. พลังงานและสารเคมีที่ใช้ในการเดินระบบ ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเทียบเท่ากันของกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

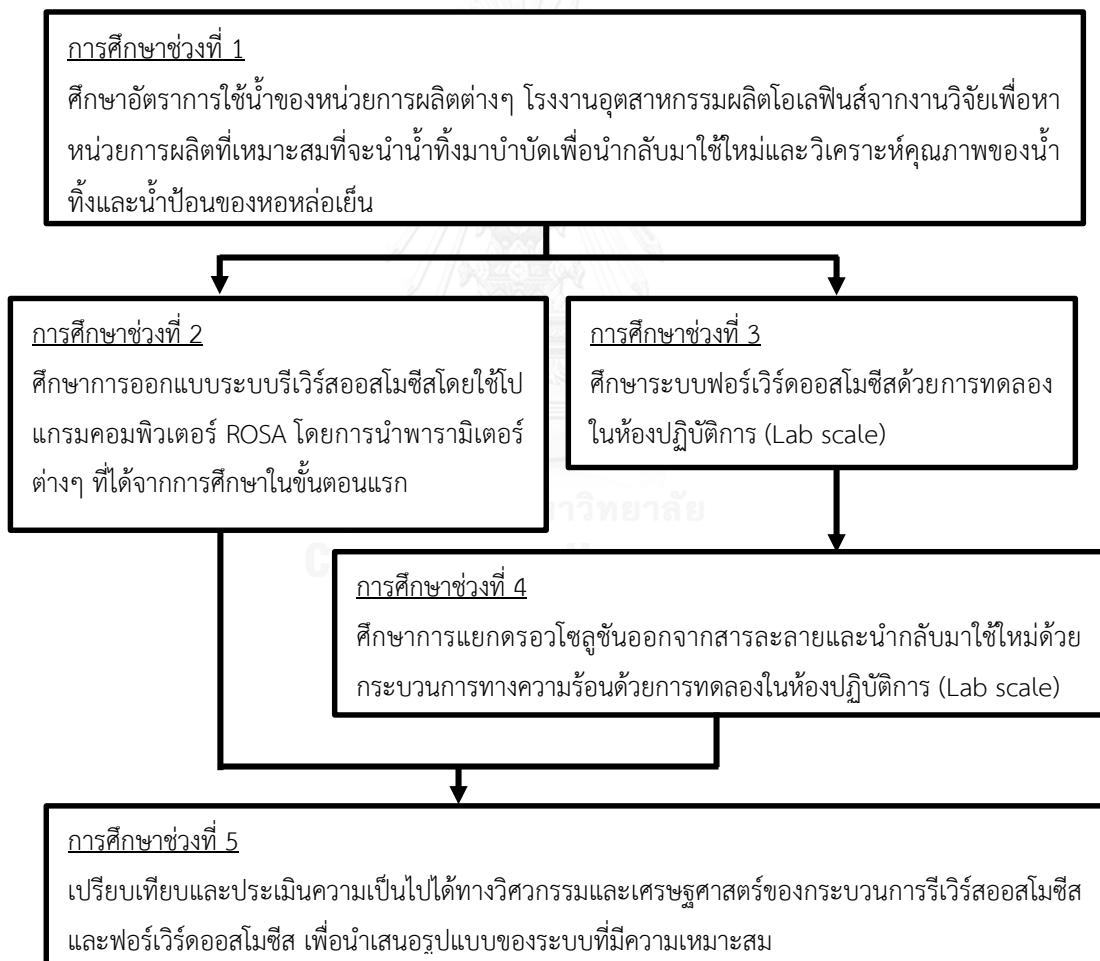
2. เปรียบเทียบถึงความเป็นไปได้ของการนำไปใช้งาน

3. ประเมินต้นทุนส่วนต่างๆ ของระบบ ได้แก่ ต้นทุนการติดตั้ง ต้นทุนการเดินระบบและ ต้นทุนการบำรุงรักษา และประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำ 1 หน่วย โดยต้นทุนการติดตั้งในส่วนของ เมมเบรนของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส หากไม่สามารถพิจารณาต้นทุนได้ จะคำนวณโดยใช้สมการของ Kim และคณะ (2012)

$$C_{inv.M} = C_{ref.M} * \left(\frac{Q/J_w}{M_{a.ref}}\right)^{0.6}$$

- $C_{inv.M}$  = ต้นทุนการติดตั้งระบบ หน่วย เงิน  
 $C_{ref.M}$  = ต้นทุนการติดตั้งที่ใช้อ้างอิง หน่วย เงิน  
 $Q/J_w$  = พื้นที่เมมเบรนที่ต้องใช้ หน่วย พื้นที่  
 $M_{a.ref}$  = พื้นที่เมมเบรนที่ใช้อ้างอิง หน่วย พื้นที่  
 0.6 = Equipment exponent

#### 4. ประเมินต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด



ภาพที่ 3.6 สรุปขั้นตอนการทดลองของงานวิจัย

## บทที่ 4

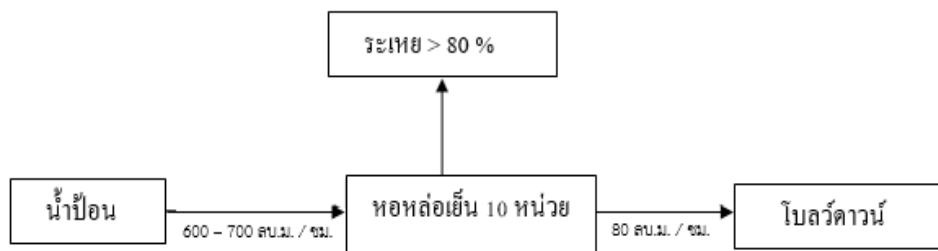
### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการบำบัดน้ำเสียจากหอหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์เพื่อนำกลับมาใช้งานอีกครั้ง โดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน ซึ่งกระบวนการที่นำมาพิจารณาในการบำบัดน้ำเสียจากหอหล่อเย็นในงานวิจัยนี้ คือกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส ทำการศึกษาและเปรียบเทียบความเป็นไปได้ของการใช้งานทางด้านวิศวกรรมพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด ความต้องการพลังงานในการบำบัดน้ำหนึ่งหน่วย ความต้องการสารเคมี และอื่นๆ ที่ประสิทธิภาพการบำบัดต่างๆและทางด้านเศรษฐศาสตร์ได้แก่ ต้นทุนการติดตั้ง ต้นทุนการเดินระบบ และต้นทุนการบำรุงรักษา เพื่อหาต้นทุนที่แท้จริงของน้ำที่ผ่านการบำบัดซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง

##### 4.1.1 ศึกษาอัตราการใช้น้ำ ทิศทางการไหลของน้ำ ในระบบของหอหล่อเย็น

จากการศึกษาพบว่าหอหล่อเย็นของโรงงานมีด้วยกันทั้งหมด 10 หน่วย มีการใช้งานพร้อมกันทั้งหมด ซึ่งสมดุลมวลของน้ำในระบบเป็นไปตามภาพที่ 4.1 ซึ่งมีอัตราการใช้น้ำรวมอยู่ที่ 600 – 700 ลบ.ม./ชม. มีอัตราการระเหยของน้ำอยู่ที่มากกว่าร้อยละ 80 ของน้ำป้อน มีอัตราการไหลของน้ำที่ 80 ลบ.ม./ชม. เดินระบบตลอด 24 ชม.



ภาพที่ 4.1 แผนผังแสดงทิศทางการไหลของหอหล่อเย็น

##### 4.1.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

เนื่องจากน้ำทิ้งที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ จึงได้ทำการขอความอนุเคราะห์ให้ทางโรงงานจัดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งโบลว์ดาวน์และ

น้ำป้อนของหอหล่อเย็นมา ให้ทำการวิเคราะห์คุณภาพ ซึ่งโดยปกติแล้วหอหล่อเย็นจะมีการใช้น้ำประปาเป็นน้ำป้อนเข้าสู่ระบบ (สุจิตรา พรรัตนพิทักษ์, 2553) เมื่อได้รับตัวอย่างน้ำมาแล้วจึงทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้งานไม่หมดจะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 พบว่าตัวอย่างน้ำมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

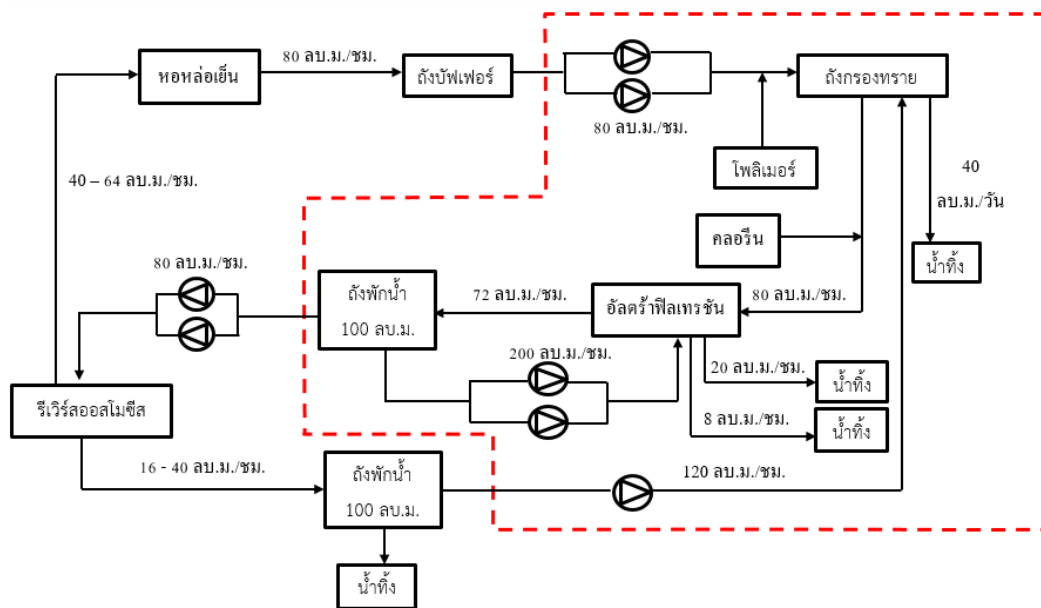
**ตารางที่ 4.1** พารามิเตอร์ต่างๆของน้ำเสียจากหอหล่อเย็นและน้ำป้อนเข้าสู่หอหล่อเย็น

พารามิเตอร์	หน่วย	โบลวดาวน				น้ำป้อน			
		ต่ำสุด	เฉลี่ย.	สูงสุด	SD	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	SD
Na <sup>+</sup>	มก./ล.	106.4	131.15	155.9	20.0	5.1	13.05	21	6.7
K <sup>+</sup>	มก./ล.	47.9	61.35	74.8	10.3	7.7	9.56	11.6	1.5
Ca <sup>2+</sup>	มก./ล.	66	75.25	84.5	7.2	10.9	12	13.1	1.0
Mg <sup>2+</sup>	มก./ล.	19.4	21.7	24	1.9	2.1	2.85	3.6	0.6
ประจุลบ									
Cl <sup>-</sup>	มก./ล.	142	182	222	31.9	20	33.2	46.4	11.0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	มก./ล.	4	22	40	17.0	ไม่พบ	0.6	0.3	0.3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	มก./ล.	157	189.8	222.6	24.1	21	48.5	76	28.2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.	202.5	215.75	229	11.0	60	73.75	87.5	11.3
พีเอช	-	7.97	8.24	8.51	0.2	7	7.21	7.41	0.2
ทีดีเอส	มก./ล	884	1,045.5	1,207	132.4	120	141	162	16.3
การนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์/ชม.	1,050	1,159	1,268	85.9	192	199.5	207	5.5

จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณของแข็งละลายน้ำรวมของน้ำป้อนอยู่ที่ 120 – 162 มก./ล. และน้ำทิ้งอยู่ระหว่าง 884 – 1,207 มก./ล. ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการที่ระหว่างการเดินระบบมีการระเหยของน้ำและการเติมสารเคมีปรุงแต่งต่างๆ และเมื่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมีปริมาณถึงค่าๆ หนึ่งจะมีการโบลวดาวนน้ภายในหอหล่อเย็นทิ้ง ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ทำการวิเคราะห์และอัตราการไหลของน้ำทิ้งที่ทำการศึกษานำไปใช้ในการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสและระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสในการศึกษาชั้นที่ 2 และ 3 ต่อไป

## 4.2 การออกแบบระบบบำบัดกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส

จากการศึกษาพบว่าระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่น้ำที่จะเข้าสู่ระบบจะต้องมีค่าเอสดีไอต่ำกว่า 5 เป็นอย่างน้อย เพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรนในระบบรีเวิร์สออสโมซิส จึงจำเป็นต้องมีหน่วยบำบัดเบื้องต้นเพื่อกำจัดสารแขวนลอยและอนุภาคคอลลอยด์เสียก่อน ซึ่งแผนผังของหน่วยบำบัดเบื้องต้นเป็นดังภาพที่ 4.2

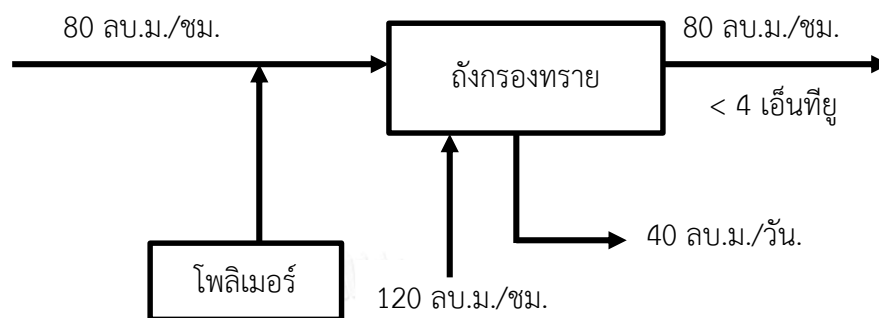


ภาพที่ 4.2 แผนผังแสดงทิศทางการไหลของส่วนต่างๆ ของระบบรีเวิร์สออสโมซิส ภายในเส้นประคือ หน่วยบำบัดเบื้องต้น

### 4.2.1 หน่วยบำบัดเบื้องต้น

หน่วยบำบัดเบื้องต้นที่เป็นที่นิยมใช้งานในการกำจัดสารแขวนลอยกันอย่างแพร่หลายในระบบรีเวิร์สออสโมซิสได้แก่ ถังกรองทราย เพื่อกรองของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ และเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเทรชันในการกรองของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กหรือคอลลอยด์ ดังนั้นจึงเลือกหน่วยบำบัดทั้ง 2 มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งการออกแบบถังกรองทรายเป็นดังนี้ ใช้เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง ขนาด 80 ลบ.ม./ชม. ทำงานสลับกันคราวละ 1 เครื่อง อัตราความเร็วของน้ำที่ผ่านสารกรองทรายของถังกรองทรายได้ออกแบบที่ 13 ม./ชม. รองรับอัตราการไหลของน้ำเสีย 80 ลบ.ม./ชม. ซึ่งจะได้ถังกรองทรายที่มีจำหน่ายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.7 ม. สูง 1.5 ม. (กรณีการ์ มินสิรินันท์, สัมภาษณ์, 14 ธันวาคม 2557) ในระหว่างกรองจะมีการเติมสารโพลิเมอร์ความเข้มข้น 1 มก./ล. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกรอง และเมื่อถึงเวลาที่ต้องทำความสะอาด (24 - 48 ชม.) ด้วยการทำการ

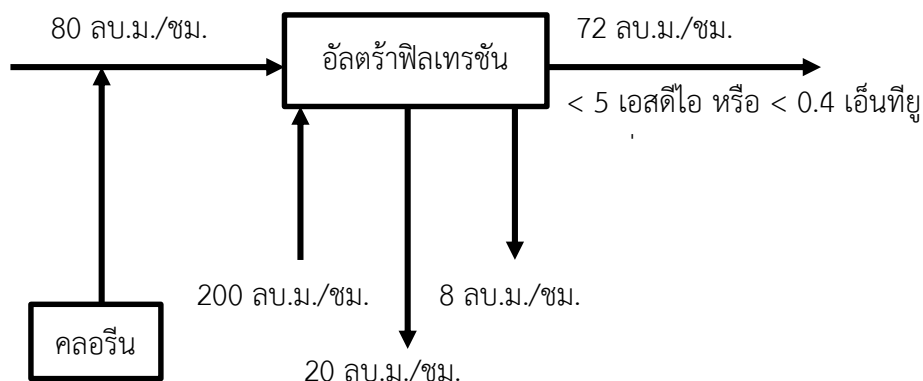
ล้างย้อนด้วยอัตราการไหลที่ 120 ลบ.ม./ชม. เป็นเวลา 15 – 30 นาที ทำให้เกิดน้ำทิ้ง 40 ลบ.ม./วัน โดยน้ำที่นำมาใช้ในการล้างย้อนนี้จะนำน้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสกลับมาใช้อีกครั้งหนึ่ง คุณภาพน้ำที่ผ่านถึงกรองทราย ค่าความขุ่นจะลดลงเหลือ 4 เอ็นทียูหรือเอสดีไอน้อยกว่า 3 (Dow Chemical Company, 2008) แผนผังสมดุลอัตราการไหลของถังกรองทรายเป็นไปตามภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แผนผังแสดงทิศทางการไหลของถังกรองทราย

ในส่วนของการออกแบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันปกติแล้วจะมีลักษณะเป็นโมดูลซึ่งเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน 1 โมดูล มีอัตราการกรองน้ำอยู่ที่ 4 ลบ.ม./ชม. จะได้จำนวนโมดูลที่ต้องการคือ 20 โมดูล ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันมีความคล้ายคลึงกับการเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสคือ จะมีน้ำที่ไม่ผ่านการกรอง ประมาณ 8 ลบ.ม./ชม. และมีอัตราการล้างย้อน 200 ลบ.ม./ชม. ทำการล้างย้อนเป็นเวลาประมาณ 3 นาที ทุก 30 นาที ทำให้เกิดน้ำเสียประมาณ 20 ลบ.ม./ชม. และมีถังสำหรับเก็บน้ำที่ผ่านการกรองจากอัลตราฟิลเตรชันแล้วเพื่อสำรองน้ำก่อนเข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิสขนาด 100 ลบ.ม. ในระหว่างน้ำเข้าสู่เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน จะมีการเติมสารคลอรีนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียนี้จะไปทำให้เกิดฟาวลิงที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันและอายุการใช้งานของเมมเบรนสั้นลง เมื่อน้ำได้ผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันแล้ว ค่าเอสดีไอของน้ำทิ้งจะมีค่าน้อยกว่า 5 ตามที่ต้องการ แผนผังสมดุลอัตราการไหลของอัลตราฟิลเตรชันเป็นไปตามภาพที่ 4.4





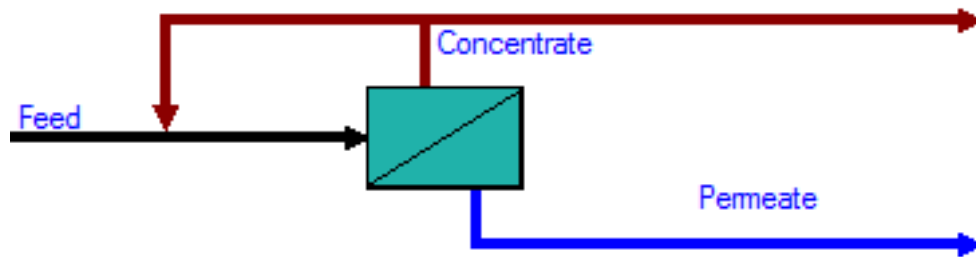
ภาพที่ 4.4 แผนผังแสดงทิศทางการไหลของถังกรองทราย

#### 4.2.2 การออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส

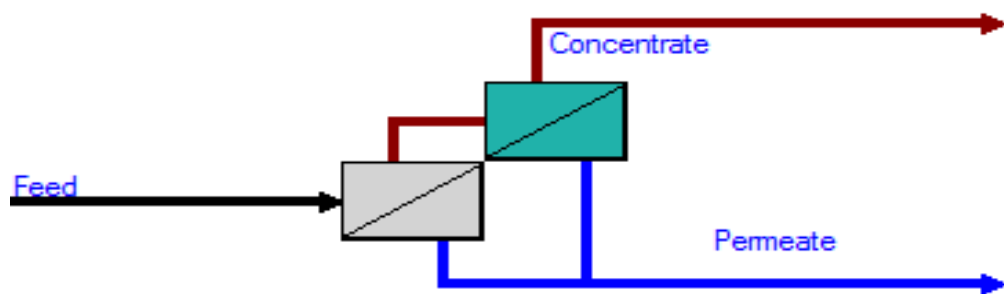
ในการทดลองนี้ จะศึกษาถึงการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสโดยใช้โปรแกรม ROSA ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ออกแบบโดยบริษัท Dow Chemical Company ซึ่งเป็นบริษัทที่จัดจำหน่ายและรับผิดชอบติดตั้งระบบรีเวิร์สออสโมซิสและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เมื่อเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้สมการปกติเปรียบเทียบกับค่าคำนวณด้วยโปรแกรม พบว่าให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำกว่าร้อยละ 95 (Altaee , 2012) จึงสามารถใช้งานในการออกแบบแทนกันได้ ซึ่งปัจจุบันนี้ซอฟต์แวร์โปรแกรมได้พัฒนามาถึงเวอร์ชันที่ 9.0.0 แล้ว

#### 4.2.3 ความต้องการพื้นฐานของโปรแกรม

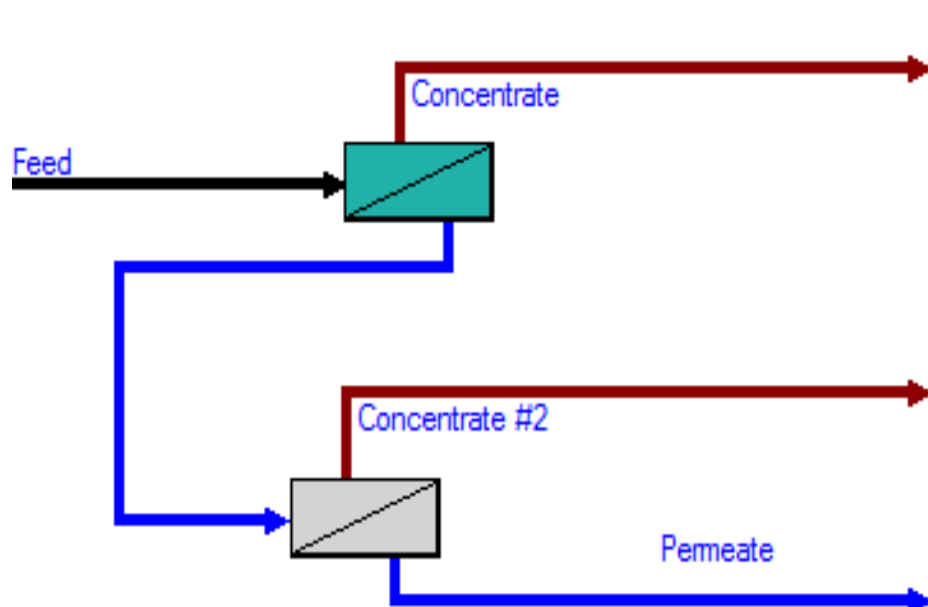
สิ่งที่ทำการป้อนเข้าสู่โปรแกรมได้แก่ พารามิเตอร์ที่ได้ทำการวิเคราะห์ไปแล้วในขั้นตอนแรกตามตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่างๆของน้ำเสียจากหอหล่อเย็น เมื่อได้ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณและประมวลผลค่าของแข็งละลายน้ำอีกครั้ง ทั้งนี้ทางผู้วิจัยไม่ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทุกค่าตามที่โปรแกรมต้องการเพราะมีค่าน้อยมาก หรือในบางตัวอย่างของน้ำเสียภายหลังทำการตรวจวัดแล้วไม่พบ จึงไม่ได้นำมาพิจารณาใส่ในโปรแกรมการออกแบบในการเดินระบบสามารถกระทำได้ 4 รูปแบบ คือ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน (ภาพที่ 4.5) 1 หน่วย หลายขั้นตอน (ภาพที่ 4.6) หลายหน่วย หน่วยละ 1 ขั้นตอน (ภาพที่ 4.7) และ หลายหน่วย หน่วยละหลายขั้นตอน (ภาพที่ 4.8) ในการเพิ่มจำนวนขั้นตอนการบำบัด สามารถเพิ่มได้ทั้งภายในหน่วยบำบัด แต่เป็นการนำน้ำทิ้งจากขั้นแรกมาทำการกรองอีกครั้ง แต่จะได้คุณภาพน้ำที่ต่ำลง และการเพิ่มจำนวนหน่วยบำบัดจะเป็นการนำน้ำที่ผ่านการกรองแล้วจากหน่วยแรกมากรองอีกครั้ง วิธีหลังจะให้คุณภาพน้ำที่ดีขึ้น โดยโปรแกรมสามารถออกแบบการใช้งานได้ทั้ง 2 แบบ



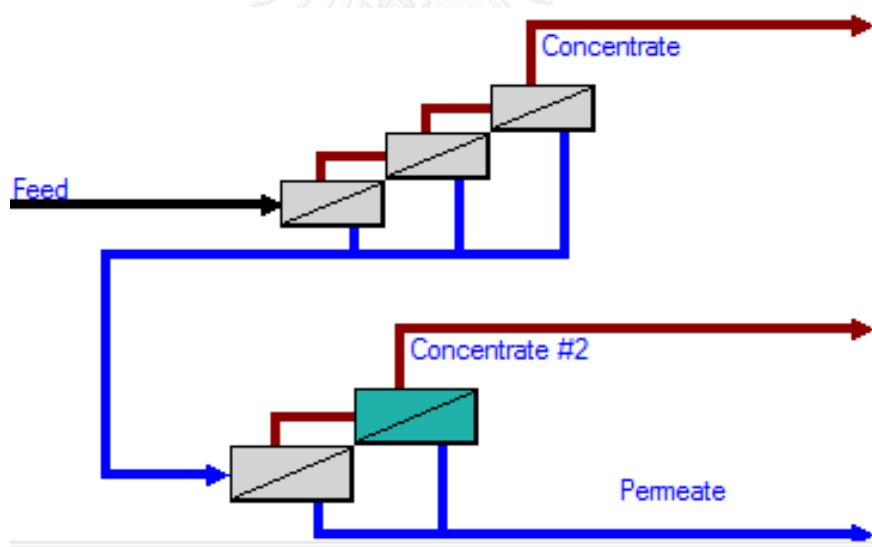
ภาพที่ 4.5 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 1 หน่วยบำบัด 1 ขั้นตอน



ภาพที่ 4.6 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 1 หน่วยบำบัดหลายขั้นตอน



ภาพที่ 4.7 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบหลายหน่วย หน่วยละ 1 ขั้นตอน



ภาพที่ 4.8 การเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบหลายหน่วยหน่วยละหลายขั้นตอน

## 4.2.4 ขั้นตอนการออกแบบ

ตารางที่ 4.2 ลำดับขั้นตอนการออกแบบ

รายการ	ขั้นตอน	หมายเหตุ
1. ข้อมูลโครงการ (Project information)	กำหนดหน่วยของอัตราการไหล แรงดัน และ อุณหภูมิ	
2. ข้อมูลน้ำทิ้ง (Feed water data)	กำหนดประเภทของน้ำเสีย กำหนดสมบัติของน้ำเสีย กำหนดจำนวนเส้นทางน้ำ กำหนดอุณหภูมิ	- ในขั้นตอนนี้สามารถบันทึกผลของน้ำเก็บไว้ได้ - มีในบางกรณีที่น้ำเสียมีหลายที่มาแต่นำมารวมกันก่อนเข้าสู่ระบบ
3. แจ้งเตือนการเกิดตะกอน (Scaling information)	กำหนดหน่วยป้องกันการเกิดตะกอน	
4. ออกแบบระบบ (System configuration)	กำหนดจำนวนหน่วยบำบัด	- เป็นจำนวนหน่วยของระบบรีเวิร์สออสโมซิส 1 หรือ 2
	กำหนดจำนวนขั้นตอนการบำบัดต่อหน่วยบำบัด (Stage)	- สูงสุด 9 ขั้นตอน
	กำหนดประสิทธิภาพการบำบัด	- สามารถเลือกที่จะกำหนดค่าใดค่าหนึ่งให้คงที่ได้ ซึ่งค่าที่กำหนดไว้จะมีผลต่อฟลักซ์
	กำหนดอัตราการไหลของน้ำ	
	กำหนดปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด	- แปรผันตาม ประสิทธิภาพการบำบัด อัตราการไหล และปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด
	ฟลักซ์	
	กำหนดชนิดเมมเบรน	- ขึ้นกับประเภทของน้ำ
	สัมประสิทธิ์การไหล (Flow factor)	- หรือสัมประสิทธิ์การเกิดความสกปรก (Fouling factor), 0 ถึง 1
	กำหนดขนาดของเมมเบรน	-1 ถึง 6 เมตร
กำหนดจำนวนเมมเบรน	- ขึ้นกับประสิทธิภาพการบำบัดและขนาดท่อบรรจุเมมเบรน	
5. รายงานผลการออกแบบ (Report)	รายงานผลการออกแบบ	- หากสภาวะการทำงานของระบบไม่ผ่านการออกแบบ ให้กลับไปปรับแก้จำนวนเมมเบรน และอัตราการเวียนน้ำ
6. ประเมินต้นทุน (Cost analysis)	เป็นส่วนของการประเมินต้นทุนการบำบัดและอายุการใช้งาน	- นำผลการออกแบบไปประเมินราคากับทางผู้จำหน่าย

จากตารางที่ 4.2 ในขั้นตอนที่ 1 กำหนดหน่วยของอัตราการไหลของน้ำ แรงดัน และอุณหภูมิให้อยู่ในหน่วยที่ต้องการ อัตราการไหลสามารถเลือกได้ทั้ง แกลลอน/นาที (gpm) แกลลอน/วัน (gpd) ลบ.ม./ชม.(m<sup>3</sup>/h) และลบ.ม./วัน (m<sup>3</sup>/d) แรงดันสามารถกำหนดได้ทั้ง ปอนด์/ตร.นิ้ว (psig) และ บาร์ (bar) ส่วนอุณหภูมิสามารถกำหนดได้ทั้ง องศาเซลเซียสหรือ องศาฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit, °F) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดอัตราการไหล แรงดันและอุณหภูมิในหน่วย ลบ.ม./ชม. บาร์ และองศาเซลเซียสตามลำดับ

ในขั้นตอนที่ 2 กำหนดประเภทของน้ำเสีย ซึ่งจะกำหนดให้เป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาแล้วและมีค่าเอสดีไอน้อยกว่า 5 และในส่วนของคุณภาพน้ำเลือกกำหนดค่าด้วยตนเอง นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากตารางที่ 4.1 ป้อนเข้าสู่โปรแกรม ในส่วนนี้ยังสามารถกำหนดแหล่งน้ำเสียเพิ่มเติมได้อีกด้วย ในกรณีที่น้ำเสียมาจากหลายแหล่งและมารวมกันก่อนเข้าสู่ระบบ แต่ในงานวิจัยนี้มีน้ำเสียที่มาจากหอหล่อเย็นเพียงแหล่งเดียวและป้อนเข้าสู่ระบบทั้งหมด กำหนดอุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส และเลือกปรับประจุให้สมดุลกัน (Adjust all ions) ในส่วนนี้สามารถเลือกปรับบางประจุได้เช่นกัน

ขั้นตอนที่ 3 เป็นส่วนของการเพิ่มหน่วยป้องกันการเกิดตะกรัน ซึ่งมีให้เลือกด้วยกัน 2 แบบ คือใช้หน่วยปรับพีเอช การปรับพีเอชนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีบ่งชี้การเกิดตะกรัน (Langelier Index) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงโอกาสในการเกิดตะกรันของน้ำ โดยต้องปรับพีเอชให้ต่ำลงจนกว่าจะมีค่าติดลบ หรือ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน แต่ในน้ำบางประเภทที่คุณภาพดีอาจไม่จำเป็นต้องเพิ่มเติมในส่วนนี้ โดยหน่วยป้องกันการเกิดตะกรันแบบปรับพีเอช โดยสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชมีให้เลือกมี 3 ชนิด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) กรดเกลือ (HCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเนื่องจากน้ำที่นำมาใช้ในการออกแบบเป็นน้ำเสียดังนั้น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจึงไม่เหมาะสม เพราะอาจเกิดฟาวลิงในระบบขึ้นได้ ดังนั้นจึงใช้กระบวนการปรับพีเอชและเลือกใช้กรดเกลือในการปรับพีเอช ความเข้มข้นที่ใช้อยู่ที่ ร้อยละ 5 -10 W/V ที่พีเอชประมาณ 6.3 โดยเมมเบรนสามารถรองรับพีเอชได้ถึง 2

ขั้นตอนที่ 4 เป็นส่วนของการออกแบบระบบเมมเบรน ในขั้นตอนนี้จะให้กำหนดหลายพารามิเตอร์ เริ่มแรกต้องกำหนดว่าจะใช้งานระบบรีเวิร์สออสโมซิสจำนวนเท่าใด 1 หรือ 2 หน่วย (Unit) และ จำนวนขั้นตอนในการบำบัด (Stage) ในการออกแบบงานวิจัยนี้จะกำหนดใช้ 1 หน่วย และบำบัด 1 ขั้นตอน หรือ มากกว่า 1 ขั้นตอน เพราะการเพิ่มหน่วยบำบัดก็เป็นการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากหน่วยแรกกลับมากรองใหม่ เริ่มแรกจะทำการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน ซึ่งปรับแต่งได้ง่ายกว่าแบบ 2 หน่วย ต่อมาจึงกำหนดจำนวนขั้นตอน ในแต่ละหน่วยว่าต้องการบำบัด

ก็ขึ้นตอน ซึ่งการเพิ่มจำนวนขึ้นตอนนั้น จะทำให้ความต้องการใช้พื้นที่เมมเบรนเพิ่มมากขึ้น ได้คุณภาพน้ำที่ต่ำลง ได้ฟลักซ์ที่ต่ำลง แต่อัตราการบริโภคพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยผลิตก็ลดลงด้วย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้แรงดันน้ำที่ลดลง ในขณะที่ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เท่ากัน ในส่วนของการกำหนดประสิทธิภาพ อัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด อัตราการไหลที่ผ่านการบำบัดและฟลักซ์ มีเพียงฟลักซ์เท่านั้นที่ไม่ได้ทำการกำหนดค่า ดังนั้นทั้ง 3 ค่าจึงมีความสัมพันธ์กันดังนี้ หากกำหนดประสิทธิภาพ อัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด อัตราการไหลที่ผ่านการบำบัดและฟลักซ์ ทั้ง 2 ค่า เพราะการกำหนดประสิทธิภาพและปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ต้องการ ระบบจะคำนวณอัตราการไหลที่ป้อนเข้า และฟลักซ์ให้โดยอัตโนมัติ หรือ กำหนดอัตราการไหล และปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ต้องการ ระบบก็จะคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดให้เช่นกัน ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้อัตราการไหลเข้าสู่ระบบ และประสิทธิภาพคงที่ คือ 80 ลบ.ม./ชม. และประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 50 60 70 และ 80 ขึ้นตอนต่อไปคือการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การไหล เป็นเสมือนค่าความปลอดภัยในการเดินระบบ (ตารางที่ ค.1) ซึ่งหากมีค่ามากกว่าที่ออกแบบจะมีความไม่ปลอดภัย ค่าสูงสุดคือ 1 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้จะส่งผลต่ออุณหภูมิ ปริมาณความเข้มข้นของแข็งละลายน้ำและแรงดัน และยังส่งผลต่อไปถึงขนาดของเครื่องสูบน้ำ ถ้าอุณหภูมิต่ำ จะทำให้ต้องใช้แรงดันสูงขึ้น คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจะต่ำลง ปริมาณของแข็งละลายน้ำสูงขึ้น แต่จากการปรับค่าพบว่า ไม่ได้มีผลกับค่าของแข็งละลายน้ำมากนัก (หลักสิบ มก./ล.) รวมถึงแรงดัน ด้วยเช่นกันจึงกำหนดไว้ที่ 0.65 กำหนดประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำไว้ที่ร้อยละ 80 กำหนดชนิดของเมมเบรนซึ่งเมมเบรนที่ใช้กับน้ำกร่อยในระดับอุตสาหกรรมมีด้วยกันดังนี้ คือ BW30-365-IG และ BW30-400-IG ในงานวิจัยนี้จะเลือก BW30-400-IG เพราะเนื่องจาก รองรับแรงดันได้มากกว่า มีพื้นที่ผิวกรองที่มากกว่าทำให้สามารถรองรับปริมาณน้ำที่มากกว่า แต่มีราคาที่สูงกว่าเช่นกัน (กรณีการ มีนสิรินันท์, สัมภาษณ์, 14 ธันวาคม 2557) และในส่วนของอัตราการเวียนน้ำ (Concentrate to Pass 1 Feed) ส่วนที่เป็น การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการกรองด้วยระบบรีเวิร์สออสโมซิสแล้วกลับเข้าสู่ระบบอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งระบบที่น้ำเข้าสู่ระบบน้อยจะเป็นส่วนที่ทำให้ระบบมีการใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพมากขึ้น แต่การเพิ่มอัตราการเวียนน้ำนี้จะส่งผลให้สามารถกำหนดพื้นที่ความต้องการเมมเบรนที่ต่ำสุดได้

#### 4.2.5 ผลการออกแบบ

เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ จนครบถ้วนแล้ว เมื่อถึงขั้นตอนการกำหนดรูปแบบในการเดินระบบ ตามที่ได้กล่าวไปแล้วว่าตัวโปรแกรมสามารถกำหนดรูปแบบในการเดินระบบได้ในรูปแบบใดบ้าง ซึ่งการออกแบบการเดินระบบที่ได้ทำการทดลองจะเป็นไปตามตารางที่ 4.3 ซึ่งจากผลการออกแบบพบว่าการเพิ่มจำนวนขึ้นตอนนั้นจะทำให้ใช้พื้นที่เมมเบรนเพิ่มมากขึ้น ได้คุณภาพน้ำและฟลักซ์ต่ำลง แต่อัตราการบริโภคพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากใช้แรงดัน

น้ำลดลง ในขณะที่ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เท่ากันดังนั้น ซึ่งในการกำหนดประสิทธิภาพการบำบัด หากกำหนดประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น ความต้องการพื้นที่เมมเบรนมากขึ้น บริโภคพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น ให้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดมากขึ้น แต่คุณภาพน้ำกลับต่ำลง และการเลือกใช้ขนาดของท่อบรรจุเมมเบรน โดยขนาดที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมีตั้งแต่ 1 - 6 เมตร และในส่วนของ การเพิ่มอัตราการเวียนน้ำจะมีการเพิ่ม ในกรณีที่กำหนดปริมาณเมมเบรนมากเกินไปทำให้ใช้พื้นที่เมมเบรนไม่เต็ม ประสิทธิภาพ

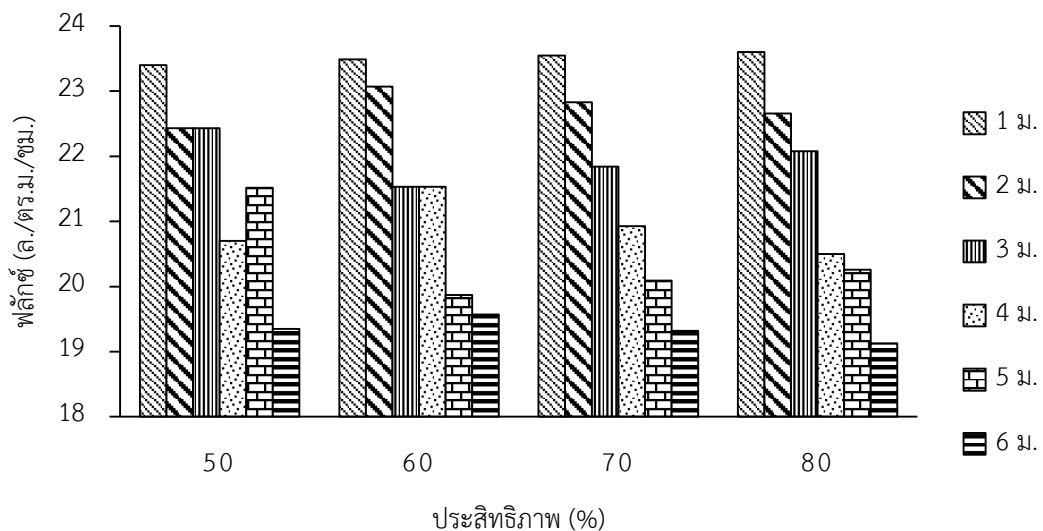
#### ตารางที่ 4.3 การกำหนดรูปแบบการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ประสิทธิภาพการบำบัด	ขนาดเมมเบรน	อัตราการเวียนน้ำ	การเดินระบบ
50 60 70 และ 80	1-6 เมตร	ต่ำสุด – สูงสุด	1 หน่วย 1 ชั้นตอน
50 60 70 และ 80	1-6 เมตร	ต่ำสุด – สูงสุด	1 หน่วย 2 ชั้นตอน
50 60 70 และ 80	1-6 เมตร	ต่ำสุด – สูงสุด	2 หน่วย หน่วยละ 1 ชั้นตอน
50 60 70 และ 80	1-6 เมตร	ต่ำสุด – สูงสุด	2 หน่วย หน่วยละ หลายชั้นตอน

ขนาดท่อบรรจุเมมเบรนที่ยาวขึ้นจะส่งผลต่อฟลักซ์และแรงดันที่ลดลง แต่ขนาดท่อบรรจุที่ยาวขึ้นนี้กลับช่วยประหยัดในส่วนของอัตราการบริโภคพลังงาน พื้นที่ติดตั้ง และต้นทุนการติดตั้ง ทั้งนี้เป็นเพราะราคาของท่อบรรจุเมมเบรนสูงกว่าเมมเบรน นอกจากนี้ในขั้นตอนการบำรุงรักษาจำนวนท่อทางเข้าออกของน้ำ หรือข้อต่ออื่นๆ ก็จะมีมากขึ้นไปด้วย ในด้านของการบำรุงรักษา เมื่อถึงเวลาที่ต้องทำการเปลี่ยนถ่ายเมมเบรน จำนวนท่อบรรจุที่มากทำให้เสียเวลาในการถอดและใส่ เพราะเนื่องจากท่อบรรจุเมมเบรนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีฝาปิดทั้งหัวและท้าย การเปลี่ยนถ่ายต้องถอดทั้ง 2 ด้าน เพื่อดันเมมเบรนจากฝั่งหนึ่งให้ออกมายังอีกฝั่งหนึ่ง และดันเมมเบรนใหม่กลับเข้าไป

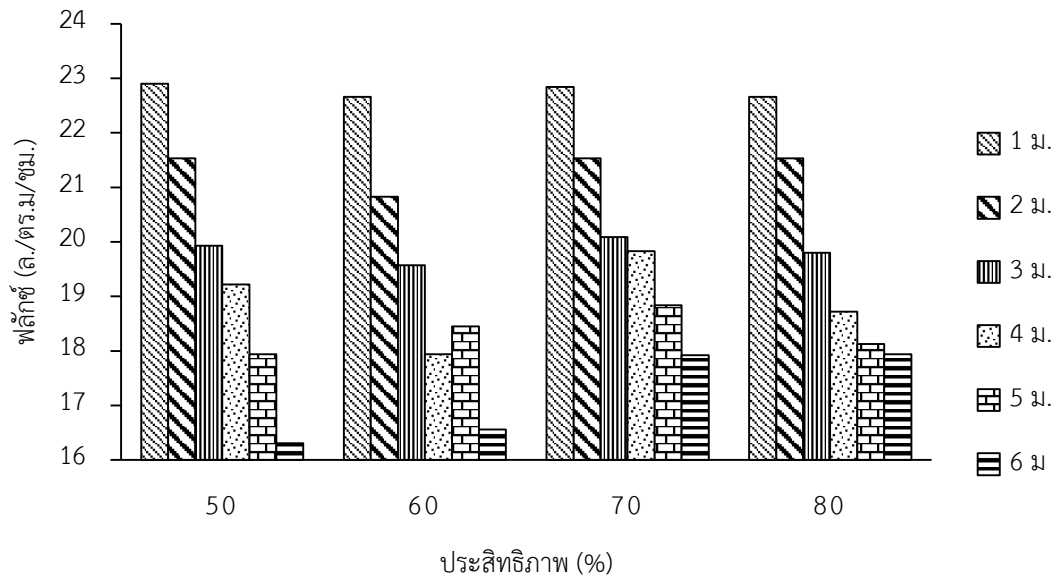
เมื่อได้ทำการออกแบบระบบแล้ว โดยกำหนดรูปแบบการเดินระบบตามตารางที่ 4.3 จากผลการออกแบบเบื้องต้นพบว่า การออกแบบแบบ 2 หน่วย หน่วยละ 1 ชั้นตอน และแบบ 2 หน่วย หลายชั้นตอน เป็นการนำน้ำ (น้ำดี) ที่ผ่านการกรองแล้วกลับมากรองอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ได้คุณภาพน้ำที่ดีขึ้นกว่าการกรองแบบ 2 แบบแรก ดังนั้นจึงไม่แตกต่างกับการนำน้ำที่ผ่านการกรองแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน หรือ 1 หน่วย หลายชั้นตอน มาปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งคุณภาพน้ำที่ได้มีคุณภาพเพียงพอเกินความต้องการและยังใช้พื้นที่เมมเบรนและพลังงานมากกว่า 2 แบบแรกอีกด้วย ดังนั้นจึงไม่ทำการทดลองในส่วนนี้ต่อ และทำการเปรียบเทียบเฉพาะการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ 1 หน่วย หลายชั้นตอน เท่านั้น ผลการทดลองพบว่าฟลักซ์ที่ได้จะลดลงตามพื้นที่เมมเบรนที่มากขึ้นและขนาดของท่อบรรจุเมมเบรนที่ยาวขึ้น ทุกประสิทธิภาพการบำบัดให้ผลการออกแบบในทิศทาง

เดียวกัน คือ เมื่อใช้ท่อบรรจุที่ยาวขึ้นฟลักซ์ที่ได้จะต่ำลง (ภาพที่ 4.9 - ภาพที่ 4.10) แต่พื้นที่เมมเบรนที่ต้องการก็เพิ่มขึ้นด้วย (ภาพที่ 4.11 - ภาพที่ 4.14) ทั้งนี้เป็นเพราะหากใช้ขนาดท่อที่มีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดแรงดันลด (Pressure drop) เพิ่มขึ้น ฟลักซ์ที่ได้จึงต่ำลง แต่ยังมีบางผลการทดลองที่ถึงแม้จะใช้ท่อบรรจุเมมเบรนที่มีขนาดยาวขึ้นแต่กลับให้ฟลักซ์ที่สูงขึ้น คือที่ขนาดท่อบรรจุเมมเบรนความยาว 5 เมตร ของประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ให้ฟลักซ์ 21.52 ล./ตร.ม./ชม. มีความต้องการพื้นที่เมมเบรน 1,858 ตร.ม. ซึ่งสูงกว่าที่ขนาดท่อบรรจุเมมเบรนความยาว 4 เมตร ที่ให้ฟลักซ์ 20.7 ล./ตร.ม./ชม. มีความต้องการพื้นที่เมมเบรน 1,932.32 ตร.ม. ของรูปแบบการออกแบบและประสิทธิภาพการบำบัดเดียวกัน และที่ขนาดท่อบรรจุเมมเบรนความยาว 5 เมตร ของประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 60 ของการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ให้ฟลักซ์ 18.45 ล./ตร.ม./ชม. มีความต้องการพื้นที่เมมเบรน 2,601.20 ตร.ม. ซึ่งสูงกว่าที่ขนาดท่อบรรจุเมมเบรนความยาว 4 เมตร ที่ให้ฟลักซ์ 17.94 ล./ตร.ม./ชม. มีความต้องการพื้นที่เมมเบรน 2,675.52 ตร.ม. ของรูปแบบการออกแบบและประสิทธิภาพการบำบัดเดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะการตั้งค่าจากผู้พัฒนาซอฟต์แวร์ในการปรับผลการคำนวณอัตโนมัติ

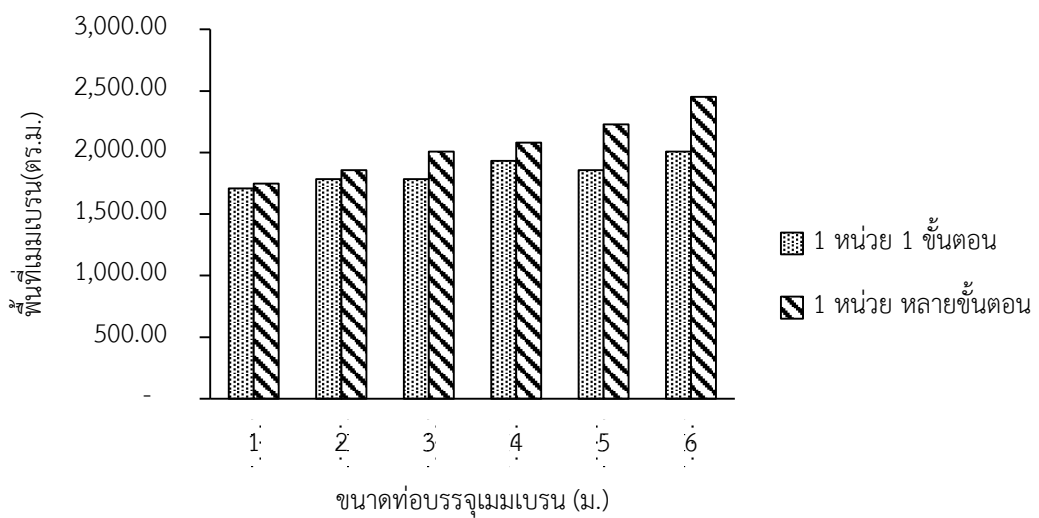


ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบระหว่างฟลักซ์กับขนาดท่อบรรจุที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน

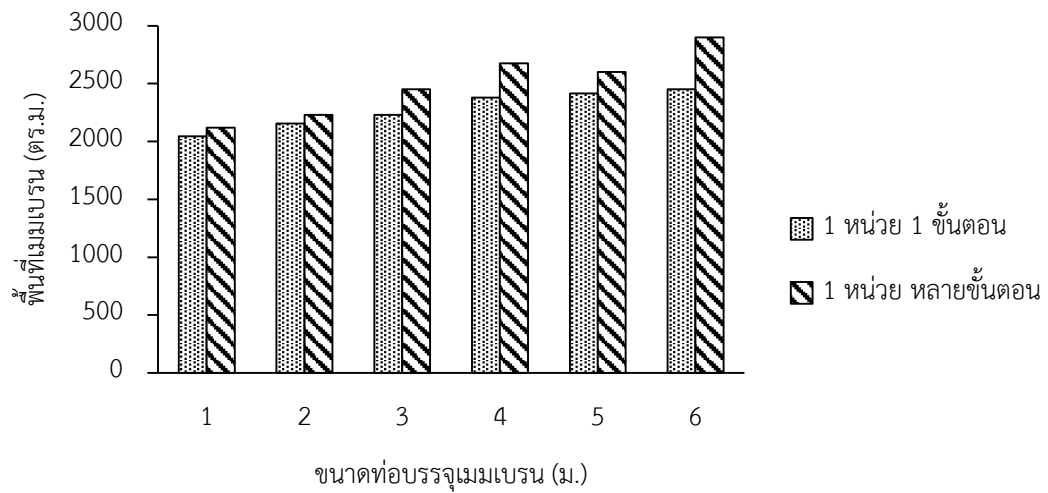




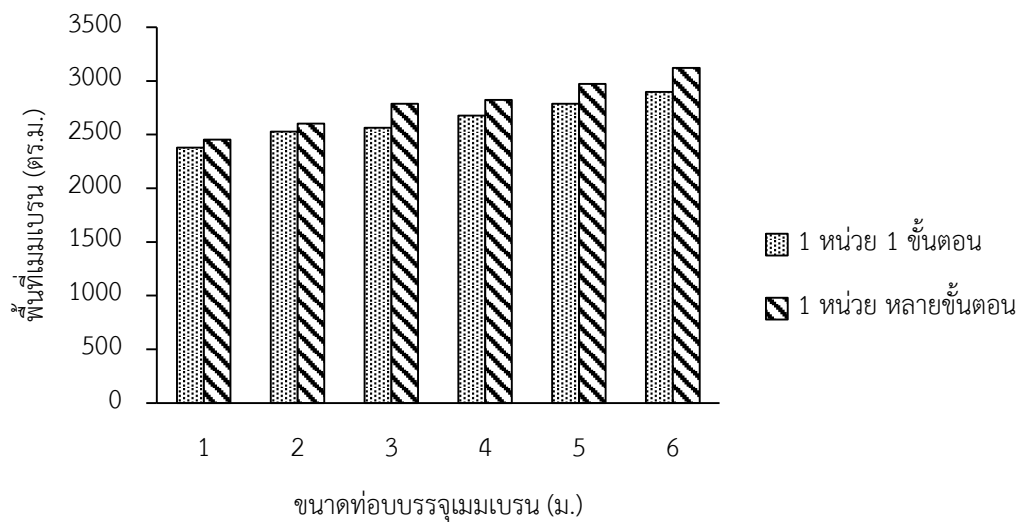
ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบระหว่างพิกซ์กับขนาดท่อบรรจุที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน



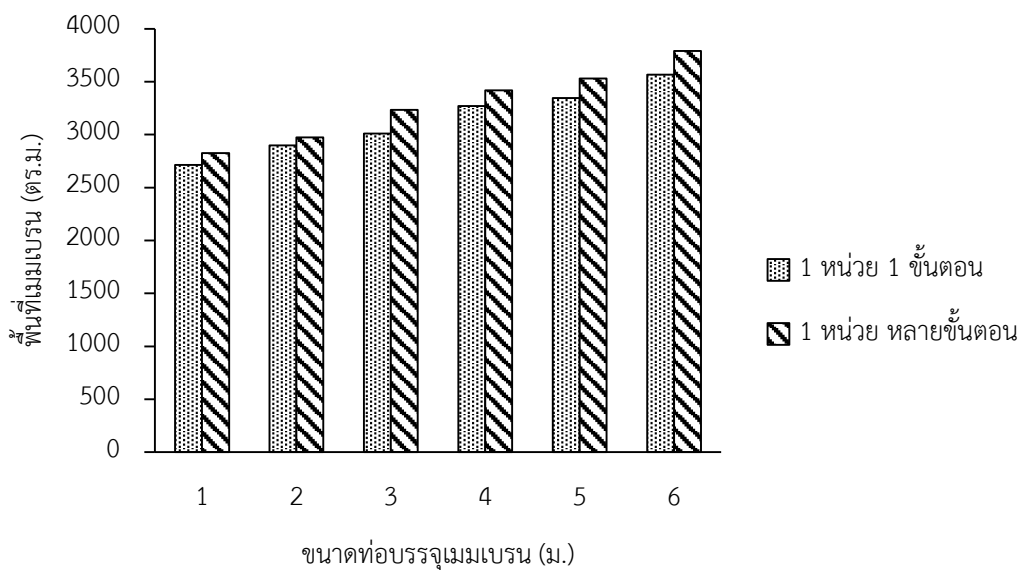
ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบความต้องการพื้นที่เมมเบรนกับขนาดท่อบรรจุเมมเบรนระหว่างการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอนของประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50



**ภาพที่ 4.12** เปรียบเทียบความต้องการพื้นที่เมมเบรนกับขนาดท่อบรรจุเมมเบรนระหว่างการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอม และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอมของประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60

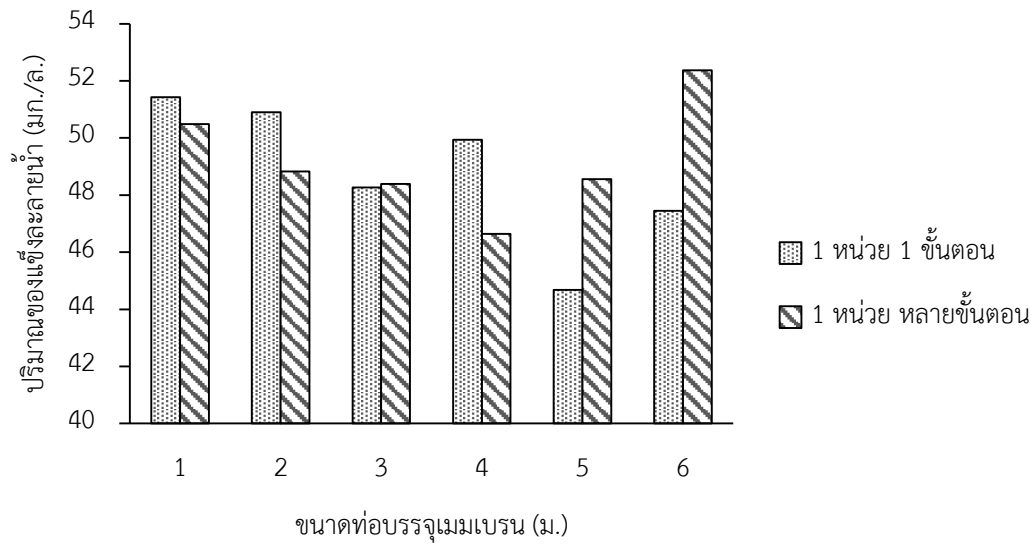


**ภาพที่ 4.13** เปรียบเทียบความต้องการพื้นที่เมมเบรนกับขนาดท่อบรรจุเมมเบรนระหว่างการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอม และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอมของประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70

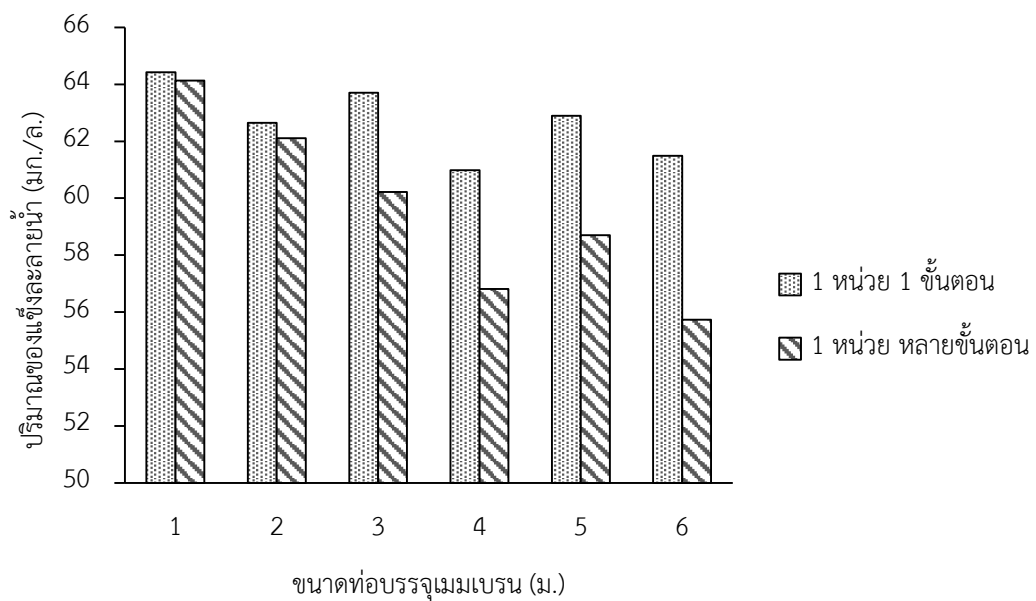


**ภาพที่ 4.14** เปรียบเทียบความต้องการพื้นที่เมมเบรนกับขนาดท่อบรรจุเมมเบรนระหว่างการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอนของประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 80

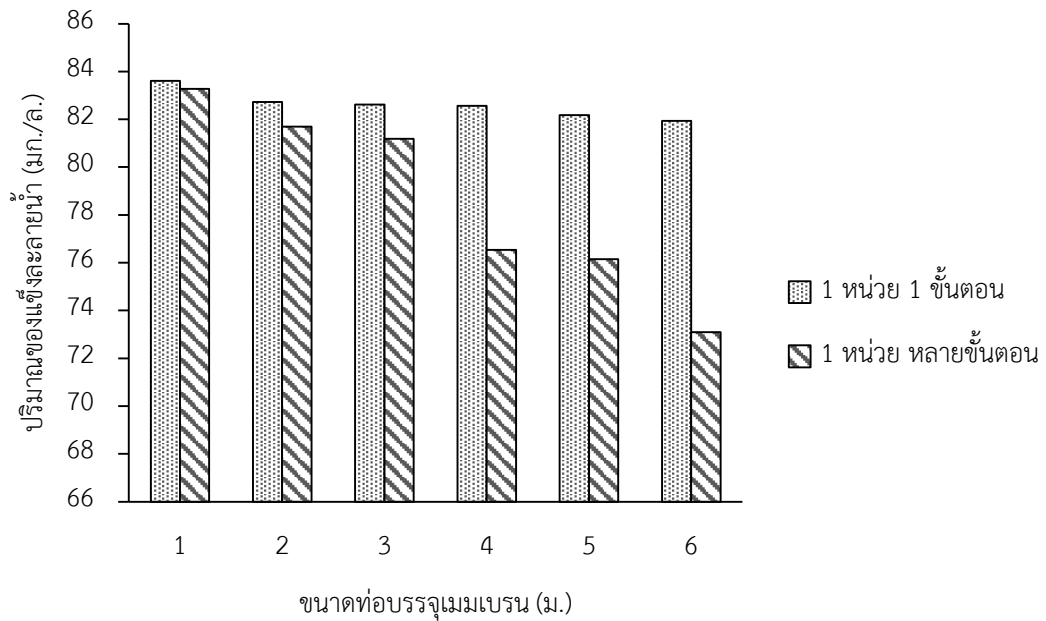
ในด้านของคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดนั้นว่าสามารถนำไปใช้งานได้หรือไม่ จะใช้ค่าความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำเป็นพารามิเตอร์ชี้วัดคุณภาพ ซึ่งจากการศึกษาขั้นตอนที่ 1 ทำให้ทราบว่าคุณภาพของน้ำที่ป้อนเข้าสู่หอหล่อเย็นมีค่าความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำอยู่ที่ 120 – 162 มก./ล. ดังนั้นคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจึงต้องมีค่าต่ำกว่าหรือเทียบเท่าคุณภาพน้ำที่วิเคราะห์ได้เมื่อทำการออกแบบตามตารางที่ 4.3 พบว่าจากการทดลอง ทั้งการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ทุกรูปแบบให้คุณภาพน้ำเพียงพอกับความต้องการของน้ำป้อนของหอหล่อเย็นแล้ว (ค่าของแข็งละลายน้ำไม่เกิน 162 มก./ล.) นอกจากนี้การออกแบบแบบ 1 หน่วยแต่หลายขั้นตอนนั้นเป็นการนำน้ำ (น้ำทิ้ง) ที่ผ่านการกรองจากขั้นตอนแรกแล้วมากรองอีกครั้งหนึ่ง ประสิทธิภาพการบำบัดที่ตั้งไว้จึงเป็นประสิทธิภาพเฉลี่ยของทั้งระบบ และยังใช้พื้นที่เมมเบรนมากกว่าแบบขั้นตอนเดียวอีกด้วย (ภาพที่ 4.11 - ภาพที่ 4.14) แต่ให้คุณภาพน้ำที่ไม่แตกต่างกันมากนักและเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดคุณภาพน้ำจะมีคุณภาพที่ต่ำลง (ภาพที่ 4.15- ภาพที่ 4.18) ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำของประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 จะอยู่ที่ 44.68 – 52.37 มก./ล. ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 จะอยู่ที่ 55.73 – 64.43 มก./ล. ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 จะอยู่ที่ 73.1 – 83.62 มก./ล. และประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 80 จะอยู่ที่ 107.15 – 118.94 มก./ล.



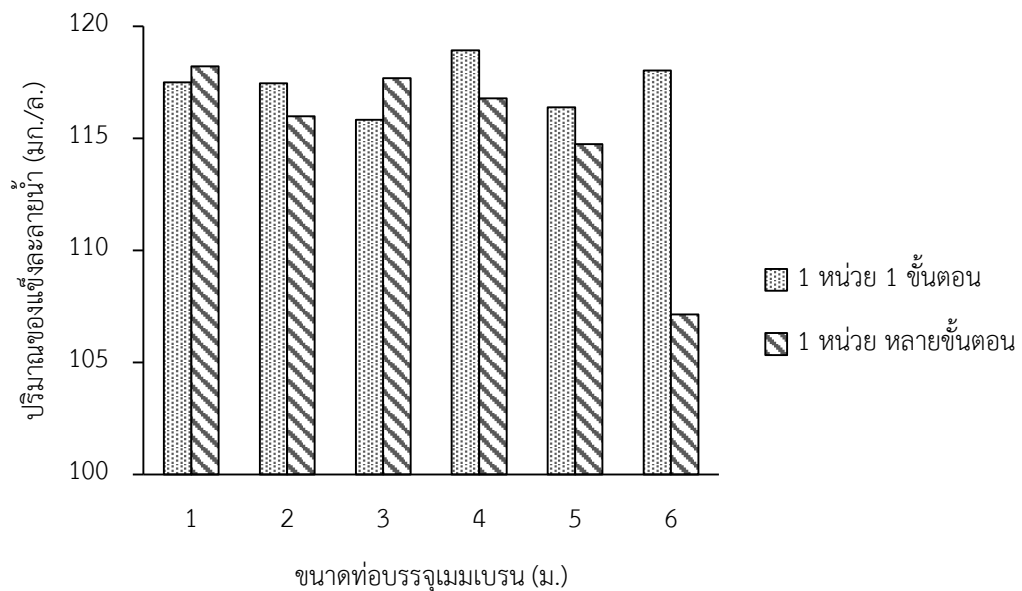
ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 50 ระหว่างการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน



ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 60 ระหว่างการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน

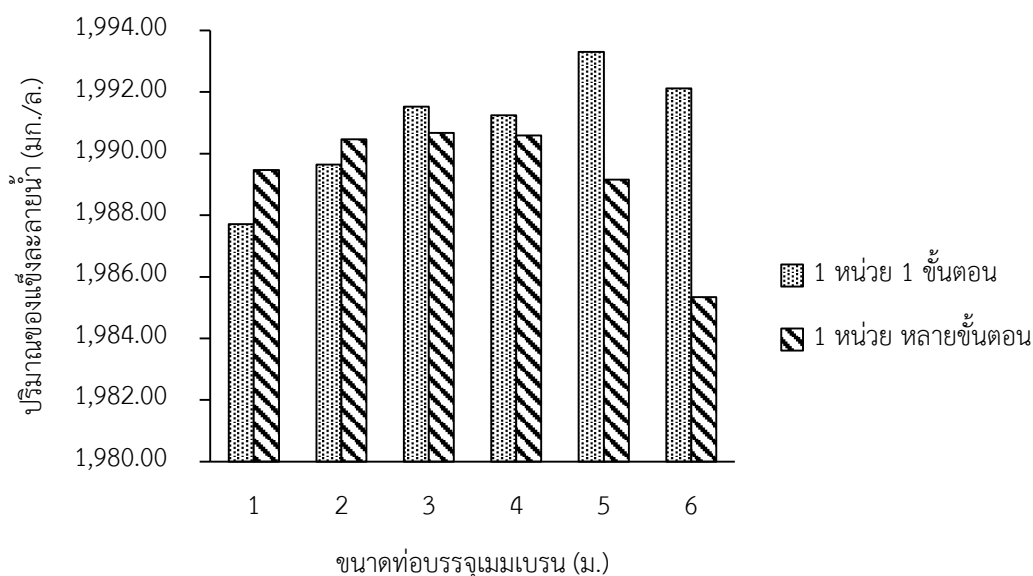


ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 70 ระหว่างการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน

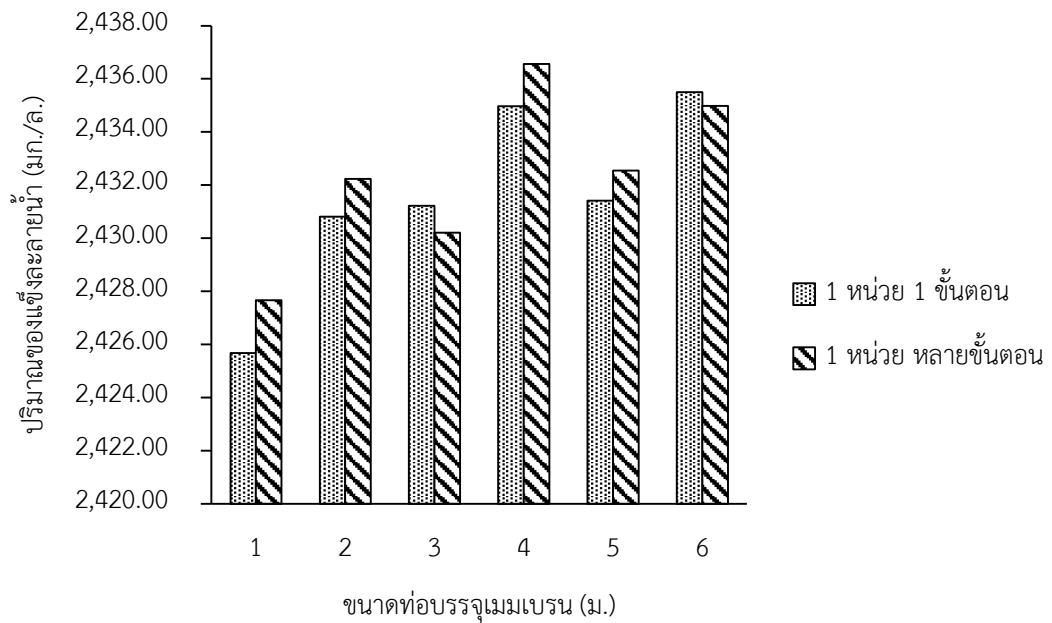


ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 80 ระหว่างการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน

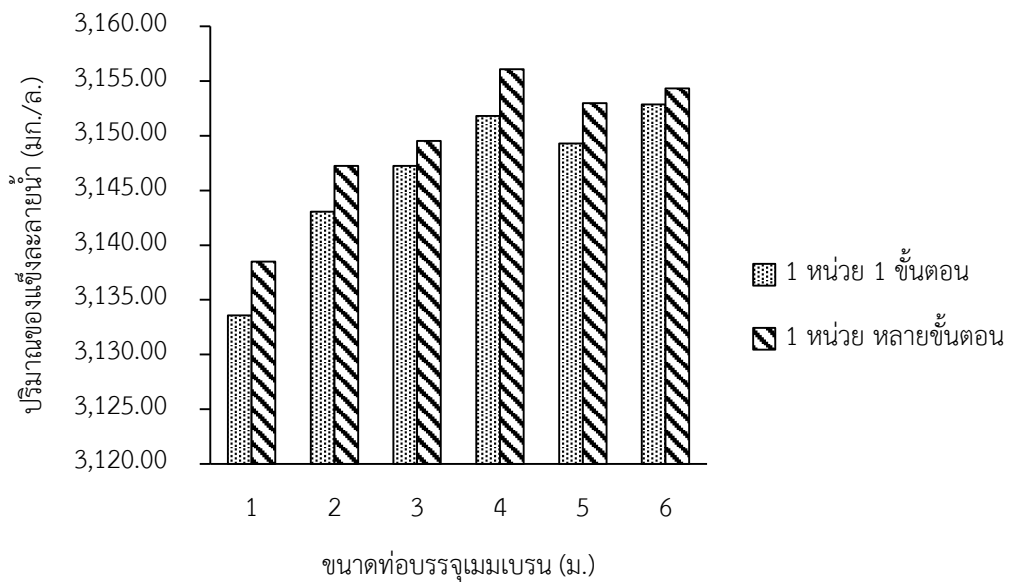
ในด้านของคุณภาพน้ำทิ้งเนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ติดกับทะเลปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำในมาตรฐานน้ำทิ้งอนุญาตไว้ที่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. ดังนั้นคุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสจึงต้องมีค่าปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำไม่เกิน 5,000 มก./ล. จากผลการออกแบบพบว่าทุกรูปแบบของการออกแบบให้ค่าปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำมีค่าปริมาณความเข้มข้นไม่เกิน 5,000 มก./ล (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) (ภาพที่ 4.19 - ภาพที่ 4.22) โดยที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ให้ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำอยู่ที่ 1,985.34 - 1,993.30 มก./ล. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 ให้ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำอยู่ที่ 2,425.67 - 2,436.56 มก./ล. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 ให้ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำอยู่ที่ 3,133.59 - 3,156.08 มก./ล. และที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 80 ให้ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำอยู่ที่ 4,455.64 - 4,505.36 มก./ล.



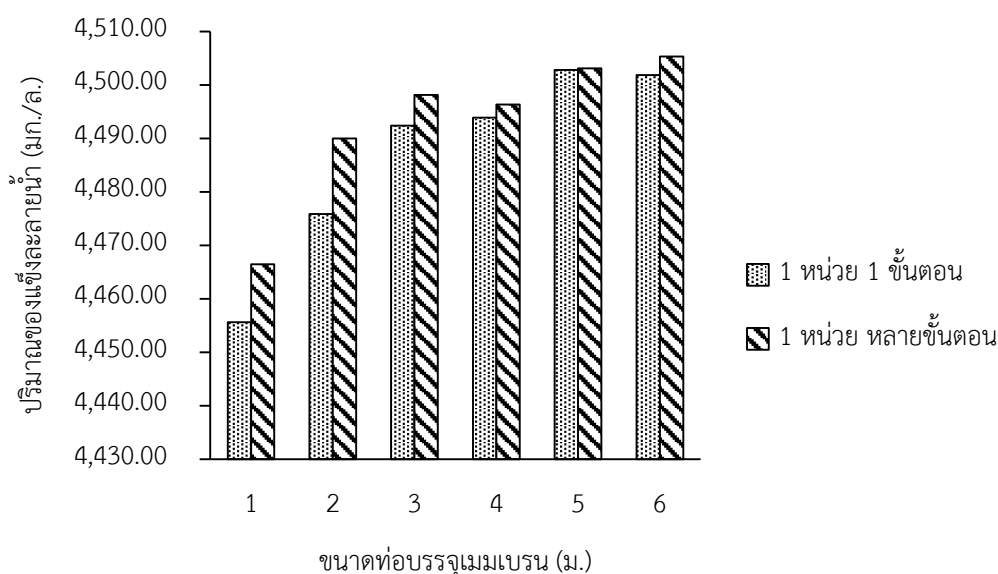
**ภาพที่ 4.19** เปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งหลังจากผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่ประสิทธิภาพร้อยละ 50 ระหว่างการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน



ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งหลังจากผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่ประสิทธิภาพร้อยละ 60 ระหว่างการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน



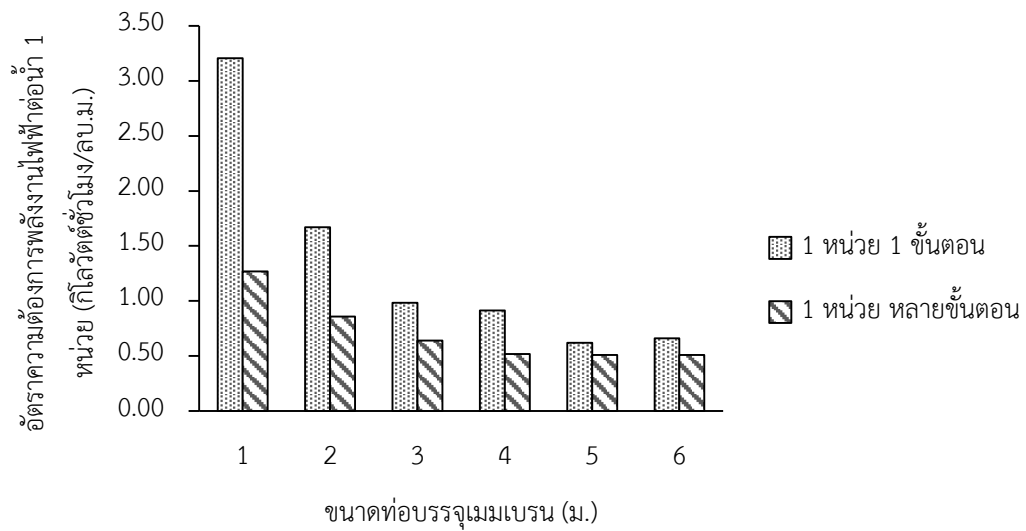
ภาพที่ 4.21 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งหลังจากผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่ประสิทธิภาพร้อยละ 70 ระหว่างการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน



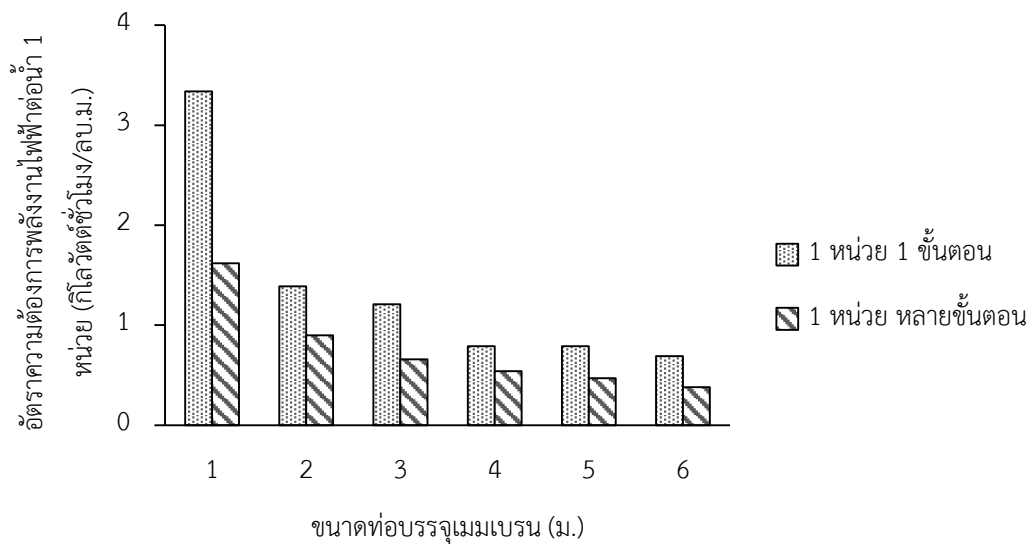
**ภาพที่ 4.22** เปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งหลังจากผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่ประสิทธิภาพร้อยละ 80 ระหว่างการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน

ในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณไฟฟ้าเฉลี่ยในการผลิตน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์-ชม./ลบ.ม.) จากภาพที่ 4.23 - ภาพที่ 4.26 แสดงผลเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานในการบำบัดน้ำ 1 หน่วยของประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่ขนาดท่อบรรจุเมมเบรน 1 - 6 เมตร ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน และแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน พบว่าการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน ใช้พลังงานในการผลิตน้ำต่อหน่วยสูงกว่าแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยเฉพาะท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 1 - 2 ม. จะเห็นได้ว่ามีอัตราการบริโภคพลังงานไฟฟ้าเกือบ 2 เท่า ของแบบ 1 หน่วยหลายขั้นตอน และลดลงตามขนาดท่อบรรจุที่ยาวขึ้นแม้ว่าจะมีความต้องการพื้นที่เมมเบรนต่างกันเล็กน้อย ยกเว้นที่รูปแบบการออกแบบของประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ที่ใช้ท่อบรรจุขนาด 6 ม. ที่มีอัตราการบริโภคพลังงานไฟสูงกว่าแบบที่ใช้ท่อบรรจุ ขนาด 5 ม. เมื่อพิจารณาความต้องการพื้นที่เมมเบรนแล้วใช้พื้นที่สูงกว่า จึงสามารถรองรับอัตราการกรองที่สูงกว่าได้ จึงสามารถรองรับช่วงของอัตราการเวียนน้ำได้สูงกว่า ทำให้อัตราการบริโภคไฟฟ้าเฉลี่ยมีช่วงที่กว้างกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการตั้งค่าของผู้พัฒนาซอฟต์แวร์ ซึ่งความต้องการพลังงานนี้จะนำไปประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในขั้นตอนต่อไป

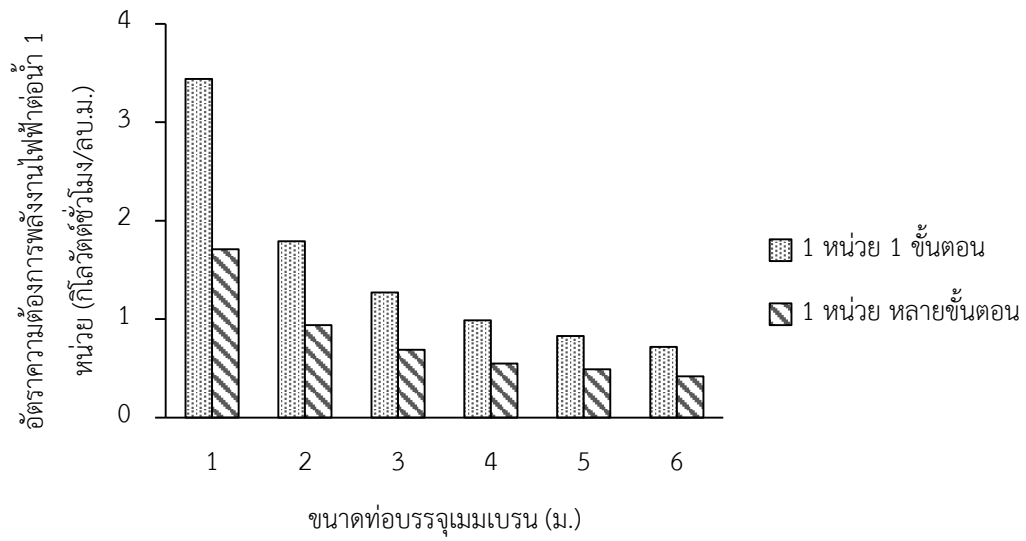




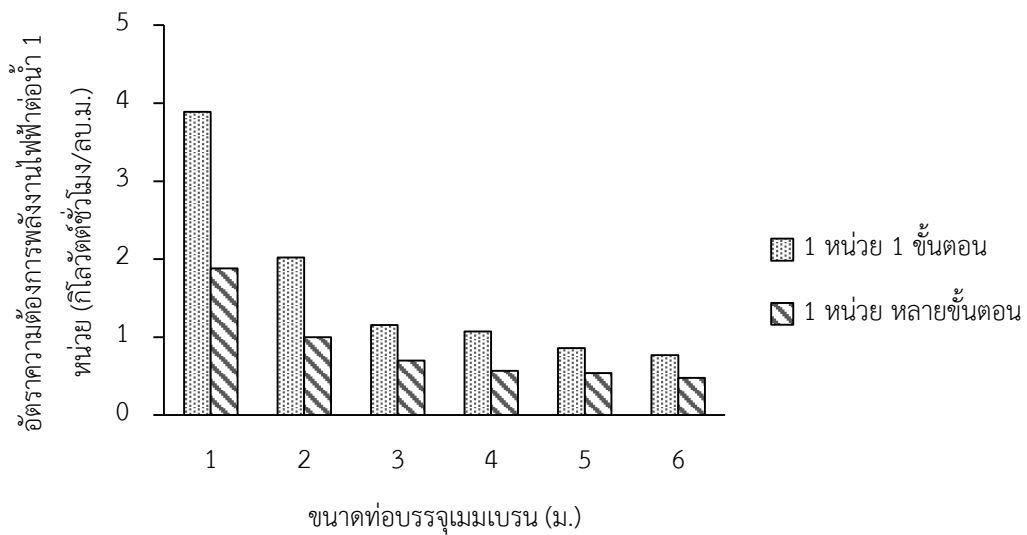
ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 50 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน



ภาพที่ 4.24 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 60 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน



ภาพที่ 4.25 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 70 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน



ภาพที่ 4.26 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพร้อยละ 80 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน และ แบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน

จากผลการทดลองอัตราการเวียนน้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสจะเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดรูปแบบระบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง เพราะนอกจากอัตราการเวียนน้ำจะเป็นการลดปริมาณน้ำที่เข้าสู่ระบบแล้วยังเป็นการทำให้น้ำอยู่ในระบบยาวนานขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำทิ้งอีกด้วย จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัดนั้น อยู่ที่ 80 ลบ.ม./ชม. การเพิ่มอัตราการเวียนน้ำที่ให้ปริมาณน้ำเข้าสู่ระบบมีปริมาณที่สูงขึ้น (เกินกว่า 80 ลบ.ม./ชม.) จึงไม่มีความจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำที่เป็นน้ำเสียและพื้นที่ใช้งานไม่ได้มีความขาดแคลนน้ำ นอกจากนี้ อัตราการเวียนน้ำทิ้งนี้จะส่งผลต่อขนาดของเครื่องสูบน้ำแรงดันสูงที่อยู่ภายในระบบรีเวิร์สออสโมซิส ซึ่งอัตราการเวียนน้ำทิ้งโดยปกติจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10 - 30 ของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบรีเวิร์สออสโมซิส (กรรณิการ์ มินสิรินันท์, **สัมภาษณ์**, 14 ธันวาคม 2557) ซึ่งจะได้อัตราการเวียนน้ำร้อยละ 30 ของประสิทธิภาพร้อยละ 50 60 70 และ 80 อยู่ที่ 12 9.6 7.2 และ 4.8 ลบ.ม./ชม. ตามลำดับ ดังนั้นรูปแบบการออกแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงจึงเหลือรูปแบบการออกแบบที่ประสิทธิภาพต่างๆ ตามตารางที่ 4.4 ได้แก่ ประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 50 ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 เมตร ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน มีอัตราการเวียนน้ำอยู่ที่ 4 - 43 ลบ.ม./ชม. ประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 50 ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 5 และ 6 เมตร ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน มีอัตราการเวียนน้ำอยู่ที่ 0 - 6 ลบ.ม./ชม. ประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 60 ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 เมตร ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน ไม่มีอัตราการเวียนน้ำ และประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 70 ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน มีอัตราการเวียนน้ำอยู่ที่ 6 - 16 ลบ.ม./ชม. ซึ่งผลการออกแบบจะนำไปประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

**ตารางที่ 4.4** ผลการออกแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

ประสิทธิภาพ (%)	อัตราการเวียนน้ำสูงสุด (ลบ.ม./ชม.)	1 หน่วย 1 ชั้นตอน		1 หน่วย หลายชั้นตอน	
		อัตราการเวียนน้ำ (ลบ.ม./ชม.)	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	อัตราการเวียนน้ำ (ลบ.ม./ชม.)	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)
50	12	4 - 43	6	5 - 6	4
				ไม่มี - 6	5
				ไม่มี - 6	6
60	9.6	-	-	ไม่มี	6
70	7.2	-	-	6 - 16	6

- ไม่มีรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้

### 4.3 การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสต่อการบำบัดน้ำเสียจากหอหล่อเย็น

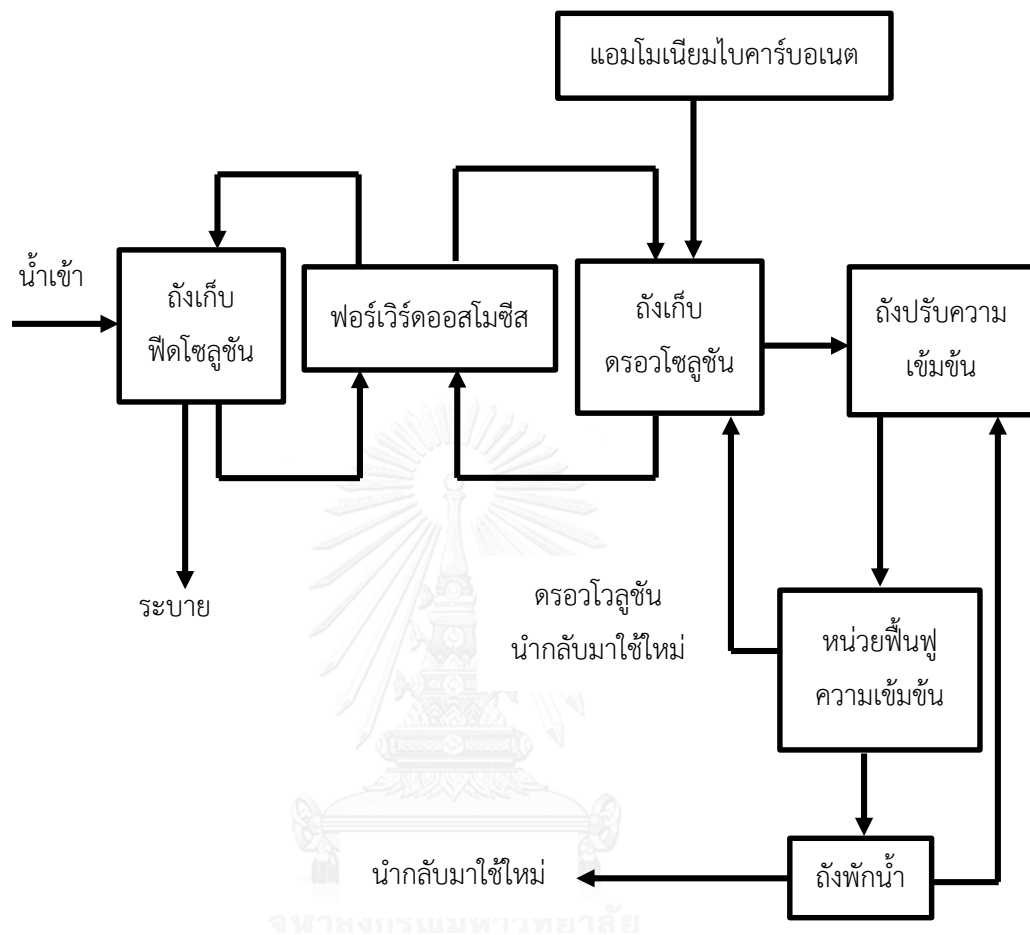
#### 4.3.1 การทดสอบเบื้องต้น

ในเบื้องต้นของการทดลองโดยการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบขึ้นมา โดยเมมเบรนที่ใช้ในการทดลองเป็นเมมเบรนรีเวิร์สออสโมซิสรุ่น TW30-1812-50 ตัดแผ่นเมมเบรนตามภาพที่ 3.2 ซึ่งมีพื้นที่ผิวกรอง 60 ตร.ซม. ผลิตโดยบริษัท FILMTEC ใช้เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง คือ เครื่องสูบน้ำชนิดดันใบพัดด้วยระบบแม่เหล็กในการสูบน้ำ่วงรอบของดรอว์โซลูชันและวงรอบฟีดโซลูชัน โดยกำหนดอัตราการไหลของทั้งฟีดโซลูชันและดรอว์โซลูชันให้คงที่ที่ 10 ล./นาท. แรงดัน 1 บาร์ โดยใช้ฟีดโซลูชันเป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 700 มก./ล. เมื่อคำนวณแรงดันออสโมติกของน้ำทิ้งจากหอหล่อเย็นโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA พบว่าน้ำทิ้งให้แรงดันออสโมติกเริ่มต้นที่ประมาณ 0.6 บาร์ และโซเดียมคลอไรด์ยังเป็นสารละลายที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงที่สุดในองค์ประกอบของน้ำทิ้ง จึงใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวแทนน้ำเสียในการทดสอบเบื้องต้น ส่วนดรอว์โซลูชันกำหนดแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 3,950 7,900 15,800 23,700 31,600 และ 39,500 มก./ล. ระหว่างทำการทดลองพบว่าการควบคุมแรงดันน้ำให้คงที่ในระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสนั้นกระทำได้ยาก เมื่อเวลาผ่านไปแรงดันน้ำของดรอว์โซลูชันจะเริ่มลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากเมื่อน้ำเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนมายังฝั่งดรอว์โซลูชันจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตลดลง ส่งผลต่อฟลักซ์ที่ลดลง แต่แรงดันที่ลดลงนี้ส่งผลต่อการเดินระบบเพราะหากแรงดันน้ำของทางฝั่งฟีดโซลูชันสูงกว่าฝั่งดรอว์โซลูชัน การเดินระบบจะเปลี่ยนเป็นรูปแบบรีเวิร์สออสโมซิสทันที แต่หากแรงดันน้ำฝั่งดรอว์โซลูชันสูงกว่าก็จะเกิดการแพร่ของน้ำกลับไปยังฝั่งฟีดโซลูชันและทำให้เกิดความเสียหายต่อเมมเบรนทำให้เกิดการรั่วไหลของสารละลาย

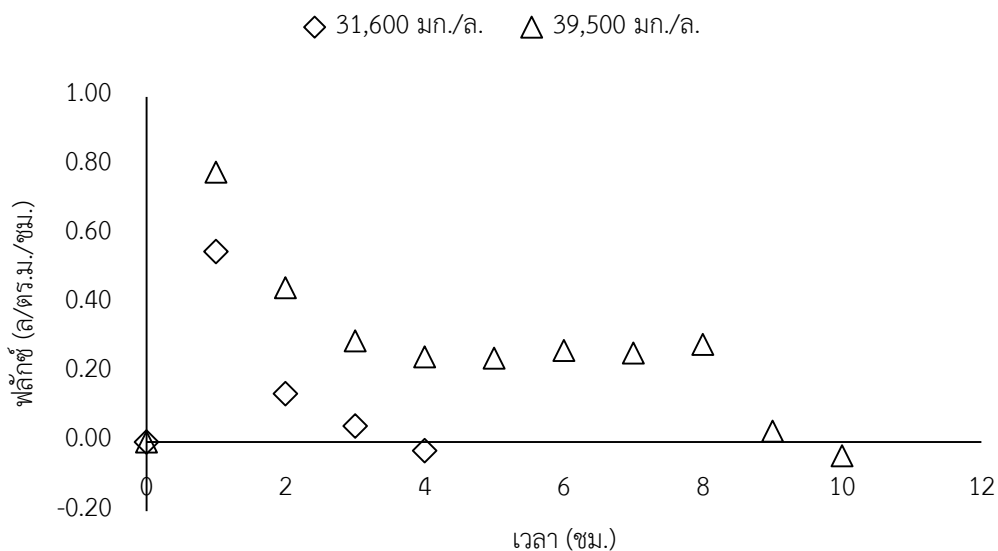
#### 4.3.2 ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าส่วนประกอบของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นไปตามภาพที่ 4.27 ดังนี้ 1 หน่วยเมมเบรนฟอร์เวิร์ดออสโมซิส ซึ่งจะเป็นส่วนที่เดินระบบหลักการบำบัดน้ำทิ้งจะเริ่มต้นจากส่วนนี้ น้ำจะถูกดึงมาจากฝั่งฟีดโซลูชันทำให้ฝั่งดรอว์โซลูชันมีความเข้มข้นของสารละลายลดลงจนถึงจุดที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง ดรอว์โซลูชันจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยฟื้นฟูความเข้มข้น โดยที่ก่อนเข้าสู่หน่วยฟื้นฟูความเข้มข้น จะมีการปรับความเข้มข้นให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการฟื้นฟู เมื่อดรอว์โซลูชันเข้าสู่กระบวนการฟื้นฟู ดรอว์โซลูชันและน้ำจะแยกออกจากกัน โดยดรอว์โซลูชันที่แยกแล้วจะนำกลับไปใช้งานยังถังเก็บดรอว์โซลูชันที่หน่วยเมมเบรนซึ่งหากความเข้มข้นที่ฟื้นฟูได้ไม่ถึงความเข้มข้นที่ต้องการจะมีการเติมดรอว์โซลูชันเพิ่มเติม โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่หน่วย

ฟื้นฟู ประสิทธิภาพการคัดแยก รวมถึงประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่นี้จะทำการศึกษาใน  
ขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 4.27 แผนผังระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส



**ภาพที่ 4.28** เปรียบเทียบการเดินระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสโดยใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต เป็นดรอว์โซลูชันระหว่างความเข้มข้น 31,600 มก./ล. และ 39,500 มก./ล.

ผลการทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 3,950 มก./ล. (0.05 โมลาร์) จนถึง ความเข้มข้น 39,500 มก./ล. (0.5 โมลาร์) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นก็จะให้แรงดันออสโมติกเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ให้แรงดันออสโมติกที่เพียงพอจนสามารถทำให้เกิดการแพร่จากฟีดโซลูชันมายังดรอว์โซลูชันได้คือ ที่ความเข้มข้น 23,700 มก./ล. (0.3 โมลาร์) ให้แรงดันออสโมติก 22.63 บาร์ และฟลักซ์จะหยุดนิ่งที่เวลาประมาณ 1.15 ชม. ได้ฟลักซ์เฉลี่ย 0.04 ล./ตร.ม./ชม. ที่ความเข้มข้น 31,500 มก./ล. ให้แรงดันออสโมติก 30.18 บาร์ และฟลักซ์จะหยุดนิ่งที่เวลาประมาณ 4 ชม. ได้ฟลักซ์เฉลี่ย 0.25 ล./ตร.ม./ชม. และที่ความเข้มข้น 39,500 มก./ล. ให้แรงดันออสโมติก 37.72 บาร์ และฟลักซ์จะหยุดนิ่งที่เวลาประมาณ 9 -10 ชม. ได้ฟลักซ์เฉลี่ย 0.32 ล./ตร.ม./ชม. (ภาพที่ 4.28) เมื่อคำนวณปริมาณความเข้มข้นสุดท้ายของฟีดและดรอว์โซลูชันพบว่าความเข้มข้นสุดท้ายก่อนที่ฟลักซ์จะหยุดลง คือ 703.6 มก./ล. (เพิ่มขึ้น 3.6 มก./ล.) และ 31,465 มก./ล. (ลดลง 134.5 มก./ล.) สำหรับดรอว์โซลูชันที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 31,600 มก./ล. และ 713.6 มก./ล. (เพิ่มขึ้น 13.6 มก./ล.) และ 38,777 มก./ล. (ลดลง 722.3 มก./ล.) สำหรับดรอว์โซลูชันที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 39,500 มก./ล.

ตารางที่ 4.5 จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุเมมเบรนของการทดลองที่ใช้ดรรวโซลูชันเป็น  
แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 31,600 มก./ล.

ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	50	60	70	80
ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลบ.ม./ชม.)	40	48	56	64
พื้นที่เมมเบรนที่ต้องการ (ตร.ม.)	160,000	192,000	224,000	256,000
จำนวนท่อบรรจุเมมเบรน (ท่อ)				
ขนาด 1 ม.	4,306	5,167	6,028	6,890
ขนาด 2 ม.	2,153	2,584	3,014	3,445
ขนาด 3 ม.	1,436	1,723	2,010	2,297
ขนาด 4 ม.	1,077	1,292	1,507	1,723
ขนาด 5 ม.	862	1,034	1,206	1,378
ขนาด 6 ม.	718	862	1,005	1,149
จำนวนเมมเบรนในท่อบรรจุ (ท่อน)				
ขนาด 1 ม.	4,306	5,167	6,028	6,890
ขนาด 2 ม.	4,306	5,168	6,028	6,890
ขนาด 3 ม.	4,308	5,169	6,030	6,891
ขนาด 4 ม.	4,308	5,168	6,028	6,892
ขนาด 5 ม.	4,310	5,170	6,030	6,890
ขนาด 6 ม.	4,308	5,172	6,030	6,894

**ตารางที่ 4.6** จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุเมมเบรนของการทดลองที่ใช้ดรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 39,500 มก./ล.

ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	50	60	70	80
ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลบ.ม./ชม.)	40	48	56	64
พื้นที่เมมเบรนที่ต้องการ (ตร.ม.)	125,000	150,000	175,000	200,000
จำนวนท่อบรรจุเมมเบรน (ท่อ)				
ขนาด 1 ม.	3,364	4,037	4,710	5,383
ขนาด 2 ม.	1,682	2,019	2,355	2,692
ขนาด 3 ม.	1,122	1,346	1,570	1,795
ขนาด 4 ม.	841	1,010	1,178	1,346
ขนาด 5 ม.	673	808	942	1,077
ขนาด 6 ม.	561	673	785	898
จำนวนเมมเบรนในท่อบรรจุ (ท่อน)				
ขนาด 1 ม.	3,364	4,037	4,710	5,383
ขนาด 2 ม.	3,364	4,038	4,710	5,384
ขนาด 3 ม.	3,366	4,038	4,710	5,385
ขนาด 4 ม.	3,364	4,040	4,712	5,384
ขนาด 5 ม.	3,365	4,040	4,710	5,385
ขนาด 6 ม.	3,366	4,038	4,710	5,388

จากผลการทดลองซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า การเพิ่มผลต่างความเข้มข้นเป็นการเพิ่มแรงดันออสโมติก ช่วยให้ได้ฟลักซ์ที่ยาวนานขึ้น (Junyou, 2011) ดังนั้นหากต้องการบำบัดน้ำให้ได้ประสิทธิภาพเทียบเท่ากับระบบรีเวิร์สออสโมซิส จึงจำเป็นต้องใช้เมมเบรนชนิดและขนาดท่อบรรจุเดียวกัน คือเมมเบรนรุ่น BW30-400-IG การนำฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองไปหาปริมาณน้ำตามประสิทธิภาพที่ต้องการบำบัดได้แก่ 40 48 56 และ 64 ลบ.ม./ชม. จากการคำนวณพบว่าเมื่อประสิทธิภาพสูงขึ้นระบบจะมีความต้องการเมมเบรนมากขึ้น ดังนั้นจะได้ขนาดพื้นที่ของเมมเบรนที่ต้องการแต่ละประสิทธิภาพการบำบัดคือ 160,000 192,000 224,000 และ 256,000 ตร.ม. ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้น 31,600 มก./ล. (ตารางที่ 4.5) และ 125,000 150,000 175,000 และ 200,000 ตร.ม. ตามลำดับสำหรับความเข้มข้น 39,500 มก./ล. (ตารางที่ 4.6) จากนั้นนำพื้นที่เมมเบรนมาหารพื้นที่ที่ได้ ซึ่งเมมเบรน 1 ท่อนมีพื้นที่ 37.16 ตร.ม. ดังนั้นจะได้จำนวนเมมเบรนขั้นต่ำ



ที่ต้องการ จากนั้นคำนวณหาจำนวนท่อบรรจุเมมเบรนที่ต้องการ ซึ่งท่อบรรจุมีขนาดตั้ง 1 – 6 ม. ซึ่งเมมเบรน 1 ท่อน มีขนาดยาว 1 เมตร นำจำนวนเมมเบรนหารด้วยขนาดท่อบรรจุ จำนวนที่ได้หากหารแล้วเป็นเลขทศนิยมให้ปรับค่าตัวเลขขึ้นให้เป็นเลขเต็มจำนวน จะได้จำนวนเมมเบรนที่ต้องใช้งานจริง จากการคำนวณพบว่าจำนวนเมมเบรนของแต่ละประสิทธิภาพที่ต้องการมีจำนวนใกล้เคียงกัน ดังนี้ 4,306 - 4,310 ท่อน 5,167 - 5,172 ท่อน 6,028 - 6,030 ท่อน และ 6,890 - 6,894 ท่อน ที่ประสิทธิภาพ 50 60 70 และ 80 ตามลำดับ สำหรับตรอวโซลูชันความเข้มข้น 31,600 มก./ล. และ 3,364 - 3,366 ท่อน 4,037 - 4,040 ท่อน 4,710 - 4,712 ท่อน และ 5,383 - 5,388 ท่อนที่ประสิทธิภาพ 50 60 70 และ 80 ตามลำดับ สำหรับตรอวโซลูชันความเข้มข้น 39,500 มก./ล. ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำของระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสจึงกระทำได้ 2 แนวทางคือ เพิ่มผลต่างความเข้มข้นของตรอวโซลูชันให้สูงขึ้นหรือเพิ่มพื้นที่เมมเบรน ซึ่งจำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุที่ได้จากการคำนวณนี้จะนำผลการคำนวณที่ได้ไปประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

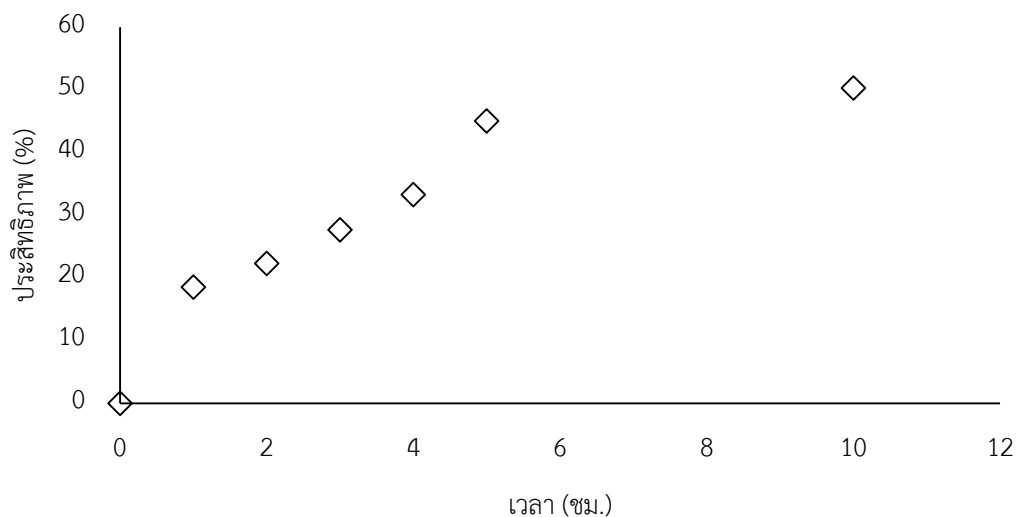
#### 4.4 การศึกษาการแยกตรอวโซลูชันออกจากน้ำและนำกลับมาใช้ใหม่

##### 4.4.1 การแยกตรอวโซลูชันออกจากน้ำ

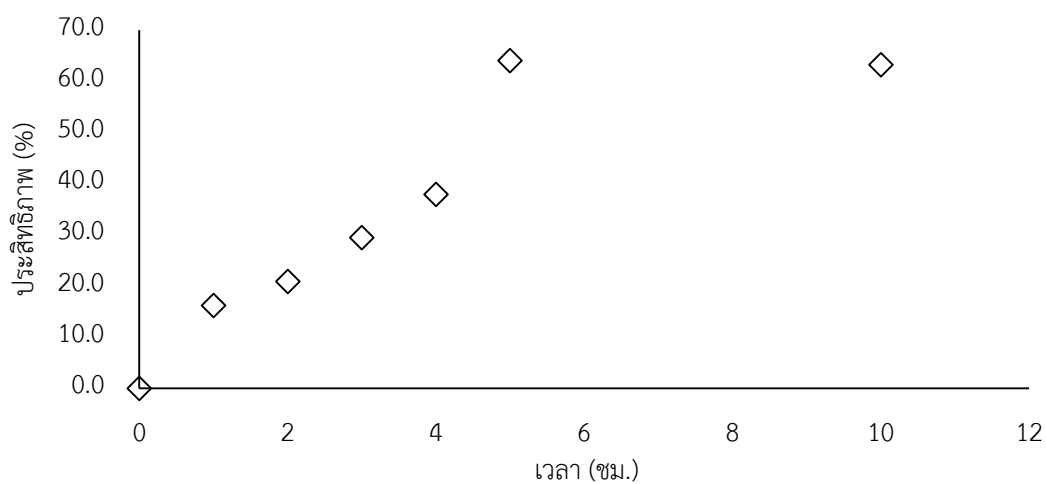
###### 4.4.1.1 การให้ความร้อนและการเป่าอากาศ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นส่วนของขั้นตอนต่อเนื่องของกระบวนการฟอว์เวิร์ดออสโมซิสเมื่อตรอวโซลูชันได้ใช้งานจนมีความเข้มข้นลดลง และส่งผลต่อฟลักซ์โดยรวมของระบบ โดยการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 3,950 7,900 15,800 23,700 31,600 และ 39,500 มก./ล. และให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส และทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาทุกชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชม. เพื่อคำนวณหาความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารละลาย โดยจะใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน เพื่อวัดหาปริมาณแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตในรูปของแอมโมเนียในสารละลาย โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 10 มล. ลงในบีกเกอร์ขนาด 10 มล. ใส่แท่งแม่เหล็กเพื่อทำการกวนลงในบีกเกอร์ จุ่มโพรบลงในบีกเกอร์ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 0.2 มล. ลงในบีกเกอร์ บันทึกค่ามิลลิโวลต์ที่ได้นำไปพล็อตกราฟในรูปแบบลอกกาลิทึม สร้างกราฟของสารละลายมาตรฐาน และเปลี่ยนความเข้มข้นให้อยู่ในรูปของมก./ล. จะได้ค่าปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมในหน่วยมก./ล. จากนั้นจึงนำไปคำนวณปริมาณความเข้มข้นในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตตามสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อทำการวัดตัวอย่างแล้วพบว่า การให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแยกสารละลายออกจากน้ำได้ ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนถึงไม่เปลี่ยนแปลงเลย จึงได้ทำการสร้างความปั่นป่วนให้กับระบบขณะทำการให้ความร้อน และใช้การเป่าอากาศเพื่อเป็น

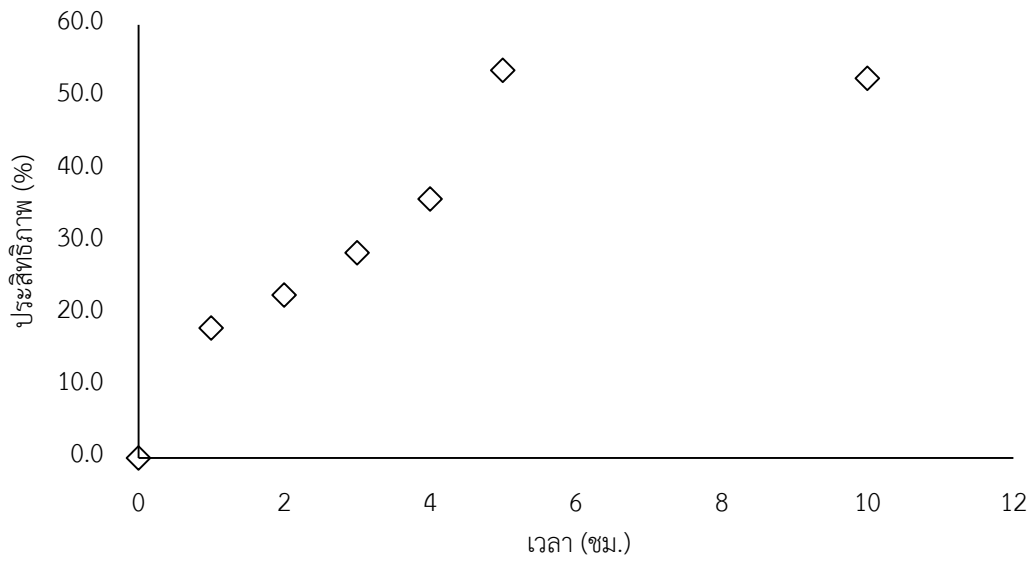
การสร้างความปั่นป่วน แล้วทำการทดลองอีกครั้งพบว่าสามารถแยกสารละลายออกจากน้ำได้มากขึ้น เป็นลำดับ (ภาพที่ 4.29 - ภาพที่ 4.34)



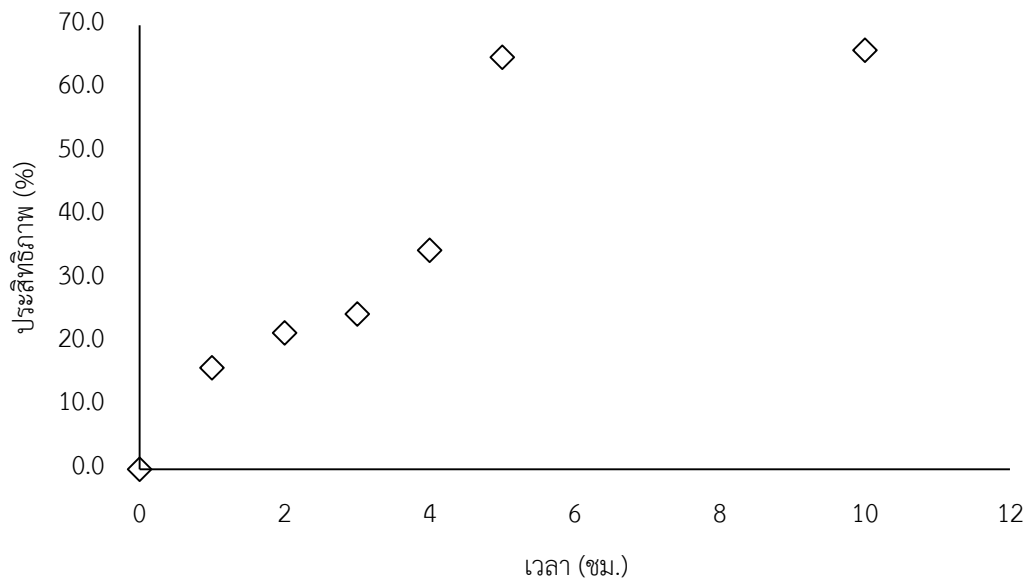
ภาพที่ 4.29 ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 3,950 มก./ล



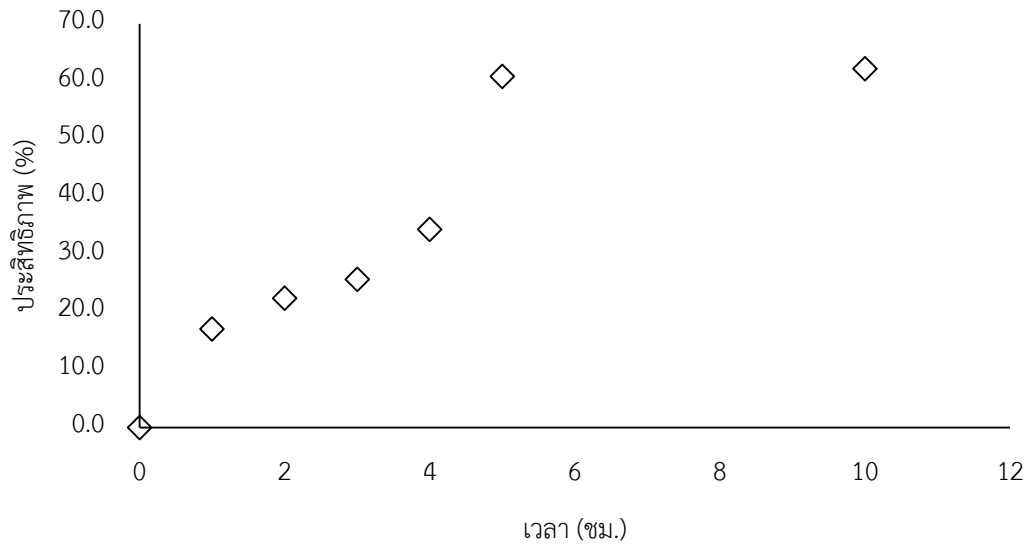
ภาพที่ 4.30 ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 7,900 มก./ล.



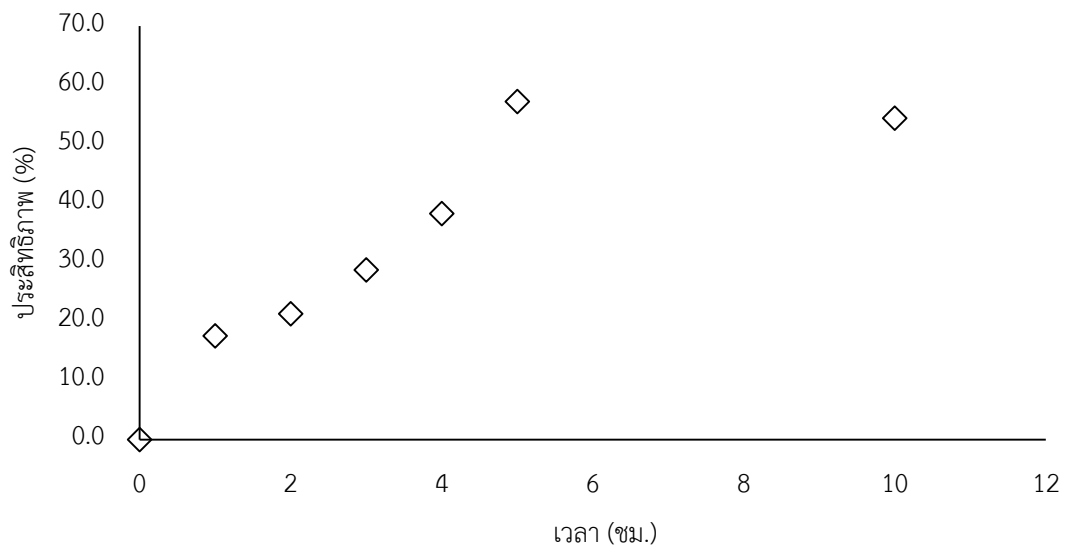
ภาพที่ 4.31 ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกดรอวโซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 15,900 มก./ล.



ภาพที่ 4.32 ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกดรอวโซลูชันออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 23,700 มก./ล.



ภาพที่ 4.33 ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกดรอไวรัสชั้นออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นเริ่ม 31,600 มก./ล.



ภาพที่ 4.34 ร้อยละประสิทธิภาพการคัดแยกดรอไวรัสชั้นออกจากสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นเริ่ม 39,500 มก./ล.

#### 4.4.1.2 เวลา

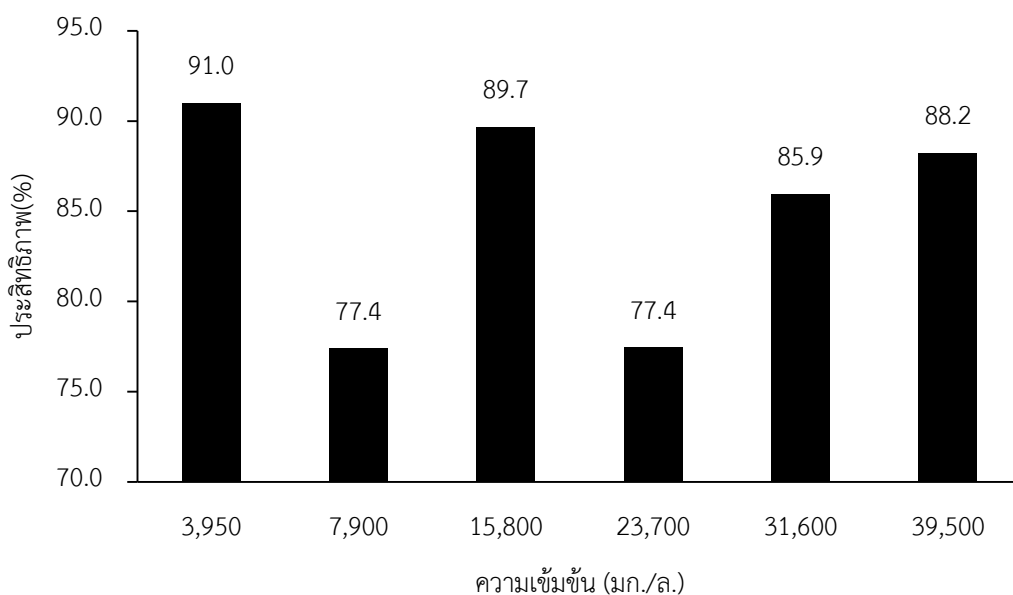
เนื่องจากในงานวิจัยที่ได้ทำการทบทวนเรื่องการคัดแยกดรอวโซลูชันออกจากน้ำไม่ได้ระบุไว้ว่าต้องทำการให้ความร้อนเป็นเวลานานเท่าใด จึงจะสามารถแยกสารละลายออกจากน้ำได้อย่างสมบูรณ์ แต่จากการทดลองพบว่า ในการหาเวลาที่เหมาะสมในการให้ความร้อนเพื่อให้ได้สารละลายที่มีปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานนั้นพบว่าถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนก็ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้สมบูรณ์ เมื่อทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์เป็นเวลาทุกๆ ชม. พบว่า ที่ 5 ชม. สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำได้กว่าร้อยละ 45 - 65 (เฉลี่ย 57.7) (ภาพที่ 4.29 - ภาพที่ 4.34) และเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 10 ชม. เนื่องจากคาดหวังว่าแอมโมเนียจะถูกกำจัดจนหมดไป แต่พบว่าประสิทธิภาพกลับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียคงเหลือในสารละลายมีความเข้มข้นใกล้เคียงกับที่เวลา 5 ชม.)

#### 4.4.1.3 ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต

ความเข้มข้นของสารละลายที่นำมาทดลองภายหลังเมื่อมีการให้ความร้อนและเป่าอากาศแล้ว พบว่าทุกความเข้มข้นให้ผลการทดลองที่เหมือนกันทุกความเข้มข้น คือการให้ความร้อนและเป่าอากาศเพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำได้ แต่หากมีการทำงานร่วมกันของการให้ความร้อนและการเป่าอากาศไปพร้อมๆ กันจะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้ ทุกความเข้มข้นมีพฤติกรรมเดียวกันคือความเข้มข้นลดลงมาเหลือประมาณร้อยละ 35 - 55 ซึ่งหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดให้ได้เพิ่มขึ้น ควรเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นกว่านี้ ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ามีบางจุดของการทดลองที่ประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการคุมอุณหภูมิที่ไม่คงที่

#### 4.4.2 การนำดรอวโซลูชันกลับมาใช้ใหม่

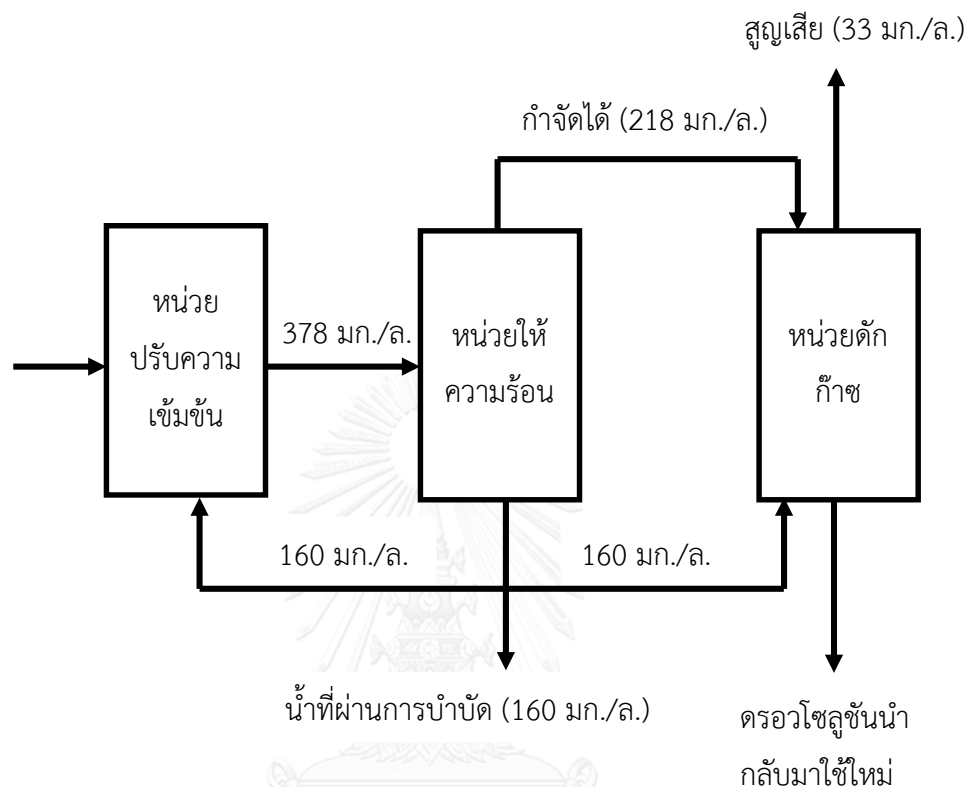
ตามทฤษฎีแล้วแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนรูปเป็น แอมโมเนียคาร์บอเนตไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งทั้งแอมโมเนียและคาร์บอเนตไดออกไซด์มีสถานะเป็นก๊าซ ดังนั้นจำเป็นต้องนำก๊าซดังกล่าวกลับมาใช้งานอีกครั้งโดยการนำก๊าซเป่าผ่านลงในน้ำ เพื่อให้กลับมาอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและนำกลับไปใช้งานเป็นดรอวโซลูชันอีกครั้งหนึ่ง จากการทดลองพบว่าสามารถนำกลับมาได้สูงถึงร้อยละ 77.4 - 91 (เฉลี่ย 84.9) ของสารละลายที่สามารถกำจัดได้ตามภาพที่ 4.35 โดยที่ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันนี้เป็นผลมาจากการติดตั้งอุปกรณ์อาจเกิดการรั่วไหลการกระจายตัวของหัวเป่าอากาศ รวมถึงระยะเวลาที่ก๊าซสัมผัสกับน้ำที่ไม่เพียงพอเพราะจะเห็นได้ว่ามีบางการผลทดลองประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 90



ภาพที่ 4.35 ร้อยละประสิทธิภาพการนำดรอวโซลูชันที่คัดแยกแล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เฉลี่ยของ ความเข้มข้นต่างๆ

ดังนั้นความเข้มข้นของดรอวโซลูชันที่เป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและใช้หน่วยฟื้นฟูความเข้มข้นเป็นกระบวนการทางความร้อนร่วมกับการเป่าอากาศที่เหมาะสมคือประมาณ 5 ชม. โดยหากตั้งประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทดลอง (ร้อยละ 57.7) คือคุณภาพน้ำเทียบเท่ากับน้ำป้อนของหอหล่อเย็นคือปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำมีค่าไม่เกิน 160 มก./ล. ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนที่จะทำการให้ความร้อนร่วมกับการเป่าอากาศ คือ 378 มก./ล. โดยประสิทธิภาพของการนำดรอวโซลูชันกลับมาที่ได้จากการทดลองคือ ร้อยละ 84.9 ดังนั้นจะสามารถนำดรอวโซลูชันกลับเข้าสู่ระบบได้ 102.3 มก./ล. และหลุดออกจากระบบไป 33 มก./ล. (ภาพที่ 4.36) และจากปริมาณความเข้มข้นสุดท้ายที่ได้คำนวณไว้ตั้งที่ได้กล่าวไปแล้ว เมื่อนำมาคำนวณกับปริมาตรของน้ำที่ต้องการบำบัดพบว่าหากใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 31,600 มก./ล. เป็นดรอวโซลูชัน จะต้องใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดในการปรับปริมาณความเข้มข้นของดรอวโซลูชันให้ลดลงเหลือ 378 มก./ล. ปริมาตร 5,737 6,885 8,032 และ 9,180 ลบ.ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ตามลำดับ ในขณะที่ใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 39,500 มก./ล. เป็นดรอวโซลูชัน จะต้องใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดในการปรับปริมาณความเข้มข้น 7,078 8,493 9,909 และ 11,324 ลบ.ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นสุดท้ายของการเดินระบบต่างกันทำให้ต้องใช้ปริมาตรน้ำในการปรับความเข้มข้นต่างกัน รวมถึงประสิทธิภาพการบำบัดที่เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งจะส่งผลต่อขนาดของถังเก็บน้ำสำรองและขนาดของหน่วยให้

ความร้อน ซึ่งความเข้มข้น 33 มก./ล. นี่เป็นส่วนที่ต้องเติมกลับเข้าสู่ระบบเพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของคลอโรไซลูชัน นำความเข้มข้นที่ต้องเติมกลับเข้าสู่ระบบและปริมาณของถังเก็บน้ำสำรองนี้ไปคำนวณหาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป



ภาพที่ 4.36 แผนผังแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของหน่วยฟื้นฟูความเข้มข้น

#### 4.5 การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

จากการทดลองที่ 2 - 4 ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียไปใช้งานในการบำบัดน้ำเสียจากหอหล่อเย็นและนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในเชิงวิศวกรรมนั้นสามารถกระทำได้ทั้ง 2 กระบวนการ (ทั้งกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส) ในการศึกษาขั้นตอนนี้จึงเป็นการนำส่วนต่างๆ ของหน่วยบำบัดทั้ง 2 กระบวนการ มาประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยต้นทุนส่วนต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ยูนิเทค จำกัด (กรรมการ มีนสิรินันท์, **สัมภาษณ์**, 14 ธันวาคม 2557) ซึ่งเป็นบริษัทที่ให้บริการด้านจำหน่ายอุปกรณ์ ติดตั้ง และ บำรุงรักษาระบบบำบัดน้ำ จากการประเมินทำให้ทราบข้อมูลต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ต่างๆ ดังนี้

#### 4.5.1 ต้นทุนการติดตั้ง

##### 4.5.1.1 หน่วยบำบัดเบื้องต้น

เนื่องจากกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสและระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นเทคโนโลยีเมมเบรน จำเป็นต้องมีหน่วยบำบัดเบื้องต้นเพื่อกำจัดสารแขวนลอยในน้ำที่จะเข้าสู่ระบบ เนื่องจากสารแขวนลอยจะเข้าไปอุดตันและสร้างความเสียหายต่อเมมเบรนส่งผลให้อายุการใช้งานสั้นลง ซึ่งหน่วยบำบัดเบื้องต้นที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ได้จากการทดลองที่ 2 คือ ถังกรองทรายและหน่วยกรองเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเทรชัน โดยการนำหน่วยต่างๆ จากการศึกษาขั้นที่ 2 มาประเมินต้นทุนติดตั้ง ซึ่งมูลค่าของการประเมินเป็นไปตามตารางที่ 4.7 โดยต้นทุนหลักจะอยู่ที่ถังกรองทราย เมมเบรนอัลตราฟิลเทรชัน ถังเก็บน้ำที่ผ่านการกรองจากเมมเบรนอัลตราฟิลเทรชันแล้ว และต้นทุนปลีกย่อยอื่นๆ ต้นทุนติดตั้งที่เกิดจากส่วนของหน่วยบำบัดเบื้องต้นรวมมีมูลค่า 16,310,000 บาท

##### ตารางที่ 4.7 ต้นทุนติดตั้งหน่วยบำบัดเบื้องต้น

รายการ	จำนวน	ราคา(บาท)
เครื่องสูบน้ำเข้าสู่ถังกรองทรายขนาด 80 ลบ.ม./ชม.	2	600,000
ถังกรองทราย	1	1,800,000
เครื่องสูบน้ำล้างย้อนของถังกรองทรายขนาด 120 ลบ.ม./ชม.	1	350,000
เมมเบรนอัลตราฟิลเทรชัน	20	5,000,000
ถังเก็บน้ำที่ผ่านการกรองแล้วของเมมเบรนอัลตราฟิลเทรชัน	1	2,000,000
เครื่องสูบน้ำล้างย้อนของอัลตราฟิลเทรชันขนาด 200 ลบ.ม./ชม	2	900,000
เครื่องสูบน้ำป้อนระบบรีเวิร์สออสโมซิสขนาด 80 ลบ.ม./ชม.	2	600,000
ระบบเติมสารเคมี		
- เครื่องป้อนคลอรีนและถังบรรจุ	1	30,000
- เครื่องป้อนโพลีเมอร์และถังบรรจุ	1	30,000
อื่นๆ เช่น งานเดินท่อ ไฟฟ้า ขนส่ง แรงงาน เป็นต้น		5,700,000
รวม		16,310,000



#### 4.5.1.2 ระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ในส่วนของระบบรีเวิร์สออสโมซิสและฟอร์เวิร์ดออสโมซิสจากที่ได้กระทำการออกแบบเพื่อการใช้งานตามการทดลองที่ 2 – 4 พบว่าในส่วนของระบบรีเวิร์สออสโมซิสประกอบด้วย ส่วนหลักๆคือเครื่องสูบน้ำแรงดันสูง 2 เครื่อง ทำงานที่ละ 1 เครื่อง ขนาด 80 ลบ.ม./ชม. อัตราการบริโภคน้ำไฟฟ้า 37 กิโลวัตต์-ชม. เครื่องป้อนสารเคมี 2 เครื่อง ป้อนสารป้องกันการเกิดตะกรันและโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (sodium metabisulphite,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) เมมเบรน ท่อบรรจุเมมเบรน เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงขึ้นความต้องการใช้งานพื้นที่เมมเบรนก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่เนื่องจากเมื่อมีการพิจารณาจำนวนเมมเบรนต่อท่อบรรจุแล้วพบว่าถึงแม้ว่าท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 1 เมตร จะให้แรงดันที่สูงกว่า เกิดแรงดันลดที่ต่ำกว่า แต่ก็ต้องการพื้นที่ติดตั้งสูงกว่าเช่นกัน อีกทั้งมูลค่าของท่อบรรจุเมมเบรนยังสูงกว่าเมมเบรน นอกจากนี้ยังใช้ส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ท่อ วาล์ว ข้อต่อ ข้องอ ฯลฯ เป็นจำนวนมากขึ้น ทำให้ส่งผลต่อต้นทุนการติดตั้ง ดังนั้นต้นทุนติดตั้งที่เกิดจากส่วนของเมมเบรนในระบบรีเวิร์สออสโมซิส จากการทดลองทำให้ทราบถึงกรณีที่สามารถทำการออกแบบเพื่อการใช้งานจริงได้ จึงทำให้ทราบต้นทุนติดตั้งตามตารางที่ 4.8 แต่การติดตั้งในส่วนของระบบรีเวิร์สออสโมซิสนั้น จะรวมมาเป็นชุดสำเร็จเรียกว่าชุดสกิด (Skid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ เช่น โครงสร้างเมมเบรน ท่อบรรจุ เครื่องสูบน้ำ ระบบไฟแยกต่างหาก เป็นต้น ซึ่งต้นทุนติดตั้งในแต่ละรูปแบบที่ทำการประเมินได้นั้นเป็นเพียงจำนวน และท่อบรรจุเท่านั้น ยังไม่ได้รวมส่วนอื่นๆ ในชุดสกิดซึ่งไม่สามารถประเมินได้จนกว่าจะนำรูปแบบที่ต้องการติดตั้งจริงไปนำเสนอกับผู้จัดจำหน่ายอีกครั้ง ซึ่งจะเลือกใช้รูปแบบใดนั้นจะพิจารณาในลำดับต่อไป

ตารางที่ 4.8 ต้นทุนติดตั้งระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ประสิทธิภาพ (%)	1 หน่วย 1 ชั้นตอน		1 หน่วย หลายชั้นตอน	
	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ต้นทุน (บาท )	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ต้นทุน (บาท)
50	6	1,278,000	4	1,372,000
			5	1,440,000
			6	1,562,000
60	-	-	6	1,846,000
70	-	-	6	1,988,000

- ไม่มีรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้

#### 4.5.1.3 ระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

ในขณะที่ระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสนั้นก็มีความต้องการเมมเบรนเช่นเดียวกันกับระบบรีเวิร์สออสโมซิส แต่ใช้เมมเบรนชนิดที่แตกต่างออกไป เนื่องจากเมมเบรนไม่ต้องรับแรงดันมาทางด้านนั้นจึงใช้เมมเบรนชนิด TW30-1812-50 ทำการทดลอง แต่พบว่าเมมเบรนรุ่นดังกล่าวได้ทำการเลิกผลิตและจัดจำหน่ายเพื่อการอุตสาหกรรมแล้ว เหลือแต่เพียงขนาดที่ใช้ตามครัวเรือนเท่านั้น ทำให้จำเป็นต้องเปลี่ยนรุ่นของเมมเบรนเป็น BW30-400 IG แทน ซึ่งเมมเบรนทั้ง 2 เป็นเมมเบรนชนิดเดียวกัน แต่ BW30-400 IG สามารถรองรับการทำงานที่หลากหลายกว่า จากการทดลองที่ 3 โดยนำจำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุตามตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.6 มาประเมินพบว่า ต้นทุนติดตั้งของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสที่มีการใช้ตรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 31,600 มก./ล. มีต้นทุนติดตั้ง 124,932,000 - 268,710,000 บาท (ตารางที่ 4.9) และ 97,614,000 - 209,937,000 (ตารางที่ 4.10) สำหรับระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสที่มีการใช้ตรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 39,500 มก./ล. ซึ่งเพียงต้นทุนติดตั้งนี้ยังไม่รวมในส่วนของหน่วยฟื้นฟูความเข้มข้นที่สูงกว่าระบบรีเวิร์สออสโมซิสทั้งระบบกว่า 10 เท่า ซึ่งหากต้องการลดต้นทุนในส่วนนี้ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มผลต่างของความเข้มข้นของสารละลายให้สูงขึ้น แต่จากงานวิจัย ของ McCutcheon และคณะ (2005) ที่ใช้ตรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 6 โมลาร์ หรือ 474,000 มก./ล. มาใช้ในการทดลองกับโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์หรือ 29,220 มก./ล. โดยใช้เมมเบรนชนิดเดียวกัน ก็สามารถทำการทดลองได้ผลลัพธ์เพียง 0.175 ล./ตร.ม./ชม. (0.1 แกลลอน/ตร.ฟุต/วัน ) เท่านั้น ซึ่งหากเทียบผลต่างอัตราความเข้มข้นจากที่ได้ทำการทดลอง การทดลองของ McCutcheon และคณะ (2005) ซึ่งจะได้ว่าความเข้มข้นต่างกัน 16 เท่า แต่จากการทำการทดลองนั้นต่างกันถึง 56 เท่า หรือกระทำการเปลี่ยนชนิดของเมมเบรนให้เป็นชนิดที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสโดยเฉพาะ ซึ่งในขณะนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศ ดังนั้นจึงไม่ประเมินต้นทุนในส่วนอื่นๆ ของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส เพราะยังเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการบำบัดน้ำในระดับอุตสาหกรรม

**ตารางที่ 4.9** ต้นทุนติดตั้งของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสในส่วนของเมมเบรนและท่อบรรจุที่มีการใช้  
ดรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 31,600 มก./ล.

ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	50	60	70	80
มูลค่าท่อและเมมเบรน (บาท)				
ขนาด 1 ม.	167,934,000	201,513,000	235,092,000	268,710,000
ขนาด 2 ม.	142,098,000	170,544,000	198,924,000	227,370,000
ขนาด 3 ม.	133,548,000	160,239,000	186,930,000	213,621,000
ขนาด 4 ม.	129,240,000	155,040,000	180,840,000	206,760,000
ขนาด 5 ม.	126,714,000	151,998,000	177,282,000	202,566,000
ขนาด 6 ม.	124,932,000	149,988,000	174,870,000	199,926,000

**ตารางที่ 4.10** ต้นทุนติดตั้งของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสในส่วนของเมมเบรนและท่อบรรจุที่มีการใช้  
ดรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 39,500 มก./ล.

ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	50	60	70	80
มูลค่าท่อและเมมเบรน (บาท)				
ขนาด 1 ม.	131,196,000	157,443,000	183,690,000	209,937,000
ขนาด 2 ม.	111,012,000	133,254,000	155,430,000	177,672,000
ขนาด 3 ม.	104,346,000	125,178,000	146,010,000	166,935,000
ขนาด 4 ม.	100,920,000	121,200,000	141,360,000	161,520,000
ขนาด 5 ม.	98,931,000	118,776,000	138,474,000	158,319,000
ขนาด 6 ม.	97,614,000	117,102,000	136,590,000	156,252,000

#### 4.5.2 ต้นทุนการเดินระบบ

ในส่วนของต้นทุนการเดินระบบของระบบรีเวิร์สออสโมซิส เนื่องจากระบบรีเวิร์สออสโมซิส  
อาศัยแรงดันน้ำเป็นแรงดันในการขับเคลื่อนระบบ ดังนั้นต้นทุนในส่วนนี้จึงเป็นพลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก  
จากภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.11 ทำให้ทราบว่าเครื่องสูบน้ำ 7 เครื่อง ขนาด 80 ลบ.ม./ชม. จำนวน  
4 เครื่อง แบ่งเป็นสูบน้ำเข้าถังกรองทราย 2 เครื่อง สลับกันทำงานครั้งละ 1 เครื่อง อัตราการ  
บริโภคพลังงาน 345 กิโลวัตต์/วัน เข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส 2 เครื่อง สลับกันทำงานครั้งละ 1  
เครื่อง อัตราการบริโภคพลังงาน 360 กิโลวัตต์/วัน ขนาด 200 ลบ.ม./ชม. ทำงาน 1 เครื่อง ใช้ในการ  
ล้างย้อนหน่วยอัลตราฟิลเทรชันทุกๆ ครั้งชม. เป็นเวลาประมาณ 3 นาที อัตราการบริโภคพลังงาน 46

กิโลวัตต์/วัน และขนาด 120 ลบ.ม./ชม. 1 เครื่อง ทำการล้างย้อนถังกรองทราย 15 – 30 นาที/วัน หรือ นาที/2 วัน มีอัตราการบริโภคพลังงาน 5.5 กิโลวัตต์/วัน ส่วนเครื่องป้อนสารเคมีมีอัตราการบริโภคพลังงานไฟฟ้าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ จึงไม่นำส่วนนี้มาคำนวณ ดังนั้นจึงมีอัตราการบริโภคพลังงานรวม 741.5 กิโลวัตต์/วัน เมื่อคำนวณความต้องการพลังงาน โดยที่ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 3.5 บาท/กิโลวัตต์ (กรณีการ มีนสิรินันท์, **สัมภาษณ์**, 14 ธันวาคม 2557) ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าต้นทุนเดินระบบจากส่วนของเครื่องสูบน้ำของหน่วยบำบัดเบื้องต้นรวมอยู่ที่ 2,648 บาท/วัน หรือ 79,432.5 บาท/เดือน

#### ตารางที่ 4.11 ต้นทุนพลังงานเดินระบบ

เครื่องสูบน้ำ			พลังงาน			ต้นทุน	
ขนาด (ลบ.ม./ชม.)	จำนวน (เครื่อง)	ทำงาน (ชม./วัน)	อัตราการ บริโภค (กิโลวัตต์/ชม.)	วัน (กิโลวัตต์)	เดือน (กิโลวัตต์)	วัน (บาท)	เดือน (บาท)
80	1	23	15	345	10,350	1,208	72,450
80	1	24	15	360	10,800	1,260	37,800.
120	1	0.5	11	5.5	165	19	578
200	1	2.3	20	46	1,380	161	4,830
			รวม	757	22,695	2,648	79,433

จากการศึกษาขั้นตอนที่ 2 จะได้รูปแบบของระบบบริเวร์สออสโมซิสที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ทั้งนี้อัตราการบริโภคพลังงานของระบบบริเวร์สออสโมซิสนั้นมีค่าไม่เท่ากันขึ้นกับรูปแบบของการออกแบบระบบบริเวร์สออสโมซิสว่าต้องการประสิทธิภาพที่ร้อยละการบำบัดเท่าใด และใช้ขนาดและจำนวนของท่อบรรจุและเมมเบรนว่าขนาดใดและเป็นจำนวนเท่าใด ดังนั้นจึงคำนวณจากอัตราการบริโภคพลังงานของระบบบริเวร์สออสโมซิสที่ได้จากการออกแบบเป็นไปตามตารางที่ 4.12 ซึ่งจะได้ต้นทุนเดินระบบดังนี้ ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนที่ขนาด 6 ม. มีอัตราการบริโภคไฟฟ้าอยู่ที่ 607.2 กิโลวัตต์/วัน มีต้นทุนเดินระบบอยู่ที่ 2,125.2 บาท/วัน ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนที่ขนาด 4 5 และ 6 ม. มีอัตราการบริโภคไฟฟ้าอยู่ที่ 478.4 469.2 และ 469.2 กิโลวัตต์/วัน มีต้นทุนเดินระบบอยู่ที่ 1,674.4 1,642.2 และ 1,642.2 บาท/วัน ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 ของการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนที่ขนาด 6 ม. มีอัตราการบริโภคไฟฟ้าอยู่ที่ 419.52 กิโลวัตต์/วัน มี

ต้นทุนเดินระบบอยู่ที่ 1,468.3 บาท/วัน ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 ของการออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนที่ขนาด 6 ม. มีอัตราการบริโภคไฟฟ้าอยู่ที่ 540.96 กิโลวัตต์/วัน มีต้นทุนเดินระบบอยู่ที่ 1,893.4 บาท/วัน แต่เนื่องจากการเดินระบบรีเวิร์สออสโมซิสนั้น จะมีเครื่องสูบน้ำแรงดันสูงเพื่อสร้างแรงดันติดตั้งอยู่ภายในชุดสก็ดอีกจำนวน 2 เครื่อง สลับการทำงานครั้งละ 1 เครื่อง โดยที่การกำหนดประสิทธิภาพจะถูกควบคุมโดยวาล์วน้ำที่ทางออกของเมมเบรน เครื่องสูบน้ำดังกล่าวมีขนาด 80 ลบ.ม./ชม. มีอัตราการบริโภคพลังงาน 891 กิโลวัตต์/วัน 2,978.5 บาท/วัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการประเมินจึงคำนวณต้นทุนเดินระบบที่เกิดจากอัตราการบริโภคไฟฟ้ารวม (หน่วยบำบัดเบื้องต้นและระบบรีเวิร์สออสโมซิส) เป็นค่าเดียวคือ 5,756 บาท/วัน หรือ 172,672.5 บาท/เดือน

#### ตารางที่ 4.12 ต้นทุนเดินระบบในส่วนของพลังงานต่อวัน

ประสิทธิภาพ (%)	1 หน่วย 1 ขั้นตอน			1 หน่วย หลายขั้นตอน		
	ความต้องการพลังงาน (กิโลวัตต์/วัน)	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ต้นทุน (บาท/วัน)	ความต้องการพลังงาน (กิโลวัตต์/วัน)	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ต้นทุน (บาท/วัน)
50	607.2	6	2,125.2	478.4	4	1,674.4
				469.2	5	1,642.2
				469.2	6	1,642.2
60	-	-	-	419.52	6	1,468.3
70	-	-	-	540.96	6	1,893.4

- ไม่มีรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้

และนอกจากนี้ต้นทุนเดินระบบยังมีส่วนของสารเคมีต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 4.13 ดังนี้ โพลีเมอร์ความเข้มข้น 1 มก./ล. ดังนั้นน้ำปริมาตร 80 ลบ.ม./ชม.จะต้องใช้ 80 กรัม/ชม. ตลอดเวลาที่มีการเดินระบบเป็นเวลา 23 ชม./วัน จะได้ 1.84 ล./วัน คิดเป็นต้นทุน 552 บาท/วัน คลอรีนความเข้มข้น 1 มก./ล. ดังนั้นน้ำปริมาตร 80 ลบ.ม./ชม.จะต้องใช้ 80 กรัม/ชม.ตลอดเวลาที่มีการเดินระบบเป็นเวลา 23 ชม./วัน จะได้ 1.84 ล./วัน คิดเป็นต้นทุน 92 บาท/วัน สารเคมีป้องกันการเกิดตะกรันความเข้มข้น 4 มก./ล. ดังนั้นจะต้องใช้ 320 ก./ชม. ตลอดเวลาที่มีการเดินระบบเป็นเวลา 2 ชม./วัน จะได้ 7.68 ล./วัน คิดเป็นต้นทุน 3,072 บาท/วัน โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เติมพร้อมกับสารเคมีป้องกันการเกิดตะกรันความเข้มข้น 2 มก./ล. หรืออัตราส่วน 1 ต่อ 2 ของคลอรีนที่ป้อนเข้าไป เพื่อลดปริมาณคลอรีนก่อนเข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส ดังนั้น จะต้องใช้ 3.84 ล./วัน คิดเป็นต้นทุน 384

บาท/วัน นอกจากนี้ยังมีส่วนอื่นๆ เช่น คาทริจฟิลเตอร์รูปทรงขนาด 5 ไมครอน ในระบบรีเวิร์สออสโมซิสสำหรับคาทริจฟิลเตอร์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำที่จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนทุกเดือน เดือนละ 2 ครั้ง โดยคาทริจฟิลเตอร์ 1 ท่อนนี้จะมีขนาดตั้งแต่ 10 – 50 นิ้ว ซึ่งจะบรรจุอยู่ในถังบรรจุที่ต้องสั่งทำขึ้นใหม่ตามรูปแบบของการจัดวางและขนาดที่ใช้ งาน ซึ่งในระดับอุตสาหกรรมจะมีการใช้งานตั้งแต่ขนาด 30 นิ้วขึ้นไป ในงานวิจัยนี้เลือกขนาด 40 นิ้ว เนื่องจากหากเลือกที่ขนาด 30 นิ้ว จะใช้จำนวนที่มากส่งผลต่อขนาดถังบรรจุที่มีความต้องการพื้นที่ด้านกว้าง ส่วนขนาด 50 นิ้ว ถึงแม้ว่าจะสามารถรองรับการอัตราการกรองได้สูงขึ้นก็ตามแต่คาทริจฟิลเตอร์ขนาด 50 นิ้ว จะมีความยาวถึง 1.25 ม. ซึ่งในการติดตั้งคาทริจฟิลเตอร์จะติดตั้งในแนวตั้ง ลำบากต่อการเปลี่ยนถ่าย เพราะเนื่องจากคาทริจฟิลเตอร์นี้จะยาวเป็นชิ้นเดียวกันไม่ได้แยกส่วนดังเช่นโมดูลเมมเบรนของรีเวิร์สออสโมซิส ดังนั้นจึงเลือกขนาด 40 นิ้ว ซึ่งคาทริจฟิลเตอร์ขนาด 10 นิ้ว จะสามารถรองรับอัตราการกรองได้ถึง 1 ลบ.ม. เพื่อรองรับน้ำที่ต้องการบำบัดปริมาตร 80 ลบ.ม./ชม. จึงต้องใช้งาน 20 ท่อน เป็นอย่างน้อย แต่ในการออกแบบเพื่อการใช้งานจริงจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการออกแบบที่ 1.25 ดังนั้นจำนวนที่ใช้ งานจริงคือ 25 ท่อน ซึ่งคิดเป็นต้นทุน 2,167 บาท/วัน ดังนั้นต้นทุนรวมที่เกิดจากส่วนของสารเคมี และคาทริจฟิลเตอร์จะอยู่ที่ 6,267 บาท/วัน หรือ 188,000 บาท/เดือน และเมื่อนำต้นทุนเดินระบบ จากทั้ง 2 ส่วนรวมเข้าด้วยกันจะมีต้นทุนเดินระบบอยู่ที่ 12,022 บาท/วัน หรือ 360,673 บาท/เดือน ซึ่งต้นทุนในส่วนนี้จะนำไปประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำ 1 หน่วย ต่อไป

#### ตารางที่ 4.13 ต้นทุนเดินระบบในส่วนของสารเคมีและคาทริจฟิลเตอร์

สารเคมี	ปริมาณ	หน่วย	ต้นทุน	หน่วย	ต้นทุน (บาท)	
					วัน	เดือน
โพลีเมอร์	1.84	ล./วัน	300	บาท/กก.	552	16,560
คลอรีน	1.84	ล./วัน	50	บาท/กก.	92	2,760
สารป้องกันการเกิดตะกรัน	7.68	ล./วัน	400	บาท/กก.	3,072	92,160
โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	3.84	ล./วัน	100	บาท/กก.	384	11,520
คาทริจฟิลเตอร์	50	ท่อน	650	บาท/ท่อน	2,167	65,000
				รวม	6,267	188,000

#### 4.5.3 ต้นทุนการบำรุงรักษา

ในส่วนของต้นทุนการบำรุงรักษาเป็นส่วนที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ให้ยืนยาว เช่น ถังกรองทรายเปลี่ยนสารกรองทุก 2 ปี เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทุก 5 ปี เมมเบรนระบบรีเวิร์สออสโมซิส 2 ปี เป็นต้น แต่ทั้งนี้อายุการใช้งานสามารถยืดหยุ่นได้ตามระยะเวลาในการใช้งาน เช่น หากมีการทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอก็อาจสามารถยืดอายุของเมมเบรนออกไปได้ถึง 5 ปี เป็นต้น นอกจากการทำความสะอาดโดยการล้างย้อนแล้ว ยังมีการทำความสะอาดโดยการใช้สารเคมีอีกด้วย ซึ่งอาจเป็นหน้าที่ของผู้จำหน่ายหรือผู้ใช้งานซึ่งต้นทุนในส่วนนี้จะกระทำการประเมินได้ยากเนื่องจากผู้ให้บริการแต่ละรายกำหนดราคาไว้ไม่เท่ากัน เช่น ในส่วนของอัลตราฟิลเตรชันค่าบริการจะอยู่ที่ประมาณ 1000 บาทต่อท่อน ดังนั้นค่าบริการจะอยู่ที่ประมาณ 20,000 บาท ระบบรีเวิร์สออสโมซิสทำความสะอาดทุก 1 เดือน สำหรับน้ำเสีย แต่หากเป็นน้ำประปา จะทำความสะอาดทุกๆ 2 เดือน ค่าบริการเมมเบรนท่อนละประมาณ 800 บาท จะอยู่ที่ประมาณ 40,000 – 50,000 บาทต่อครั้ง ทั้งนี้ที่เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันราคาสูงกว่าเนื่องจากมีอัตราการกรองที่สูงกว่าจึงใช้สารเคมีในการทำความสะอาดสูงกว่า เป็นต้น แต่โดยทั่วไปต้นทุนในส่วนนี้จะคิดเป็นร้อยละ 10 ของต้นทุนการติดตั้ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าต้นทุนในส่วนนี้ขึ้นอยู่กับต้นทุนติดตั้งและอายุการใช้งานของส่วนประกอบต่างๆ โดยเฉพาะเมมเบรนทั้งรีเวิร์สออสโมซิสและอัลตราฟิลเตรชัน เมื่อถึงอายุการใช้งานก็ต้องทำการเปลี่ยนเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการประเมินต้นทุนในส่วนของต้นทุนบำรุงรักษาจึงเป็นไปตามตารางที่ 4.14 พบว่าที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน มีต้นทุนบำรุงรักษาอยู่ที่ 296,883 บาท/เดือน ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 5 และ 6 ม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน มีต้นทุนบำรุงรักษาอยู่ที่ 302,000 311,033 และ 324,783 บาท/เดือน ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน มีต้นทุนบำรุงรักษาอยู่ที่ 352,683 บาท/เดือน และ ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน มีต้นทุนบำรุงรักษาอยู่ที่ 366,633 บาท/เดือน ซึ่งต้นทุนในส่วนนี้จะนำไปประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำ 1 หน่วย ต่อไป

ตารางที่ 4.14 ต้นทุนบำรุงรักษาของระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ประสิทธิภาพ (%)	1 หน่วย 1 ชั้นตอน		1 หน่วย หลายชั้นตอน	
	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ต้นทุน (บาท )	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ต้นทุน (บาท)
50	6	296,883	4	302,000
			5	311,033
			6	324,783
60	-	-	6	352,683
70	-	-	6	366,633

- ไม่มีรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้

#### 4.5.4 การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

ในการประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำ 1 หน่วย จากการประเมินต้นทุนทั้ง 3 ส่วน คือ ต้นทุนติดตั้ง ต้นทุนเดินระบบและต้นทุนบำรุงรักษา สามารถสรุปได้ว่าในส่วนของต้นทุนติดตั้งนั้นประกอบไปด้วยส่วนของระบบบำบัดเบื้องต้น 16,310,000 บาท และส่วนของระบบรีเวิร์สออสโมซิส ซึ่งต้นทุนในส่วนนี้จะขึ้นกับประสิทธิภาพที่ต้องการการบำบัดต่างๆ ที่มีความต้องการพื้นที่เมมเบรนและท่อบรรจุที่ไม่เท่ากัน จากผลการทดลองจึงได้รูปแบบดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ต้นทุนในส่วนนี้จึงอยู่ที่ 1,278,000 - 1,988,000 บาท และในส่วนของต้นทุนเดินระบบจะเกิดจากส่วนของพลังงานไฟฟ้า สารเคมีและค่าทริคไฟลเตอร์อยู่ที่ 360,673 บาท/เดือน และต้นทุนบำรุงรักษาซึ่งต้นทุนในส่วนนี้จะเกิดจากการเปลี่ยนเมมเบรนและส่วนประกอบต่างๆ ที่เสียหายเมื่อมีการใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งจากการประเมินพบว่าต้นทุนบำรุงรักษาของระบบรีเวิร์สออสโมซิสประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. จะอยู่ที่ 296,883 บาท/เดือน ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 5 และ 6 ม. จะอยู่ที่ 302,000 311,033 และ 324,783 บาท/เดือน ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม.จะอยู่ที่ 352,683 บาท/เดือน และประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม.จะอยู่ที่ 366,633 บาท/เดือน การประเมินต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัดจะเป็นการนำต้นทุนเดินระบบและบำรุงรักษารวมเข้าด้วยกันและนำไปหารปริมาณน้ำที่บำบัดได้จึงจะได้ต้นทุนในการบำบัดน้ำ 1 หน่วย ซึ่งผลการคำนวณเป็นไปตามตารางที่ 4.15 พบว่าที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ที่มีการใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ให้ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด 22.83



บาท/ลบ.ม ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ที่มีการใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 5 และ 6 ม. ให้ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด 23.01 23.32 และ 23.80 บาท/ลบ.ม ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ที่มีการใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ให้ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด 24.77 บาท/ลบ.ม ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ที่มีการใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ให้ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด 25.25 บาท/ลบ.ม ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้นทุนที่ส่งผลต่อต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัดนั้นคือ ต้นทุนติดตั้งซึ่งจะส่งผลต่อมายังต้นทุนบำรุงรักษา ด้วยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าจะสามารถนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้มากขึ้น แต่ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัดก็จะสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.15 ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด

ประสิทธิภาพ (%)	1 หน่วย 1 ขั้นตอน		1 หน่วย หลายขั้นตอน	
	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ต้นทุน (บาท/ลบ.ม.)	ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ต้นทุน (บาท / ลบ.ม.)
50	6	22.83	4	23.01
			5	23.32
			6	23.80
60	-	-	6	24.77
70	-	-	6	25.25

- ไม่มีรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้

ถึงแม้ว่าทุกรูปแบบของการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสจะมีศักยภาพเพียงพอในการบำบัดน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่หากพิจารณาตามต้นทุนของน้ำที่ทางโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโอเลฟินส์ซื้อจากผู้จัดจำหน่ายในปัจจุบันที่ 18 บาท/ลบ.ม. (กรณีการ มีนสิรินันท์,สัมภาษณ์,14 ธันวาคม 2557) พบว่า แต่ยังเป็นวิธีการบำบัดน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ที่ไม่คุ้มค่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาอัตราและทิศทางการใช้น้ำและองค์ประกอบของน้ำเสียโบลวดาวน์จากหอหล่อเย็น

พบว่าเมื่ออัตราการใช้น้ำที่ปริมาตร 600 – 700 ลบ.ม./ชม.ที่มีปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำระหว่าง 120 – 162 มก./ล. และทำให้เกิดน้ำทิ้งที่มีปริมาตร 80 ลบ.ม./ชม.ค่าปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำระหว่าง 884 – 1,207 มก./ล.

#### 5.1.2 หน่วยบำบัดเบื้องต้น

น้ำทิ้งที่ต้องการนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสต้องมีค่า SDI น้อยกว่า 5 เป็นอย่างน้อย ดังนั้นจึงต้องมีหน่วยบำบัดเบื้องต้น โดยหน่วยบำบัดเบื้องต้นนี้ประกอบไปด้วยหน่วยกรองทรายและหน่วยอัลตราฟิลเทรชัน ซึ่งสามารถลดค่าความขุ่นของน้ำทิ้งลงได้เหลือน้อยกว่า 4 เอ็นทียู สำหรับถังกรองทราย และ 0.4 เอ็นทียู ซึ่งทำให้ค่าเอสดีไอที่น้อยกว่า 3

#### 5.1.3 ผลการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส

ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 สามารถนำน้ำกลับมาได้ 40 – 64 ลบ.ม./ชม. ลดการปล่อยน้ำเสียลงได้คิดเป็นร้อยละ 20 - 50 และทุกประสิทธิภาพมีศักยภาพในการบำบัดน้ำให้ได้คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วตามที่ต้องการคือ มีปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำมีค่าไม่เกิน 160 มก./ล. และคุณภาพน้ำทิ้งมีค่าปริมาณความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำตามมาตรฐานน้ำทิ้งคือ ไม่เกิน 5,000 มก./ล. ซึ่งร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความต้องการพื้นที่เมมเบรน แรงดัน ซึ่งจะส่งผลไปยังความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้การออกแบบระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ยังใช้พื้นที่เมมเบรนน้อยกว่าแบบ 1 หน่วย 2 ชั้นตอน เล็กน้อย แต่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 2 ชั้นตอน กลับมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งระบบน้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยเฉพาะที่การใช้งานท่อบรรจุขนาด 1 – 2 ม. และจากการออกแบบยังพบว่ารูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงคือ การออกแบบให้เดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ที่ประสิทธิภาพร้อยละ 50 ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. การออกแบบให้เดินระบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน ที่ประสิทธิภาพร้อยละ 50 ใช้ท่อบรรจุ 4 และ 6 ม. ที่ประสิทธิภาพร้อยละ 60 ใช้ท่อบรรจุ 6 ม. และที่ประสิทธิภาพร้อยละ 70 ใช้ท่อบรรจุ 6

ม. เพราะอัตราการเวียนน้ำทิ้งที่ผ่านการกรองแล้วเวียนกลับมากรองใหม่อยู่ระหว่างร้อยละ 10 –30 ของน้ำทิ้งที่ผ่านการกรอง คือ ไม่เกิน 12 9.6 7.2 และ 4.8 ลบ.ม./ชม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัด ร้อยละ 50 60 70 และ 80 ตามลำดับ

#### 5.1.4 การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของดรอวโซลูชันที่เป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต เพียงพอจนสามารถทำให้เกิดแรงดันออสโมติกจนเกิดการแพร่ของน้ำจากฝั่งฟีดโซลูชันที่เป็นโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 700 มก./ล. ที่มีแรงดันออสโมติก 0.6 บาร์ ข้ามมายังดรอวโซลูชันคือที่ความเข้มข้น 23,700 มก./ล. ให้แรงดันออสโมติก 22.63 บาร์ และฟลักซ์จะหยุดนิ่งที่เวลาประมาณ 1.15 ชม. ได้ฟลักซ์เฉลี่ย 0.02 ล./ตร.ม./ชม. ที่ความเข้มข้น 31,500 มก./ล. ให้แรงดันออสโมติก 30.18 บาร์ และฟลักซ์จะหยุดนิ่งที่เวลาประมาณ 4 ชม. ได้ฟลักซ์เฉลี่ย 0.25 ล./ตร.ม./ชม. และ ที่ความเข้มข้น 39,500 มก./ล. ให้แรงดันออสโมติก 37.72 บาร์ และฟลักซ์จะหยุดนิ่งที่ประมาณ 10 ชม. ได้ฟลักซ์เฉลี่ย 0.32 ล./ตร.ม./ชม. ทำให้มีความต้องการใช้เมมเบรนและท่อบรรจุ 4,306 - 4,310 ท่อน 5,167 - 5,172 ท่อน 6,028 - 6,030 ท่อน และ 6,890 - 6,894 ท่อน ที่ประสิทธิภาพ 50 60 70 และ 80 ตามลำดับ สำหรับดรอวโซลูชันความเข้มข้น 31,600 มก./ล. และ 3,364 - 3,366 ท่อน 4,037 - 4,040 ท่อน 4,710 - 4,712 ท่อน และ 5,383 - 5,388 ท่อนที่ประสิทธิภาพ 50 60 70 และ 80 ตามลำดับ สำหรับดรอวโซลูชันความเข้มข้น 39,500 มก./ล.

#### 5.1.5 การศึกษาการแยกดรอวโซลูชันออกจากน้ำ

จากการทดลองพบว่าต้องใช้การเป่าอากาศร่วมกับการให้ความร้อนจึงจะสามารถเพิ่มอัตราการแยกแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตออกจากสารละลายได้ โดยให้ความร้อนที่เวลา 5 ชม. จะสามารถแยกแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตออกจากสารละลายได้ร้อยละ 45-65 (เฉลี่ย 57.7) และถึงแม้ว่าจะเพิ่มเวลาถึง 10 ชม.แล้วประสิทธิภาพในการแยกสารละลายเพิ่มขึ้นจากชั่วโมงที่ 5 เพียงเล็กน้อย

#### 5.1.6 การศึกษาการนำดรอวโซลูชันกลับมาใช้ใหม่

จากการทดลองพบว่าการให้ความร้อนร่วมกับการเป่าอากาศตามสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตจะเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซแอมโมเนีย น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อก๊าซที่ออกมาผ่านลงน้ำอีกครั้ง พบว่าสามารถนำก๊าซแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาอีกครั้ง ได้ถึงร้อยละ 77.4 - 91 (เฉลี่ย 84.9) ของประสิทธิภาพการคัดแยก

### 5.1.7 การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

#### 5.1.7.1 ต้นทุนติดตั้ง

ในส่วนของต้นทุนติดตั้งพบว่า ในการออกแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิสจากรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ต้นทุนติดตั้งเกิดจากส่วนของระบบบำบัดเบื้องต้น 16,310,000 บาท และส่วนของระบบรีเวิร์สออสโมซิสตามตารางที่ 4.8 ในส่วนของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเมื่อทำการประเมินต้นทุนการติดตั้งแล้วพบว่ามีต้นทุนติดตั้ง 124,932,000 - 268,710,000 บาท (ตารางที่ 4.9) สำหรับระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสที่มีการใช้ตรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 31,600 มก./ล และมีต้นทุนติดตั้ง 97,614,000 - 209,937,000 (ตารางที่ 4.10) สำหรับระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสที่มีการใช้ตรอวโซลูชันเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 39,500 มก./ล. ซึ่งสูงกว่าระบบรีเวิร์สออสโมซิสมากเมื่อคิดเทียบที่ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่เท่ากัน ดังนั้นจึงเป็นวิธีที่ไม่คุ้มค่ากับปริมาณน้ำที่ได้และเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานเพื่อการบำบัดน้ำเสียโบลดวาร์จากหอหล่อเย็นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

#### 5.1.7.2 ต้นทุนเดินระบบ

ในส่วนของต้นทุนเดินระบบในระบบรีเวิร์สออสโมซิสพบว่า มีต้นทุนจาก 3 ส่วน คือ 1 สารเคมี (ตารางที่ 4.13) 2 คาทริจฟิลเตอร์ (ตารางที่ 4.13) และ 3.พลังงาน (ตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.12) ซึ่งต้นทุนในส่วนนี้จะพิจารณารวมต้นทุนจากทั้ง 3 ส่วน เพื่อให้สะดวกต่อการประเมิน พบว่ามีต้นทุนเดินระบบอยู่ที่ 12,022 บาท/วัน หรือ 360,673 บาท/เดือน

#### 5.1.7.3 ต้นทุนบำรุงรักษา

ในส่วนของต้นทุนบำรุงรักษาเนื่องจากส่วนนี้เป็นการประเมินได้ยาก เพราะไม่สามารถทราบได้เลยว่าอุปกรณ์ส่วนใดจะเกิดการชำรุดเสียหายก่อนถึงอายุการใช้งานและยังขึ้นกับผู้ให้บริการอีกด้วย ดังนั้นจึงกำหนดให้ต้นทุนในส่วนนี้คิดเป็นร้อยละ 10 ของต้นทุนการติดตั้ง นอกจากนี้ส่วนของเมมเบรนที่ต้องทำการเปลี่ยนเมื่อถึงอายุการใช้งาน เมมเบรนที่ต้องเปลี่ยนได้แก่ อัลตราฟิลเทรชันต้องทำการเปลี่ยนทุก 4 ปี และรีเวิร์สออสโมซิสทุก 1 ปี ดังนั้นต้นทุนในส่วนนี้จึงอยู่ที่ ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน มีต้นทุนบำรุงรักษาอยู่ที่ 296,883 บาท/เดือน ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 5 และ 6 ม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน มีต้นทุนบำรุงรักษาอยู่ที่ 302,000 311,033 และ 324,783 บาท/เดือน ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 ที่ใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน มีต้นทุน

บำรุงรักษาอยู่ที่ 352,683 บาท/เดือน และ ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 ที่ใช้ท่อบรรจุ เมมเบรนขนาด 6 ม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน มีต้นทุนบำรุงรักษาอยู่ที่ 366,633 บาท/เดือน

#### 5.1.7.4 ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด

ในส่วนของต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัด จากการทดลองพบว่าที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอนโดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 5 และ 6 ม. ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. และประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 ของการเดินระบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม. โดยให้ต้นทุนของน้ำที่ผ่านการบำบัดต่ำที่สุดคือ 22.83 23.01 23.32 23.80 24.77 และ 25.25 บาท/ลบ.ม. ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนของน้ำจากผู้จัดจำหน่าย ซึ่งมีต้นทุนอยู่ที่ 18 บาท/ลบ.ม. ดังนั้นในปัจจุบันระบบรีเวิร์สออสโมซิสทุกรูปแบบของการออกแบบจึงยังเป็นวิธีการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ที่ไม่คุ้มค่า

แต่อย่างไรก็ตามทางโรงงานอุตสาหกรรมก็ควรจะต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ระบบใดระบบหนึ่ง ทั้งนี้เมื่อหากว่ามีปัจจัยทั้งภายนอกและภายในต่างๆ ที่ส่งผลทำให้ต้นทุนของน้ำที่ซื้อจากผู้จัดจำหน่ายมีต้นทุนที่สูงขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน หรือในอนาคตหากมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งได้เปลี่ยนไป ที่นอกจากควบคุมเพียงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ ในน้ำทิ้ง มาเป็นการควบคุมปริมาณน้ำทิ้งที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมร่วมด้วย การบำบัดน้ำเพื่อให้ปริมาณความเข้มข้นขององค์ประกอบในน้ำทิ้งแต่เพียงอย่างเดียวก็จะไม่เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งอีกต่อไป อีกทั้งการลดการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมยังสื่อถึงการแสดงถึงความรับผิดชอบต่อ ความใส่ใจที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมขององค์กร เป็นการส่งเสริมภาพลักษณ์อันดีงามขององค์กรที่ปรากฏต่อสังคมอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตหากเมมเบรนของระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นที่แพร่หลายและมีการนำมาศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพอีกครั้ง การประเมินต้นทุนอาจจะสามารถประเมินได้ถูกต้องแม่นยำกว่าปัจจุบัน เนื่องจากเมมเบรนที่นำมาประเมินต้นทุนในงานวิจัยนี้ เป็นเมมเบรนที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส ซึ่งคุณสมบัติของเมมเบรนนั้นสามารถรองรับแรงกดดันที่สูงมากได้ แต่ในระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสไม่ได้ต้องการแรงดันสูงเพราะเนื่องจากแรงที่ใช้ขับเคลื่อนระบบเป็นแรงดันออสโมติกซึ่งเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารละลายและน้ำเสีย ซึ่งอาจจะสามารถเพิ่มฟลักซ์ให้สูงขึ้นได้นอกจากนี้ในส่วนของกระบวนการในการแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายนั้นความสำคัญของกระบวนการแยกโดยการให้ความร้อนนี้อยู่ที่การควบคุมอุณหภูมิและการเพิ่มอัตราการสัมผัสระหว่างก๊าซและน้ำในขั้นตอนการนำกลับมาใช้ใหม่ เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปน้ำจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซเช่นเดียวกับแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์และระเหยออกไป และหากการสัมผัสของก๊าซกับน้ำนั้นมีระยะเวลาสั้นเกินไปก๊าซจะหลุดออกจากระบบไปก่อนที่จะละลายกลับลงไปอยู่ในสารละลาย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. 2547. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 ( พ.ศ. 2539 ) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจาก แหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. สถานที่ผลิต: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. แหล่งที่มา: [http://infofile.pcd.go.th/law/3\\_4\\_water.pdf?CFID=8697540&CFTOKEN=31085878](http://infofile.pcd.go.th/law/3_4_water.pdf?CFID=8697540&CFTOKEN=31085878) [1 มีนาคม 2556]
- กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2555. การถอดตันจากการกรองน้ำด้วยระบบ RO. [ออนไลน์]. สถานที่ผลิต: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. แหล่งที่มา: [http://www.tistr.or.th/ed/images/stories/engineer/training/RO2012/3\\_membranefouling.pdf](http://www.tistr.or.th/ed/images/stories/engineer/training/RO2012/3_membranefouling.pdf) [18 สิงหาคม 2555]
- ภาศัลย์ ใจรังษี. 2547. การประยุกต์ใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2545. การปรับปรุงคุณภาพน้ำ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์, ไพพรรณ พรประภา และ มันรัชต์ ตัณฑุลเวศน์. 2554. การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปา ปรับปรุงใหม่ครั้ง 1. เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: สันติศิริ.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา เล่มที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สัมภาษณ์ กรณีการ มีนสิรินันท์. 2557. ผู้จัดการฝ่ายเทคนิค บริษัท ยูนิเทค จำกัด. 14 ธันวาคม 2557
- สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. 2553. โครงสร้างอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. [ออนไลน์]. สถานที่ผลิต: สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/petro/PT-Petrochemical.pdf> [18 สิงหาคม 2555]

- สุจิตรา พรรตณพิทักษ์. 2553. การวิเคราะห์ฟิสิกส์ของน้ำของกระบวนการผลิตภายในROC. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- แสวง เกิดประทุม. 2555. ทฤษฎีการกรองด้วยเมมเบรน. [ออนไลน์]. สถานที่ผลิต: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. แหล่งที่มา: <http://www.tistr.or.th/ed/images/stories/engineer/article/MembraneFiltration.pdf> [14 ตุลาคม 2555]
- อลงกต ตั้งจิตรนามกร. 2553. การควบคุมกระบวนการขั้นสูงสำหรับระบบกลั่นแยกC3ในกระบวนการผลิตโอเลฟินส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Achilli, A., Cath, T. Y., Marchand, E. A. and Childress, A. E. 2009. The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to MBR processes. *Desalination* 239: 10-21.
- Altaee, A. 2012. Computational model for estimating reverse osmosis system design and performance: Part-one binary feed solution. *Desalination* 291: 101-105.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21<sup>st</sup> ed. Washington DC: American Public Health Association.
- Batchelder, G. W. 1965. Process for the demineralization of water [online]. United State Patent. Available from: <http://www.freepatentsonline.com/3171799.pdf> [18 Sep 2012]
- Bruce S. Frank. 1972. Desalination of sea water [online]. United State Patent. Available from: <http://www.freepatentsonline.com/3670897.pdf> [18 Sep 2012]
- Cath, T. Y., Childress, A. E. and Elimelech, M. 2006. Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science* 281: 70-87.
- Chanukya, B. S., Patil, S. and Rastogi, N. K. 2013. Influence of concentration polarization on flux behavior in forward osmosis during desalination using ammonium bicarbonate. *Desalination* 312: 39-44.



- Cornelissen, E. R., Harmsen, D., de Korte, K. F., Ruiken, C. J., Qin, J.-J., Oo, H. and Wessels, L. P. 2008. Membrane fouling and process performance of forward osmosis membranes on activated sludge. *Journal of Membrane Science* 319: 158-168.
- Dow Chemical Company. 2008. Cooling tower blowdown reuse in Gaojing power plant [online]. Publish place: Dow chemical company. Available from: <http://www.dow.com/scripts/litorder.asp?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-02176.pdf> [18 sep 2012]
- Dow Chemical Company. 2012. Step to Design an RO/NF Membrane System. [online]. Publish place., Available from: [http://www.dowwaterandprocess.com/support\\_training/literature\\_manuals/lm\\_techinfo/designstps.htm](http://www.dowwaterandprocess.com/support_training/literature_manuals/lm_techinfo/designstps.htm) [17 Oct 2012]
- Dow Chemical Company. 2013a. ROSA Software [online]. Publish place: Dow Chemical Company Available from: [http://www.dowwaterandprocess.com/support\\_training/design\\_tools/rosa.htm](http://www.dowwaterandprocess.com/support_training/design_tools/rosa.htm) [20 Jan 2013]
- Dow Chemical Company. 2013b. Selecting a Flow Factor [online]. Publish place: Dow Chemical Company Available from: [http://dowac.custhelp.com/app/answers/detail/a\\_id/7046](http://dowac.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/7046) [20 Jan 2013]
- Dow Chemical Company. 2014. Product Information Bulletin. [online]. Publish place: Dow Chemical Company Available from: [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_08ae/0901b803808ae5f5.pdf?filepath=liquidsseps/pdfs/noreg/609-02188.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08ae/0901b803808ae5f5.pdf?filepath=liquidsseps/pdfs/noreg/609-02188.pdf&fromPage=GetDoc) [17 May 2014]
- Fane, A. G. 2007. Sustainability and membrane processing of wastewater for reuse. *Desalination* 202: 53-58.
- Junyou, Z. 2011. *Forward Osmosis Membrane Bioreactor for Water Reuse*. Master's thesis, Department of Civil and Environmental Engineering National University of Singapore.
- Kaliappan, S., Sathish, C. and Nirmalkumar, T. 2005. Recovery and reuse of water from effluents of cooling tower. *Indian Institute of Science* 85: 215 - 221.
- Kim, T.-w., Kim, Y., Yun, C., Jang, H., Kim, W. and Park, S. 2012. Systematic approach for draw solute selection and optimal system design for forward osmosis desalination. *Desalination* 284: 253-260.

- Koo, C. H., Mohammad, A. W. and Suja, F. 2011. Recycling of oleochemical wastewater for boiler feed water using reverse osmosis membranes — A case study. *Desalination* 271: 178-186.
- Kravath, R. E. and Davis, J. A. 1975. Desalination of sea water by direct osmosis. *Desalination* 16: 151-155.
- Lay, W. C. L., Zhang, J., Tang, C., Wang, R., Liu, Y. and Fane, A. G. 2012. Factors affecting flux performance of forward osmosis systems. *Journal of Membrane Science* 394-395: 151-168.
- Ling, M. M., Wang, K. Y. and Chung, T.-S. 2010. Highly Water-Soluble Magnetic Nanoparticles as Novel Draw Solute in Forward Osmosis for Water Reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 49: 5869-5876.
- McCutcheon, J. R., McGinnis, R. L. and Elimelech, M. 2005. A novel ammonia—carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process. *Desalination* 174: 1-11.
- McGinnis, R. 2002. *Osmotic desalination process [online]*. United State Patent. Available from: <http://www.freepatentsonline.com/7560029.pdf> [18 Sep 2012]
- Quintanilla, Y., Victor, Li, Z., Valladares, R., Li, Q. and Amy, G. 2011. Indirect desalination of Red Sea water with forward osmosis and low pressure reverse osmosis for water reuse. *Desalination* 280: 160-166.
- Ren, T., Patel, M. and Blok, K. 2006. Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. *Energy* 31: 425-451.
- Robert, A. M. 2005. Handbook of petrochemicals production processes. Newyork: McGraw-Hill companies.
- Shaffer, D. L., Yip, N. Y., Gilron, J. and Elimelech, M. 2012. Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: Improved product water quality for potentially less energy. *Journal of Membrane Science* 415–416: 1-8.
- Stache, K. 1989. *Apparatus for transforming sea eater, brackish water, polluted water or the like into a nutritious drink by means of osmosis [online]*. United State Patent. Available from: <http://www.freepatentsonline.com/4879030.pdf> [18 Sep 2012]

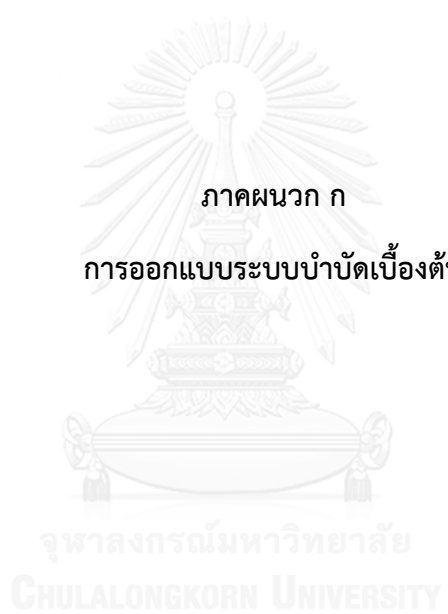
- Wintgens, T., Melin, T., Schäfer, A., Khan, S., Muston, M., Bixio, D. and Thoeye, C. 2005. The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse. *Desalination* 178: 1-11.
- Yen, S. K., Mehnas Haja N, F., Su, M., Wang, K. Y. and Chung, T.-S. 2010. Study of draw solutes using 2-methylimidazole-based compounds in forward osmosis. *Journal of Membrane Science* 364: 242-252.
- Zito, R. 2011. *Electrochemical Water Processing* 1<sup>st</sup> ed. New Jersey: Hoboken.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY





**Close Coupled Centrifugal Pumps  
with flanged connections**



**Construction**

Close-coupled centrifugal pumps; electric motor with extended shaft directly connected to the pump.  
Pump casing with axial suction and radial delivery on top, main dimensions and performance according to EN 733.

**Connections:** Flanges according to UNI 2236, UNI 2237, PN 10

**Counter-flanges** (on request)

Sizes	Flanges
from NM 32/... to NM 50/...	Screwed flanges UNI 2247, PN 16
from NM 65/... to NM 100/250	Flanges for welding UNI 2277, UNI 2278, PN 10

**Applications**

- For clean liquids without abrasives, which are non-aggressive for the pump materials (solids content up to 0.2%).
- For water supply.
- For heating, air conditioning, cooling and circulation plants.
- For civil and industrial applications.
- For fire fighting applications. - For irrigation.

**Operating conditions**

Liquid temperature up to 90° C.  
Ambient temperature up to 40° C.  
Total suction lift up to 7 m.  
Maximum permissible working pressure up to 10 bar.  
Continuous duty.

**Motor**

2-pole induction motor, 50 Hz (n = 2900 rpm).  
**NM:** three-phase 230/400 V ± 10% up to 3 kW;  
400/690 V ± 10% from 4 to 75 kW.

Insulation class F.  
Protection IP 54.  
Constructed in accordance with IEC 34.

**Special features on request**

- Other voltages. - Frequency 60 Hz (as per 60 Hz data sheet).
- Protection IP 55.- Special mechanical seal.
- Packed gland (only for NM standard construction).
- Single-phase motor (NMM) up to 1.5 kW. - Motor EEx-d II B T4.
- Higher liquid or ambient temperatures.

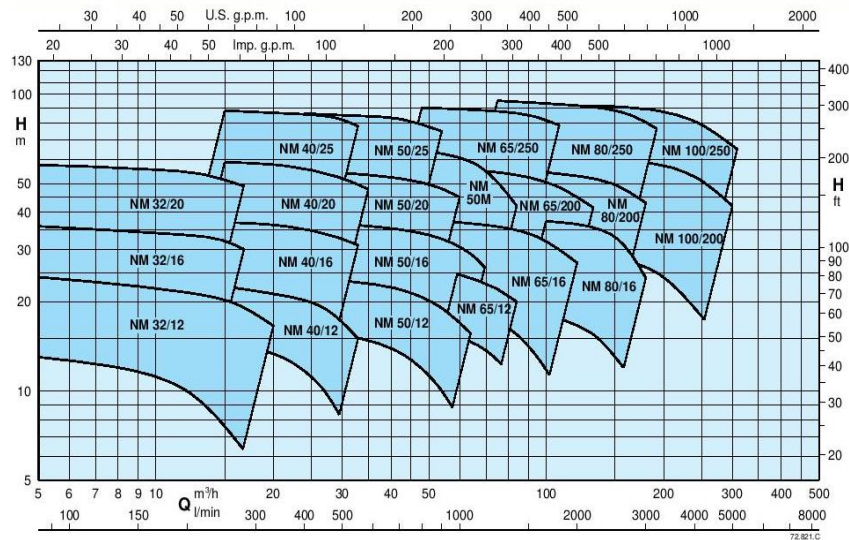
**Warranty**

One year (as per our general sales conditions).

**Materials**

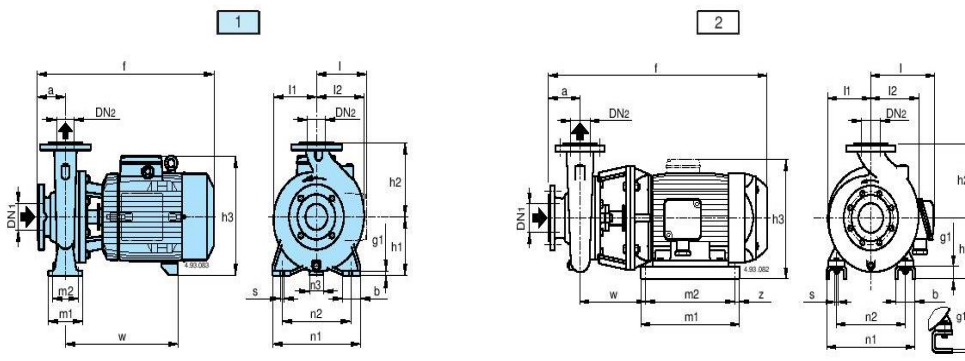
Components	NM	B-NM	I-NM
Pump casing	Cast iron	Bronze	Cr Ni Mo steel AISI 316
Lantern bracket	200 ISO 185	G-Cu Sn 10 UNI 7013	
Impeller	Cast iron 200 ISO 185	Bronze G-Cu Sn 10 UNI 7013	
Shaft	Brass P- Cu Zn 40 Pb 2 UNI 5705 for NM 32/12-16-20, NM 40/20 B-NM 32/125-160-200, B-NM 40/200		Cr Ni Mo steel AISI 316
	Cr Ni steel AISI 303 up to 2.2 kW	Cr Ni Mo steel AISI 316	
Mechanical seal	Carbon - Ceramic		
Counter-flanges	Steel Fe 430B UNI 7070		

**Coverage chart n 2900 rpm**

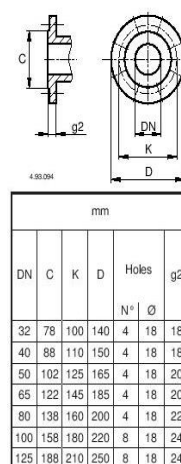


ภาพที่ ก.1 ข้อมูลลักษณะเฉพาะเครื่องสูบน้ำรุ่น NM 65/20 NM 80/16 และ NM 100/200  
(กรรณิการ์ มินสิรินันท์ , สัมภาษณ์, 14 ธันวาคม 2557)

**Dimensions and weights**



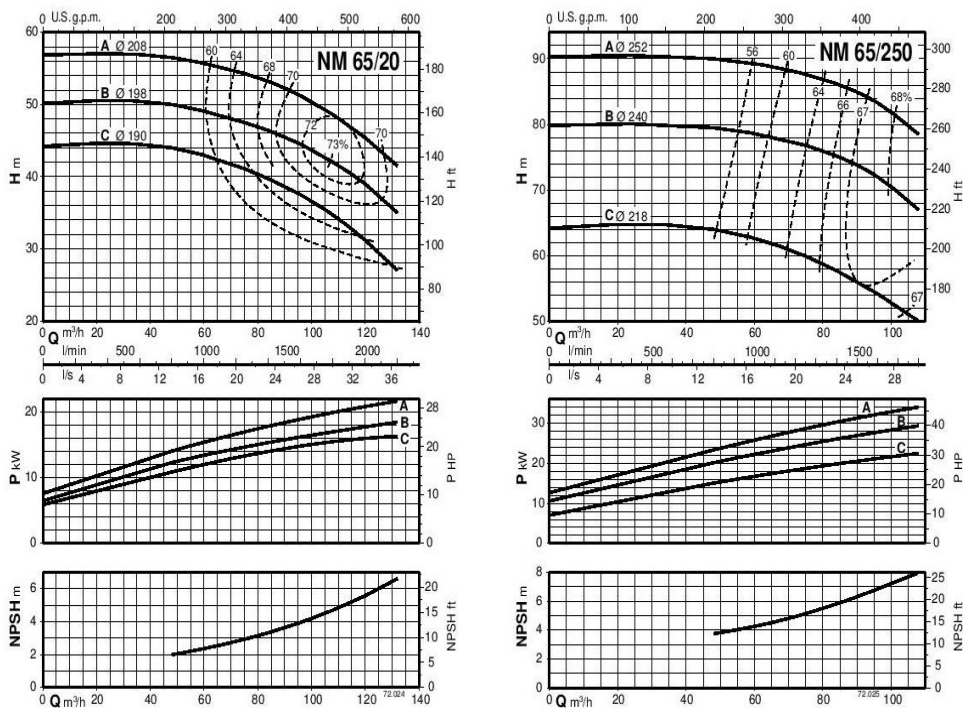
Picture	NM	mm																	kg			
		DN1	DN2	a	f	h1	h2	h3	m1	m2	n1	n2	n3	z	b	s	l	l1		l2	w	g1
1	NM 32/12SE-AE-DE-FE	50	32	80	405	112	140	222	100	70	190	140	37	-	50	14	-	93	97	245	12	31-32-31-29
	NM 32/16AE-BE	50	32	80	410	132	160	242	100	70	240	190	47	-	50	14	-	120	120	250	12	40-38
	NM 32/20DE	50	32	80	410	160	180	270	100	70	240	190	60	-	50	14	-	140	140	250	12	44
	NM 32/20CE				288			295												52		
	NM 32/20AE	470	288	295	55																	
	NM 40/12AE-CE-FE	65	40	80	410	112	140	222	100	70	210	160	37	-	50	14	-	100	113	250	12	36-34-35
	NM 40/16CE	65	40	80	410	132	160	242	100	70	240	190	45	-	50	14	-	119	119	250	12	41
	NM 40/16BE				260			295												50		
	NM 40/16AE				260			295												53		
	NM 40/20CE	65	40	100	490	160	180	288	100	70	265	212	60	-	50	14	-	140	140	295	12	58
	NM 40/20AE-ARE-BE				525			295												77-70-70		
	NM 40/25BE-CE	65	40	100	640	180	225	365	125	95	320	250	50	-	65	14	-	175	175	410	15	121-115
	NM 40/25AE				690			460												138		
	NM 50/12FE	65	50	100	430	132	160	242	100	70	240	190	45	-	50	14	-	121	137	250	12	43
	NM 50/12DE				490			295												51		
	NM 50/12AE				490			295												57		
	NM 50/16AE-BE	65	50	100	525	160	180	-	100	70	265	212	49	-	50	14	170	127	141	320	14	76-69
	NM 50/20AE-BE	65	50	100	640	160	200	345	100	70	265	212	40	-	50	14	-	140	153	410	15	113-105
	NM 50/25CE	65	50	100	645	180	225	365	125	95	320	250	50	-	65	14	-	175	175	415	15	124
	NM 50/25BE				695			465												141		
NM 50/25AE	720				465			152														
2	NM 50M/EE	65	50	100	700	192	225	377	298	258	262	216	-	20	69	12	-	175	175	239	6"	140
	NM 50M/DE				750															145		
	NM 50M/CE				775															173		
1	NM 65/12EE	80	65	100	490	160	180	288	125	95	280	212	60	-	65	14	-	134	156	295	15	62
	NM 65/12AE-CE				525			320												80-73		
	NM 65/16DE-EE	80	65	100	525	160	200	345	125	95	280	212	40	-	65	14	-	150	172	410	15	82-75
	NM 65/16BE-CE				690			460												113-107		
	NM 65/16AE				690			460												130		
NM 65/20CE	80	65	100	690	180	225	365	125	95	320	250	50	-	65	14	-	155	175	460	15	144	
NM 65/20BE				715			460												163			
2	NM 65/200AE	80	65	100	820	202	225	408	400	360	344	254	-	20	90	14	-	155	175	245	42	164
	NM 65/250BE-CE	80	65	100	820	202	250	408	400	360	344	254	-	20	90	14	-	175	190	245	42	198-177
	NM 65/250AE				945			263												339		
1	NM 80/16EE	100	80	125	545	180	225	365	125	95	320	250	50	-	65	14	-	170	193	320	15	92
	NM 80/16CE-DE				670			415												122-125		
	NM 80/16BE				720			465												139		
	NM 80/16AE				745			465												150		
2	NM 80/200AE-BE	100	80	125	845	202	250	408	400	360	344	254	-	20	90	14	-	170	194	245	42	198-177
	NM 80/250DE-EE	100	80	125	845	202	280	408	400	360	344	254	-	20	90	14	-	191	210	245	42	203-182
	NM 80/250AE-BE-CE				970			263												347		
2	NM 100/200EE	125	100	125	800	192	280	377	298	258	262	216	-	20	69	12	-	180	212	239	6"	182
	NM 100/200CE-DE				845			245												198-177		
	NM 100/200AE-BE				970			263												339		
2	NM 100/250BE	125	100	140	980	245	280	475	425	424	318	-	25	106	18	290	205	233	263	45	413	
	NM 100/250AE				1050			275											509			



ภาพที่ ก.2 ข้อมูลลักษณะเฉพาะเครื่องสูบน้ำรุ่น NM 65/20 NM 80/16 และ NM 100/200 (ต่อ) (กรรณิการ์ มินสิรินันท์ , สัมภาษณ์, 14 ธันวาคม 2557)



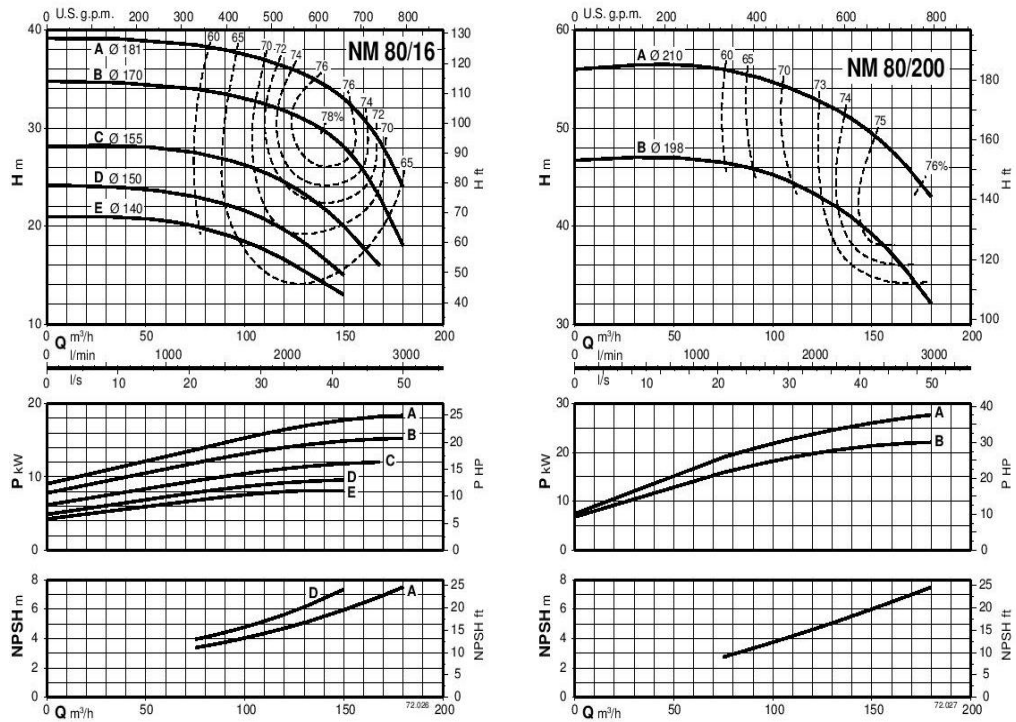
**Characteristic curves n 2900 rpm**



ภาพที่ ก.3 ข้อมูลกราฟแสดงลักษณะการทำงานของเครื่องสูบน้ำเข้าถังกรองทรายและระบบรีเวิร์สออสโมซิส รุ่น NM 65/20 (กรรณิการ์ มินสิรินันท์ , สัมภาษณ์, 14 ธันวาคม 2557)

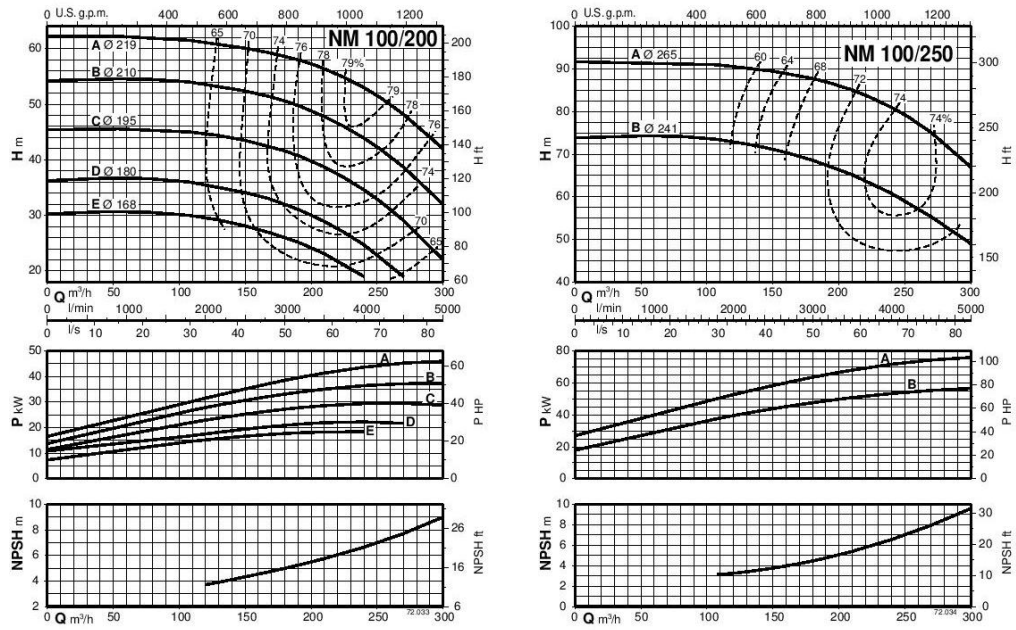


**Characteristic curves n 2900 rpm**



ภาพที่ ก.4 ข้อมูลกราฟแสดงลักษณะการทำงานของเครื่องสูบน้ำล่างย้อนถึงกรองทราย รุ่น NM 80/16 ( กรรณิการ์ มินิสรีนันท์ , สัมภาษณ์,14 ธันวาคม 2557)

**Characteristic curves n 2900 rpm**



ภาพที่ ก.5 ข้อมูลกราฟแสดงลักษณะการทำงานของเครื่องสูบน้ำล้างย้อนระบบอัลตราฟิลเทรชัน รุ่น NM 100/200 (กรณีการ์ มินสิรินันท์ ,สัมภาษณ์,14 ธันวาคม 2557)



ตารางที่ ข.1 สมการพื้นฐานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA แบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน

พารามิเตอร์	สมการ
Permeate flow	$Q_i = A_i \bar{\pi}_i S_E (TCF) (FF) (P_{fi} - \frac{\Delta P_{fci}}{2} - P_{pi} - \bar{\pi}_i + \pi_{pi})$
Average concentrate-side osmotic pressure	$\bar{\pi}_i = \pi_{fi} \left( \frac{C_{fci}}{C_{fi}} \right) P_{fi}$
Average permeate-side osmotic pressure	$\bar{\pi}_{pi} = \pi_{fi} (1 - R_i)$
Ratio: arithmetic average concentrate – side to feed concentration for Element i	$\frac{C_{fci}}{C_{fi}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{C_{ci}}{C_{fi}} \right)$
Ratio: concentrate to feed concentration	$\frac{C_{ci}}{C_{fi}} = \frac{1 - Y_i (1 - R_i)}{(1 - Y_i)}$
Feed water osmotic pressure	$\bar{\pi}_f = 1.12 (237 - T) \sum M_j$
Temperature correction factor	$TCF = \text{EXP} \left[ 2640 \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{273+T} \right) \right]; T \geq 25^\circ\text{C}$ $TCF = \text{EXP} \left[ 3020 \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{273+T} \right) \right]; T \leq 25^\circ\text{C}$
Concentration polarization factor for FLIMTEC 8 inch element	$pf_i = \text{EXP} [0.7 Y_i]$
System recovery	$Y = 1 - [(1 - Y_1)(1 - Y_2) \dots (1 - Y_n)]$ $= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i)$
Permeate concentration	$C_{pj} = B(C_{pj})(pf_i)(TCF) \frac{S_E}{Q_i}$

ที่มา (Dow Chemical Company, 2013)

ตารางที่ ข.2 สมการพื้นฐานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ROSA แบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน

พารามิเตอร์	สมการ
Total permeate flow	$Q_i = N_e \bar{A} \bar{\pi}_s (\text{TCF}) (\text{FF}) P_f - \frac{\Delta \bar{P}_{fc}}{2} P_p - \pi_f \left[ \frac{C_{fc}}{C_f} P_f - (1 - \bar{R}) \right]$
Ratio: average concentrate – side to feed concentration for system	$\frac{C_{fc}}{C_f} = \frac{-\bar{R} \ln(1-Y/Y_L)}{Y - (1-Y_L) \ln(1-Y/Y_L)} + (1 - \bar{R})$
Limit system recovery	$Y_L = 1 - \frac{\pi_f (\text{pf}) (\bar{R})}{P_f - \Delta \bar{P}_{fc} - P_p}$
Approximate log-mean concentrate-side to feed concentration ratio for system	$\left. \frac{C_{fc}}{C_f} \right _{Y_L, \bar{R}=1} = \ln \frac{(1-Y)}{Y}$
Average element recovery	$Y_i = 1 - (1 - Y)^{(1/n)}$
Average polarization factor	$\bar{P}_f = \text{EXP}[0.7 \bar{Y}_1]$
Average concentrate-side osmotic pressure for system	$\bar{\pi} = \pi_i \left( \frac{C_{fc}}{C_f} \right) \bar{P}_f$
Average concentrate-side system pressure drop for FILMTEC 8-inch elements; 2 stages	$\Delta \bar{P}_{fc} = 0.04 \bar{q}_{fc}^2$ $\Delta P_{fc} = \left[ \frac{0.1(Q/1440)}{Y N_{VR2}} \right] \left( \frac{1}{N_{VR}} + 1 - Y \right)$
Individual FILMTEC 8-inch element, or single-stage concentrate-side pressure drop	$\Delta P_{fc} = 0.01 n \bar{q}_{fc}^{1.7}$
FILMTEC membrane permeability as a function of average concentrate-side osmotic pressure	$\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.125; \bar{\pi} \leq 25$ $\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.125 - \left( \frac{\bar{\pi} - 25}{35} \right); 25 \leq \bar{\pi} \leq 200$ $\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.07 - 0.0001(\bar{\pi} - 200); 200 \leq \bar{\pi} \leq 400$
Permeate concentration	$C_p = B C_{fc} \bar{p}_f (\text{TCF}) \left( \frac{N_e S_E}{Q} \right)$

ที่มา (Dow chemical company, 2013)

ตารางที่ ข.3 ความหมายของสัญลักษณ์ของสมการในตารางที่ ข.1 และ ข.2

สัญลักษณ์	ความหมาย
$Q_i$	permeate flow of element (gpd)
$A_i \pi_i$	membrane permeability at 25° for Element i, a function of the average concentrate-side osmotic pressure (gfd/psi)
$S_E$	membrane surface area per element (ft <sup>2</sup> )
TCF	temperature correction factor for membrane permeability
FF	membrane fouling factor
$P_{fi}$	feed pressure of Element i (psi)
$\Delta P_{fci}$	concentrate-side pressure drop for Element i (psi)
$P_{pi}$	permeate pressure of Element i (psi)
$\bar{\pi}_i$	average concentrate-side osmotic pressure (psi)
$\pi_{fi}$	feed osmotic pressure of Element i
$\pi_{pi}$	permeate-side osmotic pressure of Element i (psi)
$pf_i$	concentration polarization factor for Element i
$R_i$	salt rejection fraction for Element i = (feed conc. - perm. conc.) / feed conc.
$C_{fci}$	average concentrate-side concentration for Element i (ppm)
$C_{fi}$	feed concentration for Element i (ppm)
$C_{ci}$	concentrate concentration for Element i (ppm)
$Y_i$	recovery fraction for Element i = permeate flow / feed flow
$\pi_f$	treated feed water osmotic pressure (psi)
T	feed water temperature (°C)
$m_j$	molal concentration of jth ion species
$Y_i$	system recovery (expressed as a fraction) = permeate flow/feed flow
$\bar{Q}_{fc}$	arithmetic average concentrate-side flow rate (gpm) (=1/2(feed flow + concentrate flow))

ที่มา (Dow chemical company, 2013)

ตารางที่ ข.4 ความหมายของสัญลักษณ์ของสมการในตารางที่ ข.1 และ ข.2 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\sum_j$	summation of all ionic species
$\prod_{i=1}^n$	multiplication of n terms in a series
n	number of elements in series
Q	system permeate flow (gpd)
$N_E$	number of elements in system
$\bar{Q}_1$	average element permeate flow (gpd) = $Q/N_E$
$\bar{A}\pi$	average membrane permeability at 25°C: a function of the average concentrate-side osmotic pressure (gfd/psi)
$\bar{C}_{fc}$	average concentrate-side concentration for system (ppm)
$\bar{R}$	average fractional salt rejection for system
$\bar{\pi}$	average concentrate-side osmotic pressure for system (psi)
$\bar{\Delta P}_{fc}$	average concentrate-side system pressure drop (psi)
$Y_L$	limiting (maximum) system recovery (expressed as a fraction)
$\bar{Y}_1$	average element recovery (expressed as a fraction)
$\bar{p}f$	average concentration polarization factor
$N_v$	number of six-element pressure vessels in system ( $\approx NE/6$ )
$N_{v1}$	number of pressure vessels in first stage of 2-stage system ( $\approx 1/3 NV$ )
$N_{v2}$	number of pressure vessels in second stage of 2-stage system ( $\approx NV/3$ )
$N_{VR}$	stage ratio ( $=N_{v1} / N_{v2}$ )

ที่มา (Dow chemical company, 2013)





ตารางที่ ค.1 สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำประเภทต่างๆ

ประเภทของน้ำ	บำบัดเบื้องต้น	เอสดีไอ	สัมประสิทธิ์
น้ำที่ผ่านการกรองด้วย กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส			0.8
น้ำกร่อย	ระบบบำบัดเบื้องต้นทั่วไป	<5	0.65
น้ำกร่อย	ไมโครฟิลเทรชัน/อัลตราฟิลเทรชัน	<3	0.70
น้ำกร่อย	ไม่ผ่าน	<3	0.75
น้ำทะเล	ระบบสูบน้ำจากแหล่งน้ำโดยตรง และระบบบำบัดเบื้องต้นทั่วไป	<5	0.65
น้ำทะเล	ระบบสูบน้ำจากบ่อเกลือเค็มแหล่งน้ำ หรือไมโครฟิลเทรชัน/อัลตราฟิลเทรชัน	<3	0.7
น้ำเสีย	ระบบบำบัดเบื้องต้นทั่วไป	<5	0.55
น้ำเสีย	ไมโครฟิลเทรชัน	<3	0.6
น้ำเสีย	อัลตราฟิลเทรชัน	<3	0.65

ที่มา (Dow Chemical Company, 2013)



## Product Information

**DOW FILMTEC™ Membranes**

DOW FILMTEC BW30-400-IG Industrial Grade, High Rejection Brackish Water RO Element

**Features**

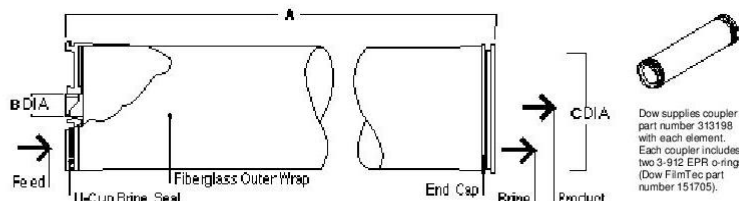
The DOW FILMTEC™ Industrial Grade, BW30-400-IG high rejection brackish water reverse osmosis (RO) element is designed for use in industrial water treatment applications. It maintains the same flow and rejection performance of the BW30-400 elements, but does not carry the ANSI standard 61 or KIWA certifications, offering a more cost effective option for industrial applications.

- BW30-400-IG elements may be cleaned over a wide pH range (pH 1-13).
- The BW30-400-IG is a drop-in replacement for the BW30-400 in systems that do not require drinking water certifications.

**Product Specifications**

Product	Part number	Active area ft <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Feed spacer thickness (mil)	Permeate flow rate gpd (m <sup>3</sup> /d)	Stabilized salt rejection (%)	Minimum salt rejection (%)
BW30-400-IG	369695	400 (37)	28	10,500 (40)	99.5%	99.0%

1. Permeate flow and salt rejection based on the following standard conditions: 2,000 ppm NaCl, 225 psi (15.5 bar), 77°F (25°C), pH 8 and 15% recovery.
2. Flow rates for individual elements may vary but will be no more than 15% below the value shown.
3. Sales specifications may vary as design revisions take place.
4. Active area guaranteed +/-5%.

**Figure 1****Dimensions – inches (mm)**

Product	A	B	C
BW30-400-IG	40.0 (1,016)	1.125 ID (29)	7.9 (201)

1. Refer to Dow FilmTec Design Guidelines for multiple-element applications and recommended element recovery rates for various feed sources. 1 inch = 25.4 mm
2. Element to fit nominal 8.0-inch (203 mm) I.D. pressure vessel.

**Operating Limits**

• Membrane Type	Polyamide Thin-Film Composite
• Maximum Operating Temperature <sup>a</sup>	113°F (45°C)
• Maximum Operating Pressure	600 psig (41 bar)
• Maximum Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
• pH Range, Continuous Operation <sup>a</sup>	2 - 11
• pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.) <sup>b</sup>	1 - 13
• Maximum Feed Flow	85 gpm (19 m <sup>3</sup> /hr)
• Maximum Feed Silt Density Index	SDI 5
• Free Chlorine Tolerance <sup>c</sup>	< 0.1 ppm

<sup>a</sup> Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).

<sup>b</sup> Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010.

<sup>c</sup> Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, Dow recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-22010 for more information.

ภาพที่ ง.1 ข้อมูลเฉพาะของเมมเบรน รุ่น BW-400-IG  
(กรณีการ มินีสรีนันท์ ,สัมภาษณ์,14 ธันวาคม 2557)



ตารางที่ ง.1 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 1 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	10.32	10.34	12.49	12.46	15.33	15.24	19.58	19.45
โซเดียม	6.22	6.22	8.3	8.26	11.68	11.57	18.38	18.08
แคลเซียม	1.39	1.37	1.87	1.83	2.65	2.59	4.26	4.13
แมกนีเซียม	0.4	0.4	0.54	0.53	0.77	0.75	1.23	1.19
ประจุลบ								
คลอไรด์	8.21	8.25	11.83	11.83	18.01	17.89	31.42	30.97
ไนเตรต	16.97	16.94	20.2	20.08	24.03	23.8	28.58	28.33
ซัลเฟต	2.48	2.43	3.38	3.3	4.92	4.77	8.22	7.91
ไบคาร์บอเนต	5.47	5.42	6.02	5.95	6.67	6.56	6.71	6.56
ของแข็งละลาย น้ำรวม	51.48	51.38	64.63	64.23	84.06	83.17	118.38	116.63

ตารางที่ ง.2 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 2 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	10.13	10.41	12.17	12.3	15.15	15.32	19.55	19.65
โซเดียม	6.02	6.24	7.89	8.01	11.3	11.54	18.07	18.26
แคลเซียม	1.34	1.37	1.77	1.79	2.56	2.58	4.17	4.16
แมกนีเซียม	0.39	0.4	0.51	0.52	0.74	0.74	1.21	1.2
ประจุลบ								
คลอไรด์	7.92	8.26	11.21	11.41	17.35	17.8	30.81	31.26
ไนเตรต	16.7	17.07	19.77	19.95	23.91	24	28.75	28.66
ซัลเฟต	2.38	2.43	3.19	3.22	4.72	4.75	8.01	7.96
ไบคาร์บอเนต	5.31	5.43	5.77	5.82	6.47	6.54	6.61	6.61
ของแข็งละลาย น้ำรวม	50.2	51.6	62.28	63.01	82.2	83.26	117.17	117.76

**ตารางที่ ง.3** คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 3 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	9.66	9.96	12.19	12.68	15.06	15.49	19.37	19.6
โซเดียม	5.62	5.85	7.86	8.36	11.07	11.65	17.58	17.97
แคลเซียม	1.25	1.3	1.76	1.85	2.5	2.6	4.04	4.11
แมกนีเซียม	0.36	0.37	0.51	0.53	0.72	0.75	1.17	1.19
ประจุลบ								
คลอไรด์	7.38	7.72	11.15	11.95	16.97	17.97	29.88	30.64
ไนเตรต	15.96	16.41	19.85	20.49	23.86	24.3	28.71	28.85
ซัลเฟต	2.21	2.29	3.16	3.31	4.6	4.77	7.72	7.84
ไบคาร์บอเนต	5.02	5.16	5.73	5.99	6.35	6.58	6.45	6.54
ของแข็งละลาย น้ำรวม	47.48	49.06	62.23	65.17	81.13	84.12	114.92	116.75

**ตารางที่ ง.4** คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	9.78	10.49	11.76	12.27	15.01	15.65	19.61	20.22
โซเดียม	5.68	6.26	7.42	7.92	10.87	11.75	17.78	18.94
แคลเซียม	1.26	1.38	1.66	1.76	2.45	2.62	4.08	4.31
แมกนีเซียม	0.37	0.4	0.48	0.51	0.71	0.75	1.18	1.24
ประจุลบ								
คลอไรด์	7.46	8.28	10.49	11.27	16.63	18.11	30.22	32.44
ไนเตรต	16.17	17.24	19.21	19.92	23.89	24.57	29.13	29.44
ซัลเฟต	2.22	2.42	2.96	3.14	4.48	4.8	7.78	8.22
ไบคาร์บอเนต	5.04	5.43	5.46	5.74	6.24	6.61	6.5	6.79
ของแข็งละลาย น้ำรวม	47.98	51.89	59.44	62.53	80.28	84.86	116.28	121.6



ตารางที่ ง.5 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอม โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 5 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	9.11	9.25	11.85	12.82	14.8	15.73	19.24	20.06
โซเดียม	5.17	5.27	7.51	8.43	10.68	11.83	17.13	18.54
แคลเซียม	1.15	1.17	1.68	1.86	2.4	2.64	3.92	4.22
แมกนีเซียม	0.33	0.34	0.48	0.54	0.69	0.76	1.13	1.21
ประจุลบ								
คลอไรด์	6.76	6.9	10.63	12.05	16.32	18.24	29.03	31.67
ไนเตรต	15.1	15.32	19.36	20.74	23.56	24.7	28.77	29.42
ซัลเฟต	2.01	2.05	2.99	3.33	4.39	4.83	7.44	8.02
ไบคาร์บอเนต	4.68	4.75	5.51	6.02	6.14	6.65	6.3	6.67
ของแข็งละลาย น้ำรวม	44.31	45.04	60	65.79	78.99	85.36	112.98	119.81

**ตารางที่ ง.6** คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	9.22	10.17	11.6	12.66	14.7	15.82	19.26	20.49
โซเดียม	5.23	5.99	7.21	8.25	10.47	11.91	17.1	19.18
แคลเซียม	1.16	1.32	1.61	1.82	2.35	2.66	3.91	4.36
แมกนีเซียม	0.34	0.38	0.46	0.52	0.68	0.76	1.13	1.25
ประจุลบ								
คลอไรด์	6.85	7.91	10.19	11.77	15.96	18.37	28.96	32.83
ไนเตรต	15.3	16.76	19.01	20.53	23.49	24.86	28.87	29.89
ซัลเฟต	2.03	2.31	2.86	3.25	4.28	4.85	7.4	8.29
ไบคาร์บอเนต	4.71	5.23	5.33	5.91	6.03	6.68	6.28	6.84
ของแข็งละลาย น้ำรวม	44.84	50.06	58.26	64.73	77.96	85.91	112.92	123.15

ตารางที่ ง.7 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 1 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	11.33	11.33	12.45	12.49	15.28	15.32	17.99	18
โซเดียม	6.85	6.85	8.18	8.21	11.5	11.52	24.63	24.66
แคลเซียม	1.5	1.5	1.83	1.83	2.59	2.6	0	0
แมกนีเซียม	0.43	0.43	0.53	0.53	0.75	0.75	0	0
ประจุลบ								
คลอไรด์	9.08	9.08	11.66	11.71	17.7	17.75	17.4	17.44
ไนเตรต	18.56	18.56	20.16	20.22	24.02	24.07	27.66	27.66
ซัลเฟต	2.65	2.65	3.29	3.3	4.79	4.79	11.75	11.76
ไบคาร์บอเนต	5.85	5.85	5.93	5.94	6.55	6.56	21.43	21.45
ของแข็งละลาย น้ำรวม	56.27	56.27	64.03	64.23	83.18	83.36	120.88	121.01

ตารางที่ ง.8 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 2 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	9.88	9.97	12.12	12.29	15.14	15.22	18.09	18.29
โซเดียม	5.78	5.84	7.77	7.91	11.13	11.2	24.47	24.9
แคลเซียม	1.28	1.29	1.73	1.76	2.5	2.51	0	0
แมกนีเซียม	0.37	0.37	0.5	0.51	0.72	0.73	0	0
ประจุลบ								
คลอไรด์	7.61	7.69	11.03	11.24	17.08	17.19	17.28	17.64
ไนเตรต	16.31	16.44	19.73	19.98	23.96	24.06	27.99	28.21
ซัลเฟต	2.26	2.28	3.1	3.15	4.59	4.61	11.62	11.82
ไบคาร์บอเนต	5.11	5.15	5.66	5.74	6.36	6.39	21.23	21.59
ของแข็งละลาย น้ำรวม	48.61	49.04	61.64	62.58	81.49	81.91	120.72	122.48

ตารางที่ ง.9 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 3 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	9.68	10.07	12.14	12.46	15	15.34	18.24	18.72
โซเดียม	5.59	5.89	7.76	8.04	10.87	11.21	24.76	25.87
แคลเซียม	1.24	1.3	1.73	1.79	2.44	2.51	0	0
แมกนีเซียม	0.36	0.37	0.5	0.51	0.7	0.72	0	0
ประจุลบ								
คลอไรด์	7.34	7.76	11.02	11.44	16.64	17.18	17.51	18.39
ไนเตรต	16.01	16.61	19.8	20.28	23.84	24.32	28.26	28.81
ซัลเฟต	2.17	2.28	3.08	3.18	4.45	4.57	11.72	12.26
ไบคาร์บอเนต	4.96	5.16	5.64	5.8	6.22	6.36	21.43	22.4
ของแข็งละลาย น้ำรวม	47.33	49.44	61.67	63.5	80.16	82.21	121.95	126.49

ตารางที่ ง.10 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	9.54	9.58	11.35	11.35	14.47	14.46	18.07	18.88
โซเดียม	5.47	5.51	7	7	10.21	10.31	24.53	26.53
แคลเซียม	1.21	1.22	1.55	1.55	2.28	2.31	0	0
แมกนีเซียม	0.35	0.35	0.45	0.45	0.66	0.67	0	0
ประจุลบ								
คลอไรด์	7.18	7.23	9.89	9.89	15.56	15.75	17.36	18.91
ไนเตรต	15.8	15.86	18.62	18.62	23.15	23.08	28.07	28.97
ซัลเฟต	2.11	2.12	2.75	2.75	4.14	4.19	11.58	12.57
ไบคาร์บอเนต	4.87	4.89	5.19	5.19	5.9	5.95	21.18	22.94
ของแข็งละลาย น้ำรวม	46.53	46.75	56.81	56.81	76.36	76.72	120.83	128.83

ตารางที่ ง.11 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 5 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	9.79	10.04	11.59	11.75	14.23	14.6	17.78	18.44
โซเดียม	5.65	5.87	7.22	7.37	9.99	10.39	23.82	25.63
แคลเซียม	1.24	1.29	1.6	1.63	2.23	2.32	0	0
แมกนีเซียม	0.36	0.37	0.46	0.47	0.64	0.67	0	0
ประจุลบ								
คลอไรด์	7.43	7.74	10.21	10.43	15.21	15.87	16.85	18.24
ไนเตรต	16.21	16.58	19.01	19.24	22.82	23.32	27.76	28.45
ซัลเฟต	2.17	2.25	2.83	2.89	4.03	4.2	11.2	12.11
ไบคาร์บอเนต	4.98	5.13	5.31	5.39	5.79	5.97	20.51	22.11
ของแข็งละลาย น้ำรวม	47.82	49.29	58.23	59.17	74.94	77.35	117.96	125.01

ตารางที่ ง.12 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	10.45	10.68	11.2	11.2	13.64	14.34	18.59	17.54
โซเดียม	6.21	6.45	6.82	6.82	9.21	10.1	16	23.21
แคลเซียม	1.37	1.42	1.51	1.51	2.05	2.25	3.64	0
แมกนีเซียม	0.39	0.41	0.43	0.43	0.59	0.65	1.05	0
ประจุลบ								
คลอไรด์	8.2	8.55	9.62	9.62	13.94	15.4	26.98	16.41
ไนเตรต	17.27	17.61	18.43	18.43	22.07	22.98	28.18	27.54
ซัลเฟต	2.37	2.47	2.65	2.65	3.67	4.06	6.79	10.86
ไบคาร์บอเนต	5.36	5.54	5.06	5.06	5.42	5.82	5.93	19.92
ของแข็งละลาย น้ำรวม	51.62	53.12	55.73	55.73	70.60	75.6	107.15	115.53



**ตารางที่ ง.13** คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 1 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	143.14	143.34	173.21	173.52	220.31	220.75	305.82	306.42
โซเดียม	313.52	313.67	387.45	387.71	506.31	506.85	727.59	728.53
แคลเซียม	171.76	171.78	213.7	213.71	282.55	282.56	416.15	416.08
แมกนีเซียม	48.78	48.78	60.68	60.68	80.21	80.2	118.08	118.03
ประจุลบ								
คลอไรด์	550.8	551.04	720.34	720.8	992.96	993.98	1522.19	1524.3
ไนเตรต	61.48	61.74	67.87	68.22	74.85	75.17	81.49	81.32
ซัลเฟต	432.46	432.47	538.72	538.7	713.7	713.65	1,055	1,055
ไบคาร์บอเนต	264.67	264.74	262.11	262.2	260.17	260.31	226.2	226.2
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,986.	1,987.	2,424.	2,425.	3,131.	3,134	4,453	4,456

**ตารางที่ ง.14** คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 2 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	143.24	143.63	174.11	174.28	220.94	221.88	306.43	308.19
โซเดียม	313.65	313.95	388.38	388.53	507.38	508.55	729.56	732.65
แคลเซียม	171.8	171.85	213.88	213.9	282.79	282.99	416.67	417.22
แมกนีเซียม	48.79	48.8	60.73	60.73	80.28	80.33	118.25	118.38
ประจุลบ								
คลอไรด์	550.97	551.41	721.74	721.97	994.7	996.69	1,526	1,532
ไนเตรต	61.65	62.21	69.16	69.39	75.57	76.62	81.58	82.61
ซัลเฟต	432.53	432.62	539.03	539.07	714.17	714.54	1,056	1,057
ไบคาร์บอเนต	264.81	265.01	262.73	262.81	260.8	261.32	226.99	227.78
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,988	1,990	2,430	2,431	3,137	3,143	4,462	4,476

**ตารางที่ ง.15** คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 3 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	143.95	143.73	173.42	174.29	221.03	222.37	308.63	309.78
โซเดียม	314.21	314.05	387.8	388.61	507.7	509.31	734	735.93
แคลเซียม	171.92	171.88	213.78	213.93	282.87	283.19	417.71	418.11
แมกนีเซียม	48.82	48.81	60.7	60.75	80.31	80.39	118.54	118.65
ประจุลบ								
คลอไรด์	551.75	551.52	720.83	722.07	995.19	997.89	1,534	1,538
ไนเตรต	62.74	62.41	68.17	69.39	75.61	77.26	83.03	83.97
ซัลเฟต	432.73	432.68	538.87	539.15	714.37	714.94	1,058	1,059
ไบคาร์บอเนต	265.25	265.13	262.43	262.91	261.04	261.8	228.44	229.01
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,992	1,990	2,426	2,431	3,138	3,147	4,483	4,492

**ตารางที่ ง.16** คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	143.27	143.85	174.1	174.87	221.1	222.97	306.2	309.66
โซเดียม	313.7	314.19	388.48	389.18	507.92	510.12	730.43	736.37
แคลเซียม	171.82	171.93	213.93	214.08	282.92	283.37	416.97	418.25
แมกนีเซียม	48.79	48.82	60.75	60.79	80.33	80.45	118.35	118.7
ประจุลบ								
คลอไรด์	551.05	551.73	721.84	722.91	995.55	999.19	1,528	1,539
ไนเตรต	61.69	62.55	69.16	70.27	75.64	78.04	80.55	83.43
ซัลเฟต	432.57	432.78	539.16	539.43	714.47	715.3	1,057	1,060
ไบคาร์บอเนต	264.9	265.25	262.88	263.32	261.2	262.28	227.47	229.27
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,988	1,991	2,430	2,435	3,139	3,152	4,465	4,494

ตารางที่ ง.17 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 5 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	144.19	144.25	173.31	174.25	220.83	222.52	307.57	310.59
โซเดียม	314.41	314.46	387.8	388.65	507.75	509.69	733.08	738.1
แคลเซียม	171.96	171.97	213.8	213.96	282.92	283.31	417.57	418.71
แมกนีเซียม	48.84	48.84	60.71	60.76	80.33	80.44	118.52	118.84
ประจุลบ								
คลอไรด์	551.99	552.07	720.82	722.11	995.29	998.46	1,532	1,542
ไนเตรต	63.14	63.24	67.95	69.33	75.22	77.42	81.68	84.41
ซัลเฟต	432.82	432.84	538.94	539.22	714.53	715.22	1,058	1,061
ไบคาร์บอเนต	265.44	265.48	262.48	263	261.15	262.11	228.38	229.93
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,993	1,993	2,426	2,431	3,138	3,149	4,478	4,503

**ตารางที่ ง.18** คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	143.35	144.02	173.52	174.82	220.64	222.93	306.45	310.24
โซเดียม	313.78	314.31	388.02	389.29	507.64	510.32	731.72	737.96
แคลเซียม	171.84	171.94	213.85	214.15	282.93	283.5	417.4	418.78
แมกนีเซียม	48.8	48.83	60.73	60.81	80.33	80.49	118.48	118.86
ประจุลบ								
คลอไรด์	551.13	551.85	721.15	723.11	995.14	999.53	1,530	1,541
ไนเตรต	61.82	62.86	68.26	70.11	74.87	77.86	80.2	83.72
ซัลเฟต	432.6	432.78	539.03	539.63	714.59	715.65	1,058	1,061
ไบคาร์บอเนต	264.97	265.37	262.64	263.44	261.13	262.47	228.01	229.96
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,988	1,992	2,427	2,435	3,137	3,153	4,470	4,502

ตารางที่ ง.19 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 1 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	139.7	139.7	168.74	169.11	214.88	215.29	305.48	305.87
โซเดียม	305.0	305.0	376.18	377.06	492.31	493.30	1394.37	1396.55
แคลเซียม	166.9	166.9	207.17	207.67	274.09	274.64	0.47	0.47
แมกนีเซียม	47.4	47.4	58.83	58.97	77.81	77.97	0.00	0.00
ประจุลบ								
คลอไรด์	535.6	535.6	699.06	700.71	964.92	966.87	991.51	993.00
ไนเตรต	60.9	60.9	67.16	67.27	74.34	74.44	86.00	85.97
ซัลเฟต	420.1	420.1	522.15	523.39	692.09	693.50	1013.05	1014.75
ไบคาร์บอเนต	257.4	257.4	254.48	255.08	253.01	253.52	989.85	991.16
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,933	1,933	2,354	2,359	3,044	3,050	4,835	4,842

ตารางที่ ง.20 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 2 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	136.2	136.7	164.61	165.81	210.95	211.50	299.09	301.20
โซเดียม	296.4	297.6	365.58	368.45	481.83	483.19	1362.40	1373.74
แคลเซียม	162.1	162.8	201.05	202.65	267.70	268.47	0.46	0.47
แมกนีเซียม	46.0	46.2	57.09	57.54	76.00	76.22	0.00	0.00
ประจุลบ								
คลอไรด์	520.4	522.5	678.99	684.34	943.71	946.40	968.56	976.54
ไนเตรต	60.0	60.1	66.73	67.06	74.42	74.56	85.39	85.35
ซัลเฟต	408.0	409.7	506.56	510.60	675.74	677.69	989.07	997.66
ไบคาร์บอเนต	250.3	251.3	247.37	249.31	247.75	248.45	970.14	977.58
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,879	1,887	2,288	2,306	2,978	2,987	4,727	4,765



**ตารางที่ ง.21** คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 3 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	131.83	134.29	160.95	163.00	205.59	208.09	292.94	297.48
โซเดียม	286.23	292.13	357.27	362.25	468.55	474.71	1334.43	1358.51
แคลเซียม	156.42	159.72	196.45	199.27	260.04	263.53	0.45	0.46
แมกนีเซียม	44.42	45.36	55.79	56.59	73.83	74.82	0.00	0.00
ประจุลบ								
คลอไรด์	502.33	512.79	663.48	672.83	917.35	929.49	948.45	965.44
ไนเตรต	58.64	59.31	65.39	65.88	73.47	73.99	83.50	83.43
ซัลเฟต	393.63	401.98	494.99	502.11	656.30	665.14	968.96	987.10
ไบคาร์บอเนต	241.66	246.66	241.78	245.16	241.00	244.17	951.94	968.05
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,815	1,852	2,236	2,267	2,896	2,934	4,631	4,712

ตารางที่ ง.22 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 4 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	132.29	132.52	158.55	158.55	201.93	202.26	287.37	294.97
โซเดียม	287.15	287.73	350.03	350.03	458.45	460.02	1308.24	1348.65
แคลเซียม	156.90	157.23	192.11	192.11	253.99	255.16	0.45	0.46
แมกนีเซียม	44.56	44.65	54.56	54.56	72.11	72.45	0.00	0.00
ประจุลบ								
คลอไรด์	503.92	504.95	649.60	649.60	897.04	900.40	929.62	958.16
ไนเตรต	58.93	58.97	66.01	66.01	73.70	73.09	82.07	81.92
ซัลเฟต	394.83	395.66	483.87	483.87	640.84	643.90	950.21	980.60
ไบคาร์บอเนต	242.45	242.93	236.87	236.87	235.85	236.65	934.25	961.50
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,821	1,825	2,192	2,192	2,834	2,844	4,541	4,677

**ตารางที่ ง.23** คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 5 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	129.59	131.32	158.21	159.16	197.93	200.89	280.92	287.66
โซเดียม	281.01	285.33	349.80	352.23	448.94	456.55	1275.04	1311.96
แคลเซียม	153.52	155.97	192.10	193.49	248.72	253.12	0.43	0.45
แมกนีเซียม	43.60	44.30	54.55	54.95	70.62	71.87	0.00	0.00
ประจุลบ								
คลอไรด์	493.09	500.80	649.30	653.86	878.37	893.47	905.96	931.98
ไนเตรต	57.94	58.25	65.39	65.54	72.54	72.90	81.68	81.07
ซัลเฟต	386.30	392.53	483.90	487.42	627.54	638.71	925.70	953.77
ไบคาร์บอเนต	237.27	240.94	236.75	238.39	230.98	234.90	911.97	936.59
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,782	1,810	2,190	2,205	2,776	2,823	4,429	4,553

**ตารางที่ ง.24** คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ที่การออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน โดยใช้ท่อบรรจุเมมเบรนขนาด 6 ม.

พารามิเตอร์ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ประจุบวก								
โพแทสเซียม	132.29	132.52	151.70	151.70	183.80	191.25	270.10	278.05
โซเดียม	287.15	287.73	333.69	333.69	413.34	432.99	636.17	1257.91
แคลเซียม	156.90	157.23	182.96	182.96	228.23	239.81	359.38	0.43
แมกนีเซียม	44.56	44.65	51.96	51.96	64.81	68.10	102.03	0.00
ประจุลบ								
คลอไรด์	503.92	504.95	619.01	619.01	807.82	847.03	1326.85	893.79
ไนเตรต	58.93	58.97	64.11	64.11	70.33	70.72	78.45	82.47
ซัลเฟต	394.83	395.66	460.72	460.72	575.52	605.04	909.75	912.59
ไบคาร์บอเนต	242.45	242.93	225.83	225.83	212.70	222.81	198.48	901.06
ของแข็งละลาย น้ำรวม	1,821	1,825	2,090	2,090	2,557	2,678	3,881	4,372

ตารางที่ ง.25 ฟลักซ์ในหน่วย ล./ตร.ม./ชม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ประสิทธิภาพ (%)			
	50	60	70	80
1	23.40	23.49	23.55	23.60
2	22.43	23.07	22.83	22.66
3	22.43	21.53	21.84	22.08
4	20.70	21.53	20.93	20.50
5	21.52	19.87	20.09	20.26
6	19.35	19.57	19.32	19.13

ตารางที่ ง.26 ฟลักซ์ในหน่วย ล./ตร.ม./ชม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 60 70 และ 80 ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	ประสิทธิภาพ (%)			
	50	60	70	80
1	22.90	22.66	22.84	22.66
2	21.53	20.83	21.53	21.53
3	19.93	19.57	20.09	19.80
4	19.22	17.94	19.83	18.72
5	17.94	18.45	18.84	18.13
6	16.31	16.56	17.92	17.94

ตารางที่ ง.27 พลังงานและแรงดัน ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ที่จำนวนเมมเบรนและท่อ  
บรรจุขนาด 1 – 6 ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	จำนวนท่อ บรรจุ (ท่อ)	จำนวน เมมเบรน (ท่อน)	พลังงานที่ใช้บำบัดน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์/ลบ.ม)		แรงดัน (บาร์)	
			ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	46	46	2.18	4.23	7.52	7.65
2	24	48	1.16	2.28	7.29	7.57
3	16	48	0.85	1.12	7.36	7.53
4	13	52	0.66	1.17	6.95	7.48
5	10	50	0.6	0.64	7.34	7.40
6	9	54	0.51	0.81	6.99	7.62

ตารางที่ ง.28 พลังงานและแรงดัน ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ที่จำนวนเมมเบรนและท่อ  
บรรจุขนาด 1 – 6 ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	จำนวน ท่อบรรจุ (ท่อ)	จำนวน เมมเบรน (ท่อน)	พลังงานที่ใช้บำบัดน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์/ลบ.ม)		แรงดัน (บาร์)	
			ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	55	55	2.29	4.39	7.86	7.96
2	28	56	1.23	1.54	7.75	7.84
3	20	60	0.85	1.56	7.35	7.78
4	15	60	0.55	1.02	7.44	7.78
5	13	65	0.57	1.00	7.04	7.70
6	11	66	0.51	0.86	7.08	7.80

ตารางที่ ง.29 พลังงานและแรงดัน ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ที่จำนวนเมมเบรนและท่อ  
บรรจุขนาด 1 – 6 ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	จำนวน ท่อบรรจุ (ท่อ)	จำนวน เมมเบรน (ท่อน)	พลังงานที่ใช้บำบัดน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์/ลบ.ม)		แรงดัน (บาร์)	
			ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	64	64	2.42	4.46	8.34	8.45
2	33	66	1.29	2.29	8.13	8.39
3	23	69	0.90	1.46	7.87	8.31
4	18	72	0.71	1.26	7.56	8.22
5	15	75	0.60	1.05	7.48	8.16
6	13	78	0.52	0.91	7.34	8.13

ตารางที่ ง.30 พลังงานและแรงดัน ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน ที่จำนวนเมมเบรนและท่อ  
บรรจุขนาด 1 – 6 ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 80

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	จำนวน ท่อบรรจุ (ท่อ)	จำนวน เมมเบรน (ท่อน)	พลังงานที่ใช้บำบัดน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์/ลบ.ม)		แรงดัน (บาร์)	
			ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	73	73	2.67	5.10	9.23	9.33
2	38	76	1.41	2.63	8.91	9.20
3	27	81	1.00	1.31	8.73	8.92
4	21	84	0.76	1.39	8.25	8.88
5	17	85	0.65	1.07	8.22	8.87
6	15	90	0.55	0.99	7.92	8.81

ตารางที่ ง.31 พลังงานและแรงดัน ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ที่จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุขนาด 1 – 6 ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	จำนวนท่อบรรจุ (ท่อ)		จำนวนเมมเบรน (ท่อน)		พลังงานที่ใช้บำบัดน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์/ลบ.ม)		แรงดัน (บาร์)	
	ขั้นตอนที่1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่1	ขั้นตอนที่ 2	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	32	15	32	15	ไม่มี	1.55	ไม่มี	7.55
2	17	8	34	16	0.83	0.88	7.26	7.30
3	12	6	36	18	0.58	0.69	6.91	7.11
4	10	4	40	16	0.51	0.52	6.88	6.90
5	8	4	40	20	0.48	0.53	6.91	7.09
6	7	4	42	24	0.48	0.54	6.98	7.22

ตารางที่ ง.32 พลังงานและแรงดัน ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ที่จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุขนาด 1 – 6 ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 60

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	จำนวนท่อบรรจุ (ท่อ)		จำนวนเมมเบรน (ท่อน)		พลังงานที่ใช้บำบัดน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์/ลบ.ม)		แรงดัน (บาร์)	
	ขั้นตอนที่1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่1	ขั้นตอนที่ 2	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	38	19	38	19	1.56	1.67	7.76	7.78
2	20	10	40	20	0.85	0.95	7.52	7.62
3	14	7	42	21	0.6	0.69	7.04	7.19
4	11	5	44	20	ไม่มี	0.54	ไม่มี	7.47
5	10	4	50	20	0.46	0.48	7.05	7.12
6	9	4	54	24	0.33	0.42	5.75	6.17



ตารางที่ ง.33 พลังงานและแรงดัน ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ที่จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุขนาด 1 – 6 ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	จำนวนท่อบรรจุ (ท่อ)		จำนวนเมมเบรน (ท่อน)		พลังงานที่ใช้บำบัดน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์/ลบ.ม)		แรงดัน (บาร์)	
	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	44	22	44	22	1.66	1.76	8.27	8.29
2	24	11	48	22	0.92	0.95	7.94	7.97
3	17	8	51	24	0.64	0.73	7.59	7.74
4	13	6	52	24	0.54	0.56	7.63	7.68
5	11	55	55	25	0.47	0.51	7.48	7.66
6	9	5	54	30	0.39	0.45	7.27	7.64

ตารางที่ ง.34 พลังงานและแรงดัน ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายขั้นตอน ที่จำนวนเมมเบรนและท่อบรรจุขนาด 1 – 6 ม. ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 80

ขนาดท่อบรรจุ (ม.)	จำนวนท่อบรรจุ (ท่อ)		จำนวนเมมเบรน (ท่อน)		พลังงานที่ใช้บำบัดน้ำ 1 หน่วย (กิโลวัตต์/ลบ.ม)		แรงดัน (บาร์)	
	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	51	25	51	25	1.83	1.92	9.05	9.07
2	27	13	54	26	1.00	1.00	8.72	8.72
3	20	9	60	27	0.70	0.78	8.21	8.35
4	16	7	64	28	0.48	0.65	7.94	8.16
5	13	6	65	30	0.48	0.60	7.83	8.27
6	11	66	66	36	0.40	0.55	7.47	8.22

ตารางที่ ง.35 อัตราการเวียนน้ำ ในหน่วย ลบ.ม./ชม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย 1 ชั้นตอน

ขนาดท่อ บรรจุ (ม.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	254	557	324	682	389	806	454	937
2	103	252	140	194	175	364	211	446
3	53	92	79	197	105	238	131	191
4	29	100	50	101	70	170	89	210
5	14	19	32	100	50	127	66	142
6	3	43	17	72	35	100	49	127

ตารางที่ ง.36 อัตราการเวียนน้ำ ในหน่วย ลบ.ม./ชม. ของการออกแบบแบบ 1 หน่วย หลายชั้นตอน

ขนาดท่อ บรรจุ (ม.)	ประสิทธิภาพ (%)							
	50		60		70		80	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
1	ไม่มี	156	197	216	244	263	292	311
2	52	59	76	92	106	113	131	132
3	16	32	38	52	57	73	78	93
4	5	6	ไม่มี	19	34	37	52	66
5	0	6	10	13	21	28	34	53
6	0	6	0	0	6	16	19	43



**ตารางที่ จ.1** ผลการทดลองปริมาณฟลักซ์ของการเดินระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิสที่ตรวโซลูชันความเข้มข้นต่างๆความเข้มข้นเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชม.ในหน่วย ล./ตร.ชม./นาทึ

เวลา (นาทึ)	ความเข้มข้น (มก./ล.)					
	3,950	7,900	15,800	23,700	31,600	39,500
10	0.0001	0.0015	0.0006	0.0015	0.0017	0.0008
20	- 0.0002	0.0001	-0.0005	0.0007	0.0012	0.0017
30	- 0.0005	0.0003	0.0000	0.0004	0.0011	0.0010
40	- 0.0006	- 0.0008	0.0000	0.0015	0.0009	0.0010
50	- 0.0007	- 0.0010	- 0.0004	0.0023	0.0001	0.0004
60	- 0.0010	- 0.0009	- 0.0003	0.0005	0.0005	0.0007
70	- 0.0014	- 0.0008	- 0.0002	- 0.0006	0.0005	0.0008
80	- 0.0008	- 0.0010	- 0.0006	-0.0005	0.0002	0.0006
90	- 0.0012	- 0.0009	- 0.0005	-0.0007	0.0002	0.0007
100	- 0.0012	- 0.0009	- 0.0003	- 0.0007	0.0003	0.0003
110	- 0.0014	- 0.0011	- 0.0006	- 0.0007	0.0001	0.0007
120	- 0.0004	- 0.0011	- 0.0005	- 0.0002	0.0000	0.0006

**ตารางที่ จ.2** ผลการทดลองปริมาณฟลักซ์ของการเดินระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสของตราวโซลูชัน  
ที่ความเข้มข้น 31,600 มก./ล.

เวลา (ชม.)	ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./ชม.)
1	0.55
2	0.14
3	0.05
4	-0.02

**ตารางที่ จ.3** ผลการทดลองปริมาณฟลักซ์ของการเดินระบบฟอว์เวิร์ดออสโมซิสของตราวโซลูชัน  
ที่ความเข้มข้น 39,500 มก./ล.

เวลา (ชม.)	ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./ชม.)
1	0.78
2	0.45
3	0.29
4	0.25
5	0.24
6	0.26
7	0.26
8	0.28
9	0.03
10	-0.04
11	-0.09



## DOW FILMTEC™ Membranes

Next Generation of Residential Reverse Osmosis Elements

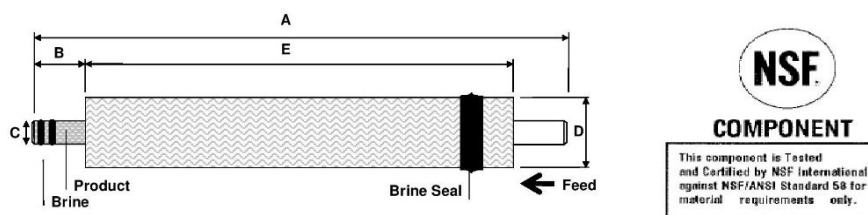
**Features** DOW FILMTEC™ reverse osmosis (RO) membranes for home drinking water treatment units are some of the most reliable and consistent elements in the industry. Advanced membrane technology and automated fabrication allow Dow to precisely produce each and every element to tight, pre-defined specifications. Dow's advanced and consistent RO element quality helps customers develop, and maintain brand recognition along with a reputation for building systems that reliably provide low impurity drinking water. DOW FILMTEC™ elements are shipped dry for convenient handling and long shelf-life. Dow's next generation elements are a fully compatible replacement for existing DOW FILMTEC™ residential RO elements.

### Product Specifications

Product	Applied Pressure psig (bar)	Permeate Flow Rate gpd (l/h)	Stabilized Salt Rejection (%)
TW30-1812-24	50 (3.4)	24 (3.8)	98
TW30-1812-36	50 (3.4)	36 (5.7)	98
TW30-1812-50	50 (3.4)	50 (7.9)	98
TW30-1812-75	50 (3.4)	75 (12)	98

1. Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: 250 ppm softened tap water, 77°F (25°C), 15% recovery and the specified applied pressure.
2. Minimum salt rejection is 96.0%.
3. Permeate flows for individual elements may vary +/-20%.

Figure 1



Dimensions – Inches (mm)	A	B	C	D	E
TW30-1812	11.74 (298)	1.17 (30)	0.68 (17)	1.75 (44.5)	9.4 (239)

1. TW30-1812 Home Drinking Water elements seal at a standard 2.0 inch – 2.05 inch I.D. within pressure vessels

Operating Limits	Membrane Type	Polyamide Thin-Film Composite
	Maximum Operating Temperature	113° F (45° C)
	Maximum Operating Pressure	150 psig (10 bar)
	Maximum Feed Flow Rate	2.0 gpm (7.6 lpm)
	pH Range, Continuous Operation <sup>a</sup>	2 – 11
	Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	5
	Free Chlorine Tolerance <sup>b</sup>	< 0.1 ppm

a. Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).

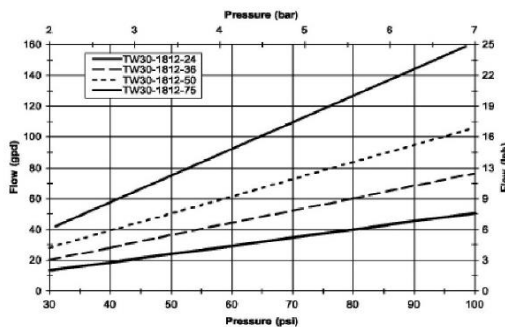
b. Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, Dow recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-22010 for more information.

ภาพที่ จ.1 ข้อมูลจำเพาะของเมมเบรนรุ่น TW30-1812-50 (Dow Chemical Company, 2014)

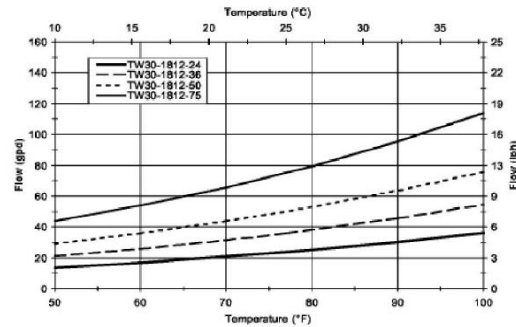
## DOW FILMTEC™ Membranes

### Next Generation of Residential Reverse Osmosis Elements Influence of Temperature and Pressure on TW30-1812 Permeate Flow

**Figure 2.**  
Impact of Pressure on Permeate Flow  
(constant temperature, recovery)



**Figure 3.**  
Impact of Temperature on Permeate Flow  
(constant pressure, recovery)



#### Important Information

- It is recommended that systems using these elements rinse the elements for 24 hours, prior to first use, to meet NSF/ANSI 58 Standard.
- The first full tank of permeate must be discarded. Do not use this initial permeate for drinking water or food preparation.
- To ease installation, it is recommended to use a lubricant safe for indirect water contact on all seals. Potential options include water, glycerin based lubricants, and Dow Corning™ 111.
- Rotate the element about a quarter turn to ease installation and removal of the element. Ensure good interface between the o-rings and brine seal with their connection surfaces.
- Keep elements moist at all times after initial wetting.
- To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, it is recommended that membrane elements be immersed in a preservative solution. Rinse out the preservative before use.
- The membrane shows some resistance to short-term attack by chlorine (hypochlorite). Continuous exposure, however, may damage the membrane and should be avoided.
- DOW FILMTEC™ Home Drinking Water Reverse Osmosis Elements may be covered under the DOW FILMTEC™ Reverse Osmosis and Nanofiltration Element Three-Year Prorated Limited Warranty, 609-35010-1006 extended to OEMs. Such Limited Warranty is non-transferable. Contact a Dow representative for more information.

If operating limits and guidelines given in this Product Information Bulletin are not strictly followed, the Limited Warranty will be null and void. The OEM is fully responsible for the effects of incompatible chemicals and lubricants on elements. Use of any such chemicals or lubricants will void the Limited Warranty.

These membranes may be subject to drinking water application restrictions in some countries: please check the application status before use and sale. These elements have not been through the French approval process for use in potable water.

**DOW FILMTEC™ Membranes**  
For more information about DOW FILMTEC membranes, call the Dow Water & Process Solutions business:  
North America: 1-800-447-4369  
Latin America: (+55) 11-5188-9222  
Europe: 800 3 694 6367  
Italy: 800 783 825  
South Africa: 0800 99 5078  
Pacific: +800 7776 7776  
China: +800 889 0789  
[www.dowwaterandprocess.com](http://www.dowwaterandprocess.com)

**Notice:** The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.

**Notice:** No freedom from any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.



ภาพที่ จ.2 ข้อมูลจำเพาะของเมมเบรนรุ่น TW30-1812-50 (Dow Chemical Company, 2014)

ภาคผนวก ฉ

ผลการวิจัยการแยกดรอโซลูชันจากสารละลายและนำกลับมาใช้ใหม่

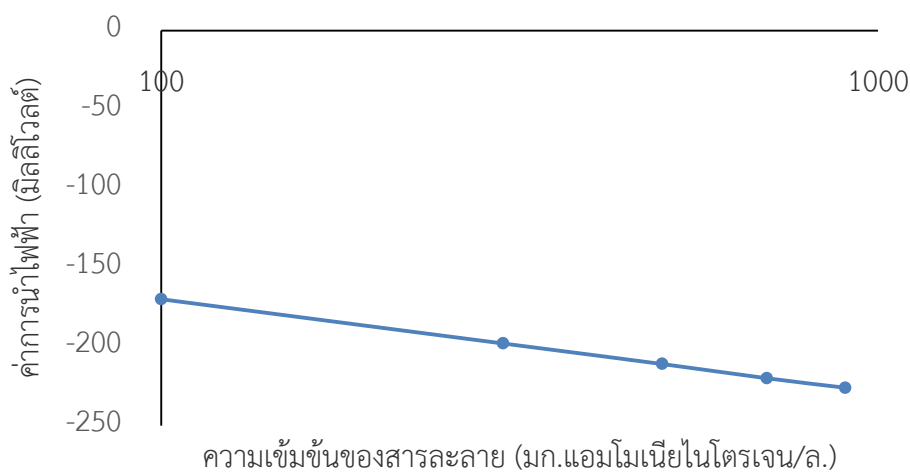
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต

การวิเคราะห์แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตในงานวิจัยนี้ จะใช้โพรวัดปริมาณแอมโมเนียในการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ปิเปตตัวอย่างสารละลายที่เก็บมาปริมาตร 10 มล. ปิเปตใส่ลงในปิกเกอร์ขนาด 10 มล. และนำไปตั้งบนเครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมกับใส่แท่งแม่เหล็กลงไปในปิกเกอร์
2. จากนั้นล้างหัวโพรบด้วยน้ำปราศจากไอออนก่อนนำหัวโพรบมาจุ่มลงในปิกเกอร์โดยไม่ให้มีฟองอากาศอยู่ที่ปลายหัวโพรบ
3. เปิดเครื่องกวนแม่เหล็กโดยใช้ความเร็วพอประมาณ
4. ในขณะที่ทำการกวนสายละลาย ปิเปตสารละลายออกซีไดซ์ซิง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์) จากนั้นตั้งทิ้งไว้จนค่าการนำไฟฟ้าหยุดนิ่งและบันทึกค่าที่ได้และ
5. สร้างกราฟสารละลายมาตรฐาน โดยการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมมาตรฐานที่ความเข้มข้น 100 300 500 700 900 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ล. จากสารละลายสต็อกแอมโมเนียความเข้มข้น 1000 มก.แอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร และกระทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 - 4



ภาพที่ ๑ 1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย (Total ammonia)

ตารางที่ ฉ.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพการแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายที่ความเข้มข้น 3,950มก./ล. ที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้น(มก./ล.)						
	คัดแยก			นำกลับมาใช้ใหม่			สูญเสีย
	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	
1	4,008	3,265	18.6	น้อยมาก	681	91.6	1.6
2	3,866	2,870	22.3	น้อยมาก	715	86.6	3.0
3	3,866	2,551	27.7	น้อยมาก	700	71.7	7.8
4	3,717	2,368	33.3	น้อยมาก	1,017	86.0	4.7
5	3,866	2,115	45.0	น้อยมาก	1,574	90.8	4.1
10	3,826	1,850	50.3	น้อยมาก	1,716	91.6	7.2

ตารางที่ ฉ.2 ผลการทดลองประสิทธิภาพการแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายที่ความเข้มข้น 7,900มก./ล. ที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้น(มก./ล.)						
	คัดแยก			นำกลับมาใช้ใหม่			สูญเสีย
	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	
1	8,205	6,947	16.2	น้อยมาก	992	73.7	4.3
2	7,642	5,777	20.9	น้อยมาก	1,039	68.0	6.7
3	7,642	5,361	29.5	น้อยมาก	1,546	68.9	9.2
4	7,961	4,760	37.9	น้อยมาก	2,146	73.8	9.9
5	8,326	2,976	64.1	น้อยมาก	5,077	95.6	2.8
10	7,842	2,804	63.2	น้อยมาก	4,067	84.4	11.1

ตารางที่ ๓.3 ผลการทดลองประสิทธิภาพการแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายที่ความเข้มข้น 15,800มก./ล. ที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้น(มก./ล.)						
	คัดแยก			นำกลับมาใช้ใหม่			สูญเสีย
	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	
1	16,195	13,354	18.0	น้อยมาก	2,531	86.1	2.5
2	14,749	10,927	22.6	น้อยมาก	2,720	85.3	3.3
3	14,963	10,722	28.4	น้อยมาก	3,951	92.8	2.0
4	16,195	9,916	35.9	น้อยมาก	5,243	94.4	2.0
5	15,816	7,320	53.7	น้อยมาก	7,375	86.8	7.1
10	16,605	7,842	52.6	น้อยมาก	8,059	92.6	3.9

ตารางที่ ๓.4 ผลการทดลองประสิทธิภาพการแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายที่ความเข้มข้น 23,700มก./ล. ที่เวลาต่างๆ

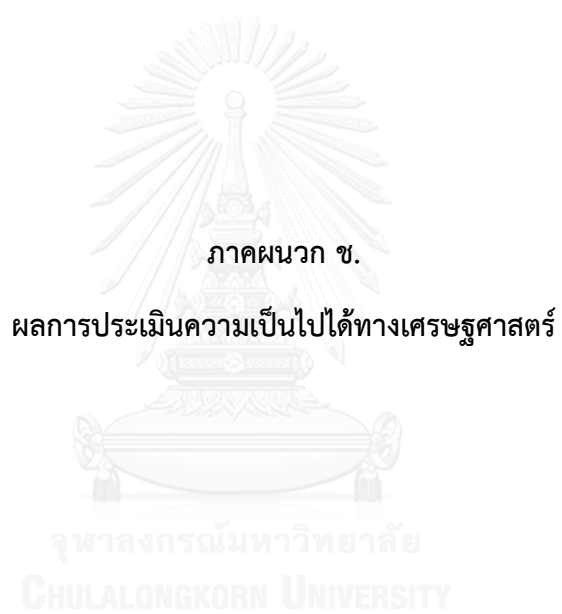
เวลา (ชม.)	ความเข้มข้น(มก./ล.)						
	คัดแยก			นำกลับมาใช้ใหม่			สูญเสีย
	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	
1	21,361	18,015	16.0	น้อยมาก	2,528	73.6	4.2
2	22,538	16,922	21.5	น้อยมาก	3,687	79.4	4.4
3	23,120	15,947	24.5	น้อยมาก	3,506	67.7	7.9
4	24,053	15,045	34.6	น้อยมาก	5,627	70.8	10.1
5	24,648	8,665	65.0	น้อยมาก	13,704	85.2	9.6
10	24,286	8,011	66.1	น้อยมาก	13,736	75.4	9.1

ตารางที่ ๑.5 ผลการทดลองประสิทธิภาพการแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายที่ความเข้มข้น 31,500มก./ล. ที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้น(มก./ล.)						
	คัดแยก			นำกลับมาใช้ใหม่			สูญเสีย
	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	
1	31,237	25,746	17.1	น้อยมาก	4,644	87.6	2.1
2	32,440	24,955	22.4	น้อยมาก	5,970	82.8	3.9
3	31,108	23,081	25.7	น้อยมาก	6,842	85.8	3.7
4	30,298	19,379	34.4	น้อยมาก	8,595	84.7	5.3
5	30,079	11,706	60.9	น้อยมาก	15,503	85.1	9.1
10	30,702	11,514	62.2	น้อยมาก	16,969	89.7	8.5

ตารางที่ ๑.6 ผลการทดลองประสิทธิภาพการแยกดรอว์โซลูชันออกจากสารละลายที่ความเข้มข้น 39,500มก./ล. ที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้น(มก./ล.)						
	คัดแยก			นำกลับมาใช้ใหม่			สูญเสีย
	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	เริ่มต้น	สุดท้าย	%	
1	39,738	32,836	17.6	น้อยมาก	6,083	87.0	2.3
2	41,323	32,540	21.3	น้อยมาก	7,674	87.1	2.7
3	38,213	27,408	28.7	น้อยมาก	10,137	91.7	2.4
4	39,738	24,647	38.2	น้อยมาก	12,871	84.4	6.0
5	39,785	16,939	57.2	น้อยมาก	19,892	87.9	6.9
10	38,986	17,921	54.4	น้อยมาก	19,498	91.2	5.5



ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงรายการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

รายการ	ราคา (บาท)	หน่วย
เมมเบรน		
- รุ่น BW30-400-IG	25,000	ท่อน
- อัลตราฟิลเทรชัน	85,000	ท่อน
- คาทริจฟิลเตอร์	650	ท่อน
ท่อบรรจุเมมเบรน		
- ขนาด 1 ม.	14,000	ท่อ
- ขนาด 2 ม.	16,000	ท่อ
- ขนาด 3 ม.	18,000	ท่อ
- ขนาด 4 ม.	20,000	ท่อ
- ขนาด 5 ม.	22,000	ท่อ
- ขนาด 6 ม.	24,000	ท่อ
สารเคมี		
- โพลิเมอร์	300	กก.
- คลอรีน	50	กก.
- สารป้องกันการเกิดตะกอน	400	กก.
- โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	100	กก.
พลังงาน		
ไฟฟ้า	3.5	กิโลวัตต์-ชม.
น้ำ		
น้ำประปา	18	ลบ.ม

ที่มา (กรรณิการ์ มินสิรินันท์, สัมภาษณ์, 14 ธันวาคม 2557

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชินวัฒน์ ไตรศุภโชค เกิดวันที่ 25 เมษายน พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ "The International Conference on Advances in Civil, Structural, Environment & Bio-Technology" จัดขึ้นที่ G Tower Hotel, 199 Jalan Tun Razak Pudu, 50400 กัวลาลัมเปอร์ ประเทศมาเลเซีย ในชื่อหัวข้อ "Ammonium bicarbonate draw solution reuse in forward osmosis process" เมื่อวันที่ 8 - 9 มีนาคม 2557