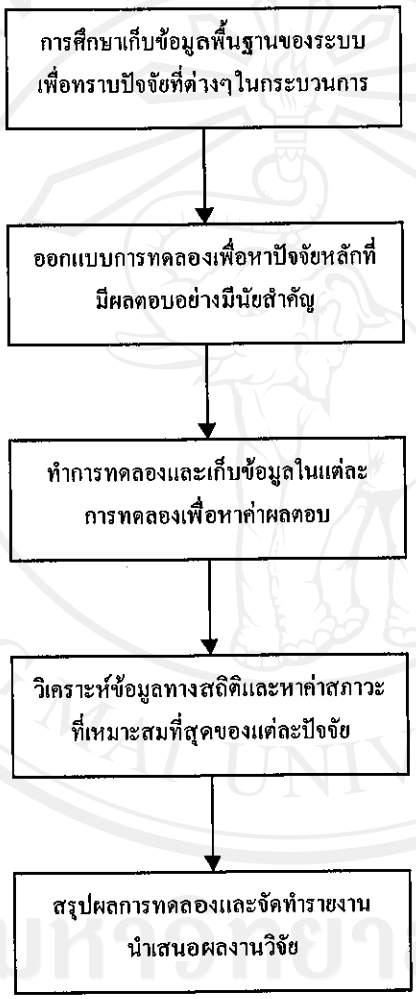
บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะที่สุดของปัจจัยในการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีพีเอชสูง โดยอาศัยการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้กำหนดแผนการดำเนินงานดังรูป 3.1



รูป 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

โดยเริ่มต้นจากการศึกษาและเก็บข้อมูลพื้นฐานของระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซิส เพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ หลังจากนั้นทำการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม เพื่อที่จะหาปัจจัยที่มีผลอย่างนัยสำคัญต่อกระบวนการและทำการทดลองและเก็บข้อมูลในการทดลองเพื่อหาค่าผลตอบของกระบวนการ เมื่อได้ค่าผลตอบแล้วนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อทราบปัจจัยที่มีผล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อย่างนัยสำคัญต่อผลตอบและหาค่าสภาวะที่เหมาะที่สุดของกระบวนการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีพีเอชสูง สุดท้ายทำสรุปผลการค้นคว้าแบบอิสระและจัดทำรายงานนำเสนอผลการศึกษา

3.1 การศึกษาเก็บข้อมูลพื้นฐานของระบบ

3.1.1 ระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ใช้ในการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

3.1.1.1 Pre Filter μm

3.1.1.2 High Pressure Pump

3.1.1.3 High Pressure Vessel ซึ่งบรรจุเมมเบรน (Membrane) ไว้ภายใน โดยประกอบด้วย 5 vessel แต่ละ vessel บรรจุเมมเบรนไว้ 4 ท่อน (module)

3.1.1.4 Flow Meterและวาล์วควบคุมปริมาณ

3.1.1.5 ระบบควบคุม

3.1.2 ระบบการล้างเมมเบรน มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้ คือ

3.1.2.1 Cleaning Tank หรือ Mixing Tank ถังผสมสารเคมี ขนาด 1000 ลิตร

3.1.2.2 ปั๊ม (Cleaning Pump)

3.1.2.3 Filter 0.4 μm.30 inch จำนวน 4 ท่อนและ Housing Filter

3.1.2.4 Heating Coil และระบบควบคุมอุณหภูมิ

3.1.2.5 ระบบท่อที่ใช้ในการเติมน้ำ (Fill Water Pipe)

3.1.2.6 ระบบท่อที่ใช้ในการล้าง (Cleaning Pipe)

3.1.2.7 ระบบท่อที่ใช้ในการล้างทิ้ง (Flushing Pipe)

3.1.3 เมมเบรนที่ใช้ในการทดลอง

เมมเบรน FILMTEC™ ขนาด 8 นิ้ว ยาว 40 นิ้ว รุ่น BW30LE-440 มีลักษณะดังรูป 3.2 และมีค่าควบคุมในการใช้งาน มีดังนี้

3.1.3.1	Membrane Type	Polyamide Thin-Film Composite
3.1.3.2	Maximum Operating Temperature	113°F (45°C)
3.1.3.3	Maximum Operating Pressure	600 psig (41 bar)
3.1.3.4	Maximum Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
3.1.3.5	pH Range, Continuous Operation	2 – 11
3.1.3.6	pH Range, Short-Term Cleaning	1 – 13
3.1.3.7	Maximum Feed Flow	5 gpm (19 m^3/hr)
3.1.3.8	Maximum Feed Silt Density Index	SDI 5
3.1.3.9	Free Chlorine Tolerance	< 0.1 ppm

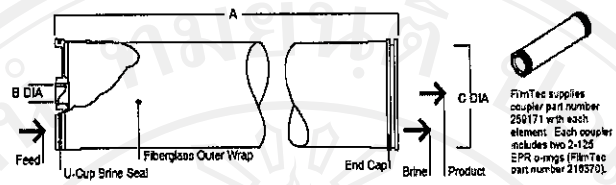
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Product Specifications

Product	Nominal Active Surface Area ft² (m²)	Product Water Flow Rate gpd (m³/d)	Stabilized Salt Rejection Cl⁻ (%)
BW30LE-440	440 (41)	11,500[1] (44)	99.0

1. Permeate flow and salt rejection based on the following standard conditions: 2,000 ppm NaCl, 150 psi (1.0 MPa), 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. Minimum salt rejection for individual element is 98.0%.

Figure 1



Dimensions – Inches (mm)

Product	Typical Recovery Rate (%)	A	B	C
BW30LE-440	15	40.0 (1,016)	1.5[3] (38)	7.9 (201)

1. Typical recovery rate shown is for a single element. Recovery rate is calculated by dividing permeate flow rate by feed flow rate.
2. Refer to FilmTec Design Guidelines for multiple-element applications and recommended element recovery rates for various feed sources.
3. Element to fit nominal 8.00-inch (203 mm) I.D. pressure vessel.

1 inch = 25.4 mm

รูป 3.2 รายละเอียดของเมมเบรนแบบ Thin Film Composite รุ่น BW30LE-440
(Dow Chemical Company, 1993)

3.2 การออกแบบการทดลอง

3.2.1 เลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต

การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลอย่างนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกรองและปริมาณการกรอง โดยในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระบบกระบวนการผลิตและกระบวนการล้าง รวมไปถึงตำราและคู่มือทางเทคนิคของทางบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักและอุปกรณ์เพื่อศึกษาหาปัจจัยในการทดลอง พบว่า มีปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อกระบวนการดังนี้ คือ 1) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารเคมี 2) อุณหภูมิของสารเคมี และ 3) อัตราการไหลของสารเคมี โดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยแต่ละปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ ซึ่งแสดงดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ปัจจัย ระดับ และขอบเขต สำหรับการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีพีเอชสูง

ปัจจัย	ต่ำ	กลาง	สูง	หน่วย
pH	11	11.5	12	-
อุณหภูมิ	25	30	35	°C
อัตราการไหล	500	625	750	L/min.

จากตาราง 3.1 ขอบเขตของปัจจัยแต่ละตัวที่ใช้ กำหนดค่าปัจจัยในแต่ละระดับนั้นผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยจากการแนะนำในคู่มือการล้างเมมเบรนของบริษัท Dow Chemical ซึ่งกำหนดให้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ค่าความเป็นกรดด่างของสารเคมี (pH) 11 – 12 อุณหภูมิของสารเคมีในการล้าง ไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารเคมีในการล้าง 6 – 9 m^3/hr ต่อ Vessel (ในระบบที่ใช้ทดลองนี้ประกอบด้วย 5 Vessel คิดเป็น ลิตรต่อนาที เท่ากับ 500 – 750 ลิตรต่อนาที)

3.2.2 เลือกตัวแปรผลตอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลตอบทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณในกระบวนการผลิตน้ำหลังจากมีการล้างสื่อกรอง โดยในด้านคุณภาพ คือ ประสิทธิภาพการกรอง (%Salt Rejection) และด้านปริมาณ คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณการกรอง (%Recovery) โดยคิดในอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการล้างเมมเบรน ซึ่งรายละเอียดการคำนวณค่าผลตอบกล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2

3.2.3 เลือกการออกแบบการทดลอง

เนื่องจากปัจจัยในกระบวนการมี 3 ปัจจัยและต้องการศึกษาจุดกึ่งกลางของปัจจัยด้วย ทำให้ผู้วิจัยเลือกการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3 ระดับ 3 ปัจจัย แบบบริบูรณ์หรือทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ 3^3 = 27 การทดลอง ทำการทดลองซ้ำอีก 1 ครั้งและทำการบล๊อกกิ้ง (Blocking) รวมหน่วยการทดลองให้เป็นกลุ่มเดียวกัน รวมการทดลองทั้งหมด เท่ากับ 54 การทดลอง โดยเป็นการทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ ใช้เวลานานงบประมาณสูงแต่มีความถูกต้องสูง ซึ่งการออกแบบการทดลองนี้ทำให้สามารถหาปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญ และทำการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากปัจจัยที่ไม่ได้ทำการควบคุม

ตาราง 3.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3 ระดับ 3 ปัจจัย

ลำดับการทดลอง	ลำดับการสุ่ม	บล๊อก (Blocks)	pH	Temperature (°C)	Flow Rate (Liters/min)
1	19	1	11	25	500
2	24	1	11.5	25	500
3	25	1	12	25	500
4	5	1	11	30	500
5	22	1	11.5	30	500
6	12	1	12	30	500
7	7	1	11	35	500
8	9	1	11.5	35	500
9	6	1	12	35	500
10	20	1	11	25	625
11	11	1	11.5	25	625
12	23	1	12	25	625
13	8	1	11	30	625

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 3.2 (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ลำดับการสุ่ม	บล๊อก (Blocks)	pH	Temperature (°C)	Flow Rate (Liters/min)
14	17	1	11.5	30	625
15	16	1	12	30	625
16	1	1	11	35	625
17	14	1	11.5	35	625
18	27	1	12	35	625
19	2	1	11	25	750
20	21	1	11.5	25	750
21	13	1	12	25	750
22	4	1	11	30	750
23	15	1	11.5	30	750
24	3	1	12	30	750
25	26	1	11	35	750
26	10	1	11.5	35	750
27	18	1	12	35	750
28	35	2	11	25	500
29	33	2	11.5	25	500
30	36	2	12	25	500
31	39	2	11	30	500
32	47	2	11.5	30	500
33	40	2	12	30	500
34	53	2	11	35	500
35	44	2	11.5	35	500
36	52	2	12	35	500
37	51	2	11	25	625
38	37	2	11.5	25	625
39	29	2	12	25	625
40	48	2	11	30	625
41	38	2	11.5	30	625
42	31	2	12	30	625
43	42	2	11	35	625
44	45	2	11.5	35	625
45	32	2	12	35	625
46	28	2	11	25	750
47	30	2	11.5	25	750
48	34	2	12	25	750
49	54	2	11	30	750
50	50	2	11.5	30	750
51	41	2	12	30	750
52	49	2	11	35	750
53	43	2	11.5	35	750
54	46	2	12	35	750

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.3 การทดลองและเก็บข้อมูล

3.3.1 การทดลองและเก็บข้อมูลในแต่ละปัจจัย

3.3.1.1 ทำการจดบันทึกข้อมูลการเดินระบบ (ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำและอัตราการไหลของน้ำผลผลิต) ก่อนทำการล้าง

3.3.1.2 ล้างและทำความสะอาด Cleaning Tank

3.3.1.3 ทำการเปลี่ยน Filter ขนาด 1 ไมครอน 30 นิ้ว จำนวน 4 ท่อน

3.3.1.4 ผสมสารเคมีให้ได้ค่า pH ที่ต้องการ (11 , 11.5 และ 12) โดยทำการตรวจเช็คด้วยเครื่องมือวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH Handy Meter)

3.3.1.5 ตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการและทำการเปิดสวิตท์ควบคุมความร้อน

3.3.1.6 ปรับวาล์วจ่ายเคมีเพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่ต้องการ (500 , 625 และ 750 ลิตรต่อนาที)

3.3.1.7 หยุดเครื่องผลิตน้ำเพื่อทำการต่อท่อเคมีเข้าสู่ระบบ

3.3.1.8 ปรับเปลี่ยนวาล์วเพื่อให้สารเคมีเข้าสู่ระบบบรรจุเมมเบรน

3.3.1.9 ทำการเปิดปั๊มเคมีเพื่อจ่ายสารเคมีเข้าไปทำการล้างเมมเบรนและวนกลับมาลงถังเคมีเป็นเวลา 1/2 ชั่วโมงแล้วทำการหยุดระบบการล้างเพื่อแช่ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

3.3.1.10 เมื่อครบ 1 วันให้ทำการปิดวาล์วที่วนกลับถังเคมีแล้วทำการเปิดวาล์วเพื่อปล่อยสารเคมีลงบ่อทิ้งเพื่อรอการบำบัดต่อไป

3.3.1.11 เปิดน้ำลงถังเคมีแล้วเปิดปั๊มเพื่อล้างสารเคมีให้หมด จนค่า pH เป็นกลาง

3.3.1.12 สลับวาล์วและต่อท่อให้เข้าระบบดังเดิมเพื่อทำการเดินเครื่องผลิตน้ำตามปกติ

3.3.1.13 ทำการจดบันทึกข้อมูลการเดินระบบ (ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำและอัตราการไหลของน้ำผลผลิต) หลังจากทำการล้าง

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและหาค่าสภาวะที่เหมาะที่สุดของแต่ละปัจจัย

หลังจากนำข้อมูลที่ทำการเก็บได้มาคำนวณเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการกรองและปริมาณการกรองที่เปลี่ยนแปลงหลังจาการล้างเมมเบรน และนำค่าผลตอบดังกล่าวของแต่ละการทดลองป้อนลงในโปรแกรม MINITAB Release 14 โดยมีวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

3.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \qquad (3.1)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ε คือ ความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่มักจะตั้งสมมุติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ y (ตัวแปร) มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น y จะมีการกระจายแบบนี้ได้ต้องให้ ε มีการกระจายแบบปกติด้วย และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระ ($\varepsilon_{ij} \sim NID\ (0,\sigma^2)$

การตรวจสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอน คือ

3.4.1.1 การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกแจงปกติ (normal distribution) หรือไม่

3.4.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) แล้วดูลักษณะการกระจายตัวของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่าเป็นอิสระหรือไม่

3.4.1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (variance stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน (variance stability)

3.4.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองมีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (unexplained variable) หรือมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้น้อยที่สุด ซึ่งมีสูตรตามสมการ 3.2

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)} = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้}}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} \times 100\% \qquad (3.2)$$

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ สามารถแก้ไขได้ดังนี้

3.4.2.1 เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง

3.4.2.2 ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วออกแบบการทดลองใหม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.4.2.3 ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยแล้วค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (Noise Factor) มีมากต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดผลของปัจจัยรบกวน

3.4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MINITAB Release 14 สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยโปรแกรม MINITAB Release 14 สามารถที่จะคำนวณ P-Value มาให้สำหรับเปรียบเทียบกับค่า α ที่กำหนด ซึ่งในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้กำหนดค่า $\alpha = 0.05$ หมายความว่า ค่า P-Value มีค่ามากกว่า α สรุปได้ว่า ความแตกต่างของความแปรปรวนนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ถ้าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าค่า α สรุปได้ว่าความแตกต่างของความแปรปรวนนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ

3.4.4 การสร้างสมการทำนาย

หลังจากตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองแล้ว นำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเขียนสมการสำหรับการทำนายค่าประสิทธิภาพการกรองและปริมาณการกรองที่เพิ่มขึ้นหลังจากการล้างโดยใช้โปรแกรม MINITAB Release 14 ในการวิเคราะห์ โดยมีลักษณะตามสมการ 3.3

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k}\beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k}\beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}\sum\beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (3.3)$$

3.4.5 กราฟโครงร่าง (Contour plot) และพื้นผิวผลตอบ (Surface Plot)

หลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองแล้วสร้างกราฟโครงร่างและพื้นผิวผลตอบของค่าประสิทธิภาพการกรองและเปอร์เซ็นต์ปริมาณการกรองได้ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิและอัตราการไหลของสารเคมี ด้วยโปรแกรม MINITAB Release 14

3.4.6 การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม

ในโปรแกรม MINTAB Release 14 มีฟังก์ชั่น Factorial Plot เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย เพื่อสรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการกรองและเปอร์เซ็นต์ปริมาณการกรองได้ที่เพิ่มขึ้นและหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่เป็นจุดที่ดีที่สุดของชุดการทดลอง และคำนวณหาค่าผลตอบตามสมการทำนายค่าของแต่ละผลตอบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved