

การทำให้หน้าหมักบิวทานอลเข้มข้นโดยใช้กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ



นายสารทูล เยี่ยมสมบัติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2534

ISBN 974-578-702-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

017554 117300405

21.

CONCENTRATING BUTANOL FERMENTATION BROTH  
BY REVERSE OSMOSIS

MR. SARATOON YIAMSOMBAT

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1991

ISBN 974-578-702-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การทำให้หน้าหมักบิวทานอลเข้มข้นขึ้นโดยใช้กระบวนการออสโมซิส

ย้อนกลับ

โดย

นายสารทูล เขียมสมบัติ

ภาควิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

*[Signature]*  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดาวร วัชรากัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

๘ *[Signature]* ..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

*[Signature]* ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

*[Signature]* ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจน์จที)

*[Signature]* ..... กรรมการ  
(ดร. กล้าณรงค์ ศรีรอด)

สารทูล เชื่อมสมมติ: การทำให้น้ำหมักบิวทานอลเข้มข้นขึ้นโดยใช้กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ (CONCENTRATING BUTANOL FERMENTATION BROTH BY REVERSE OSMOSIS) อ.ที่  
ปรึกษา : รศ.ดร.จिरกานต์ เมืองนาโพธิ์, 152 หน้า. ISBN 974-578-702-7

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการนำกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับมาประยุกต์ ใช้แก้ปัญหาความเข้มข้นของสารทำละลายต่ำในกระบวนการหมักบิวทานอล-อะซิโตน โดยในการหมักแบบต่อเนื่องได้นำแผ่นเยื่อกรองอูลตราฟิวเตอร์แบบไหลผ่านผิวหน้าเพื่อแยกและหมุนเวียนเซลล์จุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักคือ Clostridium acetobutylicum ATCC 824 จากนั้นน้ำหมักที่กรองผ่านจะถูกนำมากำจัดน้ำออก เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารทำละลายที่ผลิตได้ด้วยกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ โดยใช้เมมเบรนโพลีเอไมด์ที่มีพื้นที่ผิว 0.88 เมตร<sup>2</sup> โมดูลแบบม้วน ที่สภาวะความดันและอัตราการไหลเวียนที่เหมาะสมคือ 50 กิโลกรัม/เซนติเมตร<sup>2</sup> และ 3 ลิตร/นาที ตามลำดับ พบว่าที่รีโควเอรี 74 % โดยปริมาตร สามารถเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลจาก 6.0 กรัม/ลิตร เป็น 18.9 กรัม/ลิตร รีเจคชั่นของบิวทานอลเท่ากับ 87 % รีโควเอรีของบิวทานอลเท่ากับ 92.7 % ในการเพิ่มความเข้มข้นบิวทานอล 6.0 กรัม/ลิตร เป็น 18.9 กรัม/ลิตร ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.15 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลิตรผลิตภัณฑ์ (0.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลิตรผลิตภัณฑ์-เมตร<sup>2</sup> เมมเบรน) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกลั่นลำดับส่วนอย่างง่ายที่รีโควเอรีบิวทานอลเท่ากัน (92.7 %) ความเข้มข้นของบิวทานอลเพิ่มจาก 6.0 กรัม/ลิตร เป็น 67 กรัม/ลิตร ใช้พลังงานไฟฟ้า 3.2 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลิตรผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจะเห็นว่า กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าการกลั่น 95.3 %



ภาควิชา ..... วิศวกรรม เคมี .....  
สาขาวิชา .....  
ปีการศึกษา ..... 2534 .....

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

SARATOON YIAMSOMBAT : CONCENTRATING BUTANOL FERMENTATION BROTH BY REVERSE OSMOSIS. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF.CHIRAKARN MUANGNAPOH, D.Ing.,152 PP.

Reverse osmosis was applied to solve the problem of dilute solvent concentration in butanol-acetone fermentations. In the continuous butanol-acetone fermentation, a cross-flow ultrafilter was used to separate and recycle cells in a fermentation of Clostridium acetobutylicum ATCC 824. After that, by reverse osmosis, the fermentation permeate was dewatered for increasing the solvent product concentration. The polyamide membrane with 0.88 m<sup>2</sup> surface area, spiral wound module, was used at the optimum applied pressure and recirculation flow rate of 50 kg/cm<sup>2</sup> and 3.0 L/min, respectively. It was found that we can increase the butanol concentration from 6.0 g/L to 18.9 g/L at butanol rejection 87 % (recovery 74 % volume basis) and butanol recovery 92.7 %. Electrical energy consumption for increasing butanol concentration from 6.0 to 18.9 g/L by reverse osmosis was 0.15 kw.h/L.product (0.17 kw.h/L.product-m<sup>2</sup>.membrane area). Comparing with simple fractional distillation at the same butanol recovery, butanol concentration was increased from 6.0 to 67 g/L with electrical energy consumption of 3.2 kw.h/L.product. Therefore, it was seen that by comparing the electrical energy consumption of these two systems, 95.3 % energy saving was obtainable.

ภาควิชา .....วิศวกรรมเคมี.....  
สาขาวิชา .....  
ปีการศึกษา .....๒๕๓๔.....

ลายมือชื่อนิสิต ..... *Saratoon Yiamsombat* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *Chirakarn Muangnapoh* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางการวิจัยและให้ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาด่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและเพิ่มเติม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตั้งแต่ต้นจนสำเร็จเป็นรูปเล่ม ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานกรรมการ, รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย สุกาญจน์กิจและ อาจารย์ ดร.กล้าณรงค์ ศรีรอด ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ Asahi Glass Foundation ที่ได้กรุณาสับสนุนทางการเงินในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ตลอดจนเพื่อน พี่และน้อง ๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และท่านผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน ที่ได้ให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าในการศึกษามาโดยตลอด



### สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ณ
สัญลักษณ์.....	ด
บทที่	
1. บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
2. ตรวจสอบเอกสาร.....	3
2.1 ประวัติความเป็นมาของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	3
2.2 การพัฒนาเมมเบรนสำหรับกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	5
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เมมเบรนสังเคราะห์ในการแยกอัลกอฮอล์.....	7
3. ทฤษฎี.....	11
3.1 กระบวนการเมมเบรน.....	11
3.2 กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	12
3.3 กลไกการทำงานของออสโมซิสย้อนกลับ.....	12
3.4 เมมเบรนสำหรับใช้กับกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	16
3.5 โมเดลชนิดต่าง ๆ ของระบบออสโมซิสย้อนกลับ.....	19
3.6 ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	25

3.7 การคำนวณ..... X.....	27
4. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	36
4.1 เคมีภัณฑ์.....	36
4.2 เชื้อจุลินทรีย์.....	36
4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	37
4.4 วิธีการทดลอง.....	45
4.5 การวิเคราะห์ปริมาณ บิวทานอล, อะซิโตน, เอทานอล, กรดอะซิติก, และ กรดบิวทิริก โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี.....	49
4.6 การเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณตัวทำละลายที่เกิดขึ้น.....	50
4.7 การปรับเทียบมาตรวัดพลังงานไฟฟ้า.....	50
5. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	54
5.1 การศึกษาผลกระทบของความดันและอัตราการไหลของน้ำกำจัดแร่ธาตุที่มี ต่อเมมเบรน.....	54
5.2 การศึกษาผลกระทบของความดันและอัตราการไหล ที่มีต่อเพอมีเอชัน ฟลักซ์ของสารละลายสังเคราะห์และน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการอุลตราฟิ เตรชัน.....	59
5.3 การศึกษาผลกระทบของความดันและอัตราการไหล ที่มีต่อการแยก สารทำละลายในสารละลายสังเคราะห์ และน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการ อุลตราฟิเตรชัน.....	66
5.4 การศึกษาผลกระทบของสภาวะความดัน ต่อการทำให้สารทำละลายใน สารละลายสังเคราะห์เข้มข้นขึ้นด้วยการหมุนเวียนสารละลายกลับ ที่อัตราการไหลที่เหมาะสม.....	89



บทที่

หน้า

5.5 การศึกษาผลกระทบของสภาวะความดัน ต่อการทำให้สารละลายใน น้ำหมักที่ผ่านกระบวนการอุลตราฟิวเตรชั่นเข้มข้น ด้วยการหมุนเวียน สารละลายกลับ ที่อัตราการไหลที่เหมาะสม.....	96
5.6 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ในการทำให้ชีวทานอลในน้ำหมักที่ผ่าน กระบวนการอุลตราฟิวเตรชั่นเข้มข้น โดยกระบวนการออสโมซิส ย้อนกลับและการกลั่นลำดับส่วนอย่างง่าย.....	102
6. การอภิปรายและสรุปผลการวิจัย.....	108
เอกสารอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก.....	115
ประวัติผู้แต่ง.....	152

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติที่พึงมีของเมมเบรนสำหรับกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	5
2.2 รายชื่อโพลีเมอร์บางชนิดที่นำมาใช้ผลิตเมมเบรน.....	6
3.1 การเปรียบเทียบกระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส, กระบวนการอุลตราฟิเตรชั่น, และกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	11
3.2 ความสามารถของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ ในการกำจัดเกลือต่าง ๆ....	14
3.3 ความสามารถของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ ในการกำจัดสารอินทรีย์.....	16
3.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับบางชนิดที่นิยมใช้ในทางการค้า.....	19
3.5 คุณสมบัติต่าง ๆ ของโมดูลออสโมซิสย้อนกลับทั้ง 4 แบบ.....	20
5.1 ผลกระทบของความดันและอัตราการไหลของน้ำกำจัดแร่ธาตุที่มีต่อเมมเบรน....	58
5.2 ผลกระทบของความดันและอัตราการไหลต่อการแยกสารทำละลายในสารละลายสังเคราะห์.....	78
5.3 ผลกระทบของความดันและอัตราการไหลต่อการแยกสารทำละลายในน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการอุลตราฟิเตรชั่น.....	79
5.4 ผลกระทบของความดัน ต่อการทำให้สารทำละลายในสารละลายสังเคราะห์เข้มข้นขึ้น ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที.....	95
5.5 ผลกระทบของความดัน ต่อการทำให้สารทำละลายในน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการอุลตราฟิเตรชั่นเข้มข้นขึ้น ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที.....	101
5.6 ผลการกลั่นน้ำหมักที่ไม่ผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	106
5.7 ผลการกลั่นน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ.....	107

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างโมเลกุลของอะโรมาติกโพลีเอไมด์.....	6
2.2	แสดงช่วง pH ในการใช้งานของเมมเบรนที่ผลิตด้วยเซลลูโลสอะซิเตท, เซลลูโลสไตรอะซิเตท, และโพลีเอไมด์.....	7
2.3	ไดอะแกรมการทดลองการผลิตเบียร์อัลกอฮอล์ต่ำ.....	8
2.4	ไดอะแกรมการทดลองแยกน้ำจากน้ำหมักบิวทานอล.....	9
3.1	ปรากฏการณ์ออสโมซิสและออสโมซิสย้อนกลับ.....	12
3.2	กลไกการกำจัดเกลือต่าง ๆ ของระบบออสโมซิสย้อนกลับ.....	13
3.3	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบออสโมซิสย้อนกลับ.....	15
3.4	โครงสร้างโมเลกุลโพลีเมอร์ของเซลลูโลสได-ไตรอะซิเตท.....	17
3.5	ก. โครงสร้างโมเลกุลของ Poly(m-phenyleneisophthalamide).....	18
	ข. โครงสร้างโมเลกุลของ Poly(amide-sulfonamides).....	18
3.6	โมดูลแบบแผ่น.....	21
3.7	โมดูลแบบท่อ.....	22
3.8	โมดูลแบบม้วน.....	23
3.9	ก. ส่วนประกอบต่าง ๆ ของโมดูลแบบเส้นใยกลาง.....	24
	ข. ขนาดของเส้นใยกลาง.....	24
3.10	ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน.....	25
3.11	อัตราปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมมเบรนเซลลูโลสอะซิเตท.....	26
3.12	การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน.....	29
3.13	สารละลายไหลผ่านเมมเบรนแผ่นเรียบคู่ขนาน.....	31
3.14	รูปสัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ.....	34

รูปที่	หน้า	
3.15	รูปสัญลักษณ์ในการคำนวณการกลั่นลำดับส่วนอย่างง่าย.....	35
4.1	ระบบถังหมักแบบต่อเนื่องควบคุมกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเมมเบรน.....	37
4.2	ไดอะแกรมแสดงระบบถังหมักแบบต่อเนื่องควบคุมกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเมมเบรน...	38
4.3	ระบบออสโมซิสย้อนกลับ.....	40
4.4	ไดอะแกรมของระบบออสโมซิสย้อนกลับ.....	41
4.5	เมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับและโมดูล.....	42
4.6	ไดอะแกรมระบบการกลั่นลำดับส่วนอย่างง่าย.....	44
4.7	ระบบการกลั่นลำดับส่วน.....	44
4.8	วงจรการปรับเทียบวัตต์มิเตอร์แบบ 1 เฟส.....	51
4.9	ค่าปรับเทียบระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงและพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก วัตต์มิเตอร์แบบ 1 เฟส.....	51
4.10	วงจรการปรับเทียบวัตต์มิเตอร์แบบ 3 เฟส.....	52
4.11	ค่าปรับเทียบระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงและพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก วัตต์มิเตอร์แบบ 3 เฟส.....	53
5.1	เพอมีเอชันฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ก่อน ใช้งานเมมเบรน.....	56
5.2	ความต้านทานเมมเบรนกับน้ำบริสุทธิ์ ต่ออัตราการไหลที่ความดันต่าง ๆ ก่อนใช้งานเมมเบรน.....	57
5.3	เปรียบเทียบเพอมีเอชันฟลักซ์ของสารละลายสังเคราะห์กับน้ำหมัก ต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	62
5.4	เปรียบเทียบความต้านทานเมมเบรนกับสารละลายสังเคราะห์และน้ำหมัก ต่ออัตราการไหล ที่ความดันต่าง ๆ.....	63
5.5	เปอร์เซ็นต์เพอมีเอชันของน้ำหมัก เทียบกับสารละลายสังเคราะห์ต่ออัตราการ ไหล ที่ความดันต่าง ๆ.....	64

รูปที่	หน้า	
5.6	เพอมีเอชันฟลักซ์ของน้ำต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ต่อใช้งานเมมเบรน กับน้ำหมักบิวทานอล.....	65
5.7	ก. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของบิวทานอล ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในสารละลายสังเคราะห์.....	68
5.7	ข. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของบิวทานอล ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในน้ำหมักบิวทานอล.....	69
5.8	ก. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของอะซิโตน ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในสารละลายสังเคราะห์.....	70
5.8	ข. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของอะซิโตน ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในน้ำหมักบิวทานอล.....	71
5.9	ก. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของเอทานอล ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในสารละลายสังเคราะห์.....	72
5.9	ข. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของเอทานอล ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในน้ำหมักบิวทานอล.....	73
5.10	ก. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของกรดอะซิติก ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในสารละลายสังเคราะห์.....	74
5.10	ข. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของกรดอะซิติก ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในน้ำหมักบิวทานอล.....	75
5.11	ก. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของกรดบิวทิริก ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในสารละลายสังเคราะห์.....	76
5.11	ข. ค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นของกรดบิวทิริก ต่อความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในน้ำหมักบิวทานอล.....	77
5.12	ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านเมมเบรนของบิวทานอล ต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	81

รูปที่	หน้า
5.13 คำสัมประสิทธิ์การไหลผ่านเมมเบรนของอะซิโตน ต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	82
5.14 คำสัมประสิทธิ์การไหลผ่านเมมเบรนของเอทานอล ต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	83
5.15 คำสัมประสิทธิ์การไหลผ่านเมมเบรนของกรดอะซิติก ต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	84
5.16 คำสัมประสิทธิ์การไหลผ่านเมมเบรนของกรดบิวทิริก ต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	85
5.17 เปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อเพอมีเอทของสารละลายสังเคราะห์และน้ำหมัก ต่อความดัน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	88
5.18 เพอมีเอชันพลักส์ของสารละลายสังเคราะห์ ต่อเปอร์เซ็นต์รีโควารีโดยปริมาตร ที่ความดันต่าง ๆ และอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที.....	91
5.19 เปอร์เซนต์รีเจคชันของบิวทานอลในสารละลายสังเคราะห์ ต่อเปอร์เซ็นต์ รีโควารีโดยปริมาตร ที่ความดันต่าง ๆ และอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที.....	92
5.20 เปอร์เซนต์รีเจคชันของอะซิโตนในสารละลายสังเคราะห์ ต่อเปอร์เซ็นต์ รีโควารีโดยปริมาตร ที่ความดันต่าง ๆ และอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที.....	93
5.21 ความเข้มข้นของบิวทานอล ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในสารละลายสังเคราะห์ 1.0 ลิตร ที่ความดันต่าง ๆ และอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที.....	94
5.22 เปอร์เซนต์รีเจคชันของบิวทานอลในน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการอุลตราฟิวเตรชัน ต่อเปอร์เซ็นต์รีโควารีโดยปริมาตร ที่ความดันต่าง ๆ และอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที.....	98
5.23 เปอร์เซนต์รีเจคชันของอะซิโตนในน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการอุลตราฟิวเตรชัน ต่อเปอร์เซ็นต์รีโควารีโดยปริมาตร ที่ความดันต่าง ๆ และอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที.....	99

รูปที่	หน้า
5.24 ความเข้มข้นของบิวทานอล ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการ อุลตราฟิวเตรชั่น 1.0 ลิตร ที่ความดันต่าง ๆ และอัตราการใช้ 3 ลิตรต่อนาที	100
5.25 ค่าเปอร์เซ็นต์รีโคเวอรีโดยมวลของบิวทานอลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ระหว่าง กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ กับการกลั่นลำดับส่วนอย่างง่าย.....	104
5.26 ความเข้มข้นของบิวทานอลในสารละลายที่ได้ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด.....	105

## สัญลักษณ์

- A = ค่าคงที่ของเมมเบรน
- B = ค่าคงที่การไหลของสารถูกละลายผ่านเมมเบรน
- $C_{BM}$  = ความเข้มข้นของสารทำละลาย B ในเนื้อเมมเบรน
- c = ความหนาแน่นโมลในสารละลาย
- $C_{o1}$  = ความเข้มข้นสารถูกละลายในถังป้อนที่เวลาใด ๆ
- $C_{o0}$  = ความเข้มข้นสารถูกละลายในถังป้อนที่เวลาเริ่มต้น
- $D_{AB}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารถูกละลาย A ในสารทำละลาย B
- $D_{AM}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารถูกละลาย A ในเนื้อเมมเบรน
- $D_{BM}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารทำละลาย B ในเนื้อเมมเบรน
- h = ระยะระหว่างผิวเมมเบรนกับศูนย์กลางการไหลในเมมเบรนแบบแผ่นเรียบ
- ค <sub>ุ</sub>ย นาน
- k = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารถูกละลาย A ในสารทำละลาย B
- $K_A$  = สัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารถูกละลาย A
- l = ความหนาของชั้นขอบเขต
- $M_{BM}$  = ค่าโมลลิตของสารทำละลาย B ในเมมเบรน
- $N_A$  = เอมิเอชันฟลักซ์ของสารถูกละลาย A
- $N_B$  = เอมิเอชันฟลักซ์ของสารทำละลาย B
- $N_{Ba}$  = เอมิเอชันฟลักซ์ของสารทำละลาย B ก่อนใช้งานเมมเบรน
- $N_{Bb}$  = เอมิเอชันฟลักซ์ของสารทำละลาย B หลังใช้งานเมมเบรน
- $N_{Re}$  = Reynolds Number
- $N_{Sc}$  = Schmidt Number
- $N_{Sh}$  = Sherwood Number



- $P$  = ความดัน  
 $Q$  = อัตราการไหลของสารละลาย  
 $R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ  
 $R_d$  = ความต้านทาน Interaction ระหว่างสารละลายกับเมมเบรน  
 $R_f$  = ความต้านทานการอุดตันของเมมเบรน  
 $R_m$  = ความต้านทานของเมมเบรน  
 $R_o$  = ความต้านทานรวม  
 $R_s$  = เปอร์เซนต์รีเจคชัน  
 $\%R$  = เปอร์เซนต์รีโควเวอรีโดยปริมาตรของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ  
 $\%R_D$  = เปอร์เซนต์รีโควเวอรีโดยปริมาตรของการกลั่น  
 $\%SR$  = เปอร์เซนต์รีโควเวอรีโดยมวลของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ  
 $\%SR_D$  = เปอร์เซนต์รีโควเวอรีโดยมวลของการกลั่น  
 $T$  = อุณหภูมิ  
 $V_B$  = ปริมาตรโมลของสารทำละลาย B  
 $V_o$  = ปริมาตรของสารละลายป้อนเริ่มต้น  
 $V_D$  = ปริมาตรสะสมของเพอมีเอท  
 $V_{o,t}$  = ปริมาตรสารละลายในถังป้อนที่เวลาใด ๆ  
 $V_{o,0}$  = ปริมาตรสารละลายในถังป้อนที่เวลาเริ่มต้น  
 $X_A$  = สัดส่วนโมลของสารถูกละลาย A  
 $X_B$  = สัดส่วนโมลของสารทำละลาย B  
 $Z$  = ระยะทิศทางตามความหนาของชั้นขอบเขต  
 $\mu$  = ศักยภาพทางเคมี (chemical potential)  
 $\chi_B$  = สัมประสิทธิ์แอกติวิตีของตัวทำละลาย B ในสารละลาย  
 $\pi_B$  = ความดันออสโมติกของตัวทำละลาย B  
 $\sigma$  = ความหนาของเมมเบรน