การแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองในกระบวนการ
เพอร์วาพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ

นายพีรนิติ สมบัติไพรวัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BUTANOL SEPARATION FROM FERMENTATION BROTH MODEL MIXTURE IN PERVAPORATION PROCESS USING MULTI-TUBULAR PDMS MEMBRANE

Mr. Peeraniti Sombatpraiwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ
โดย	นายพีรนิติ สมบัติไพรวัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพฤกษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพฤกษ์)

.... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชุติมณฑน์ สถิรพิพัฒน์กุล)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วรกันต์ บูรพาธนะ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พีรนิติ สมบัติไพรวัน: การแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ (BUTANOL SEPARATION FROM FERMENTATION BROTH MODEL MIXTURE IN PERVAPORATION PROCESS USING MULTI-TUBULAR PDMS MEMBRANE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์,อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพฤกษ์ ,95 หน้า

ปัจจุบันวิกฤตพลังงานและราคาน้ำมัน ตลอดจนความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง พลังงานทดแทนจากแหล่งทางชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง พลังงานทางชีวภาพที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ เอทานอลและบิวทานอล แต่บิวทานอลมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพมากกว่าเอทานอล อย่างไรก็ตาม บิวทานอลจากกระบวนการหมักมีความเข้มข้นต่ำทำให้มีปัญหาต้องใช้พลังงานในการแยกบิวทานอลสูง เช่น การกลั่น ในปัจจุบันนักวิจัยให้ความสนใจต่อกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน เนื่องจากใช้พลังงานน้อยกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการแยกบิวทานอลออกจากสารละลายน้ำหมักจำลองในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อที่มีพื้นที่รวม 0.007854 ตารางเมตร ความดันด้านเพอร์มิเอต 5 ทอร์ ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ (40-70องศาเซลเซียส) และความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน (10-100 กรัมต่อลิตร) ผลการทดลองพบว่า ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (40-50 องศาเซลเซียส) เพอร์มิเอชันฟลักซ์ไม่แปรผันตามความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพอร์มิเอชันฟลักซ์แปรผันตามความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน ในกรณีที่ความเข้มข้นของบิวทานอลต่ำๆเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีค่าใกล้เคียงกันทุกอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่า เพอร์มิเอชันฟลักซ์ของอาซีโตน และเอทานอล มีแนวโน้มเหมือนเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล ส่วนฟลักซ์ของกรดอาซีติกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้น โดยที่ฟลักซ์ของกรดบิวทิริกมีค่าน้อยมาก ค่าการเลือกของบิวทานอลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนสูงๆ ความเข้มข้นของบิวทานอลมีผลต่อค่าการเลือกมากกว่าอุณหภูมิ ค่าการเลือกของอาซีโตนและเอทานอลมีแนวโน้มเหมือนค่าการเลือกของบิวทานอล แต่อุณหภูมิมีผลต่อค่าการเลือกของอาซีโตนมากกว่าของบิวทานอล และเอทานอล ผลการทดลองยังพบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำในเพอมิเอตเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และมีผลทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลจะมีค่าลดลง ในกรณีที่เพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนพบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนมากกว่า 40 กรัมต่อลิตรจะทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลในเพอมิเอตลดลง จากการศึกษาผลของอัตราป้อนพบว่า การเพิ่มอัตราป้อนในช่วงลามินาร์ทำให้ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล มีค่าลดลงเล็กน้อย ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัมต่อลิตร ให้ค่าฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล 12.36 8.69 และ 0.085 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล 22.7 22.13 และ 3.35 ค่าPSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล 551.73 511.72 และ 59.73 ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ในเพอมิเอต 48.6 34.19 และ 0.33 ตามลำดับ การแยกบิวทานอลด้วยกระบวนการเพอร์วาพอเรชันร่วมกับการกลั่นใช้พลังงานน้อยกว่าการกลั่นอย่างเดียว 1.29 เท่า ดังนั้นการแยกบิวทานอลด้วยกระบวนการเพอร์วาพอเรชันจึงมีความเป็นไปได้มาก

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....
ปีการศึกษา 2552	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

5170599621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : BUTANOL / FERMENTATION BROTH MODEL MIXTURE/ PERVAPORATION/ PDMS MULTI-TUBULAR MEMBRANE

PEERANITI SOMBATPRAIWAN: BUTANOL SEPARATION FROM FERMENTATION BROTH MODEL MIXTURE IN PERVAPORATION PROCESS USING MULTI-TUBULAR PDMS MEMBRANE. THESIS ADVISOR :ASSOC.PROF.CHIRAKARN MUANGNAPOH, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF.ARTIWAN SHOTIPRUK, Ph.D.,95 pp.

Nowadays, Oil and energy crisis including energy demand will dramatic increase in many years so the alternative energy from bio-resource is a promising choice. The bio-energy from ethanol and butanol are interested but butanol has more advantage over ethanol to be used as vehicle-fuel. However, low butanol concantration from fermentation process poses high energy consumption problem for butanol separation such as distillation. At present, many researchers pay attention to pervaporation process due to low energy consumption. Therefore, this study will focus on butanol separation from fermentation broth model mixture in pervaporation process using multi-tublar PDMS membrane having the total effective area of 0.007854 m^2 at various temperature (40-70 $^{\circ}C$) and feed butanol concentration (10-100 g/L). Permeate pressure was kapt constant at 5 tor. The experimental results showed butanol permeation flux did not vary as an increasing of feed butanol concentration at low temperature region (40-50 $^{\circ}C$). In contrary, butanol permeation flux increased as feed butanol concentrations were increased at higher temperature region. In case of low feed butanol concentration, butanol permeation flux was slightly different at all temperature operated. It was also found that permeation flux of acetone and ethanol had similar trend as butanol. Acetic acid permeation flux decreased as temperature and feed concentration were increased while butyric acid flux was nearly none. Moreover, selectivity of butanol decreased whan temperature and feed concentration were increased while feed butanol concentration had more effect on selectivity than temperature at higher feed concentration. Selectivity of acetone and ethanol had similar trend as butanol. However, temperature had more effect on selectivity of acetone than butanol and ethanol. Permeate composition results showed an increasing of water composition but decreasing of butanol as temperature was increased. An increasing of feed concentration gave higher butanol composition. However, at feed butanol concentration over than 40 g/L butanol composition in permeate was decreased. The results of feed flow rate showed slighlly decrease of permeation flux of butanol acetone and ethanol in the laminar region. In conclusion, the suitable condition was at 40 $^{\circ}C$, feed butanol concentration 40g/L correspond to butanol, acetone and ethanol permeation flux of 12.36,8.69 and 0.085 g/m^2h, selectivity of butanol , acetone and ethanol of 22.7 ,22.13 and 3.35, PSI of butanol acetone and ethanol of 551.73 ,511.72 and 59.73,permeate composition of butanol acetone and ethanol of 48.6,34.19 and 0.33 respectively. Interestingly, energy consumption of butanol separation by pervaporation followed by distillation was 1.29 times less than sole distillation. Therefore, pervaporation is promising process for butanol separation.

Department : Chemical Engineering	Student's Signature [signature]
Field of Study : Chemical Engineering	Advisor's Signature C. Muangnapoh
Academic Year : 2009	Co-Advisor's Signature [signature]

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยการแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลอง ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ จะสำเร็จไม่ได้หากปราศจากความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือ ในด้านต่างๆ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จิกานต์ เมืองนาโพธิ์ และ รศ.ดร.อาทิวรรณ โชติพฤกษ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาปัญหาอุปสรรค แนะนำ และ เอาใจใส่ดูแลในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท ปตท.จำกัด(มหาชน) ในการสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อ.ดร.ชุติมณฑน์ สถิรพิพัฒน์กุล และ ดร.วรกันต์ บูรพาธนะ กรรมการสอบวิทยานิพินธ์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยในครั้งนี้จนประสบความสำเร็จ

นอกจากนี้ขอพระขอบคุณคุณศุภศิลป์ ดาราสูรย์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องแก้ว ตลอดจนซ่อมและสร้าง Housing ของเยื่อแผ่น คุณสุนีย์ ศูนย์เครื่องมือที่ช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องการตรวจวิเคราะห์สาร ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน

พร้อมทั้งขอขอบคุณพี่บอย พี่โน๊ต หนึ่ง น้องธี น้องจิง ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัย

และท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด ตลอดจนบูรพาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ที่ทำให้มีวันนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. จ

กิตติกรรมประกาศ.. ฉ

สารบัญ.. ช

สารบัญตาราง.. ญ

สารบัญรูป... ฎ

บทที่ 1 บทนำ.. 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.. 1

1.2 วัตถุประสงค์.. 3

1.3 ขอบเขตการวิจัย.. 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.. 3

บทที่ 2 ตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง... 4

2.1 สมบัติและการใช้ประโยชน์ของบิวทานอล.. 4

2.1.1สมบัติของบิวทานอล.. 4

2.1.2 การใช้ประโยชน์จากบิวทานอล.. 5

2.2 การผลิตบิวทานอลโดยการหมัก.. 6

2.3 กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน... 8

2.3.1 แบบจำลองการละลาย - การแพร่ (solution – diffusion model) ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน.. 8

2.4 สมรรถนะของกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน.. 13

2.4.1 ค่าการเลือกของเยื่อแผ่น (selectivity, separation factor α_{ij})... 13

2.4.2 การเลือกสารของเยื่อแผ่นได้ในเทอมของ Enrichment factor, β_i 14

2.4.3 Pervaporation separation index.. 14

2.5 ปัจจัยที่ผลมีต่อสมรรถนะของระบบ.. 14

2.5.1 ความดันเพอมิเอต.. 14

2.5.2 อุณหภูมิ... 15

2.5.3 ความเข้มข้นของสารป้อน... 15

2.5.4 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเยื่อแผ่น 15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

2.5.5 ความหนาของเยื่อแผ่น.. 16
2.5.6 การพองตัวของเยื่อแผ่น... 16
2.5.7 การเกิดปรากฏการณ์ Concentration polarization..................... 16
2.6 จุดเด่นของกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน... 16
2.7 การประยุกต์ใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน... 17
2.8 การใช้งานในอุตสาหกรรม... 18
2.9 โครงสร้างของเยื่อแผ่นและวัสดุ... 18
2.10 การขึ้นรูปเยื่อแผ่น.. 19
2.11 เยื่อแผ่นและโมดูล.. 19
2.11.1 โมดุลแบบท่อ (Tubular Module).. 20
2.11.2 โมดุลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module)......................... 20
2.11.3 โมดุลแบบแผ่นเรียบและกรอบ (Plate and flames systems).... 21
2.11.4 โมดุลแบบม้วน (Spiral wound modules)................................ 22
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นที่เลือกสารอินทรีย์ผ่าน.. 23
บทที่ 3 อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย... 29
3.1 เคมีภัณฑ์.. 29
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง... 29
3.3 วิธีการทดลอง.. 31
3.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปเยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อมัด................... 31
3.3.2 ภาวการณ์ทดลอง.. 34
3.3.3ศึกษาผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชัน ฟลักซ์ ค่าการเลือก และค่า PSI ร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆในสายเพอร์มิเอต.. 35
3.3.4 ศึกษาผลของอัตราป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ ค่าการเลือก และค่า PSI ร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอต.. 35
3.3.5 ศึกษาผลของเวลาในการไหลวนต่อค่าการนำกลับของ บิวทานอลอาซีโตน และเอทานอล.. 36
3.3.6 การวิเคราะห์ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์และค่าการเลือก......................... 36
3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณบิวทานอลโดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟฟี........... 37
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง... 38

บทที่ หน้า

4.1 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์........ 38
4.2 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนต่อค่าการเลือก และค่า PSI........ 42
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆในสายเพอร์มิเอตที่อุณหภูมิต่างๆกัน........ 47
4.4 ผลของอัตราป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์........ 50
4.5 ผลของอัตราป้อนต่อค่าการเลือก และค่า PSI........ 52
4.6 ผลของอัตราป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆในสายเพอร์มิเอต........ 54
4.7 ผลของเวลาในการไหลวนต่อค่าการนำกลับ........ 55
4.8 การใช้พลังงานในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน........ 57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ........ 60
รายการอ้างอิง........ 62
ภาคผนวก........ 67
ภาคผนวก ก........ 68
ภาคผนวก ข........ 73
ภาคผนวก ค........ 82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์........ 95

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแยกบิวทานอล.............................	2
2.1	เปรียบเทียบสมบัติของบิวทานอลและเอทานอล..	4
2.2	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมัก..................................	6
3.1	องค์ประกอบของน้ำหมักจำลองในสายป้อน..	34
3.2	ภาวการณ์ทดลองแยกบิวทานออกจากสารละลายน้ำหมักจำลองโดย ใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ..	34
4.1	แสดงสมดุลมวลสารของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอลที่เวลาในการไหลวน 3 6 และ 9 ชั่วโมง..	55
4.2	เปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการแยกบิวทานอลให้บริสุทธิ์............	58

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	พลังงานจำเพาะในการทำให้บิวทานอลบริสุทธิ์โดยการกลั่น..........................	7
2.2	ภาวะสมดุลก๊าซ-ของเหลว ระหว่างบิวทานอลและเอทานอล.........................	7
2.3	กระบวนการ Pervaporation	8
2.4	กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน……………………………………………………..	9
2.5	chemical potential gradient และความดัน (P) ในเยื่อแผ่น…………………..	10
2.6	เยื่อแผ่นไม่สมมาตร...	19
2.7	โมดุลแบบท่อ (Tubular Module)……………………………………………	20
2.8	โมดุลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module)……………………………...	21
2.9	โมดุลแบบแผ่นเรียบและกรอบ (Plate and flames systems)………………...	21
2.10	โมดุลแบบม้วน (Spiral wound modules)……………………………………..	22
3.1	แสดงชุดการทดลองการแยกบิวทานอลโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ………………………………………………	30
3.2	ขั้นตอนการเตรียมสาย PDMS………………………………………………..	31
3.3	แผ่นอะครีลิคที่ใช้ในการขึ้นรูปสาย PDMS แบบหลายท่อ……………………	31
3.4	สาย PDMS ที่บรรจุในแท่งแก้ว...	32
3.5	สาย PDMS และแผ่นอะครีลิคที่ทำการปิดปลายโดยใช้ซิลิโคน......................	32
3.6	สาย PDMS ภายหลังการเติมซิลิโคน………………………………………..	33
3.7	เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ………………………………………………	33
4.1	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อฟลักซ์ ของบิวทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง.	39
4.2	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของอาซีโตนในสายป้อนต่อฟลักซ์ ของอาซีโตน ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง....	40
4.3	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลในสายป้อนต่อฟลักซ์ ของเอทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง..	40
4.4	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดอาซีติกในสายป้อนต่อฟลักซ์ ของกรดอาซีติก ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง..	41
4.5	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดบิวทิริกในสายป้อนต่อฟลักซ์ ของกรดบิวทาริก ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง..	41

4.6	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อค่า การเลือกของบิวทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง............	43
4.7	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของอาซีโตนในสายป้อนต่อค่าการเลือกของอาซีโตนที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง.....	44
4.8	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลในสายป้อนต่อค่า การเลือกของเอทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง............	44
4.9	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อค่า PSI ของบิวทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง.	45
4.10	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของอาซีโตนในสายป้อนต่อค่า PSI ของอาซีโตนที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง.....	45
4.11	ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลในสายป้อนต่อค่า PSI ของเอทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง..	46
4.12	ค่าการละลายละลายของบิวทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ............	47
4.13	ผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนัก ของสารต่างๆใน สายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง	48
4.14	ผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนัก ของสารต่างๆใน สายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง............	48
4.15	ผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนัก ของสารต่างๆใน สายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง............	49
4.16	ผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนัก ของสารต่างๆใน สายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง............	49
4.17	ผลของอัตราป้อนต่อเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และ เอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น 3.14×10^{-5} ตารางเมตร............	51
4.18	ผลของอัตราป้อนต่อเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของ กรดอาซีติกและกรดบิวทิริก ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศา	

	เซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร..	51
4.19	ผลของอัตราป้อนต่อค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และ เอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร..	52
4.20	ผลของอัตราป้อนต่อค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และ เอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน เพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร..	53
4.21	ผลของอัตราป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอต ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร..	54
4.22	ผลของเวลาในการไหลวนต่อค่าการนำกลับของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราป้อน 1.86 ลิตรต่อนาที ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์	56
4.23	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอลในสายป้อนต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอบในสายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อนาที ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์	59
4.24	พลังงานจำเพาะในการทำให้บิวทานอลบริสุทธิ์โดยการกลั่น..........................	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน วิกฤตพลังงานและราคาน้ำมันในตลาดโลก มีความผันผวนและความต้องการพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกที่มีการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย พลังงานทางเลือกที่เป็นที่สนใจ ได้แก่ เชื้อเพลิงพลังงานสะอาด(H_2-O_2 fuel) เชื้อเพลิงชีวภาพ(bio-fuel) เป็นต้น แต่การใช้เชื้อเพลิงพลังงานสะอาดนั้นยังไม่แพร่หลายเนื่องมาจากต้นทุนที่สูง รวมถึงต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ ดังนั้นงานวิจัยส่วนมากจึงมุ่งเน้นไปที่พลังงานชีวภาพ

เชื้อเพลิงชีวภาพในปัจจุบันที่มีการวิจัยกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ เอทานอลและบิวทานอล เนื่องจากเป็นแอลกอฮอล์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ แต่การใช้เอทานอลพบว่า ไม่สามารถใช้กับเครื่องยนต์รุ่นเก่า รวมถึงต้องดัดแปลงเครื่องยนต์เพื่อสามารถใช้กับเชื้อเพลิงชีวภาพเอทานอล เมื่อเปรียบเทียบเอทานอลและบิวทานอลพบว่า บิวทานอลมีค่าความดันไอ (0.33 psi) ต่ำกว่าเอทานอล (2.0 psi) [David Ramey,2004] ดังนั้นการขนส่งบิวทานอลจึงมีความปลอดภัย และสะดวกมากกว่า บิวทานอลมีโซ่คาร์บอน 4 อะตอม ในขณะที่เอทานอลมีโซ่คาร์บอนเพียง 2 อะตอม จึงมีความใกล้เคียงน้ำมันมากกว่า การเผาไหม้บิวทานอลจะไม่ก่อให้เกิดก๊าซที่เป็นอันตราย เช่น SO_X, NO_X หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ การเผาไหม้จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อทำการเปรียบเทียบการกัดกร่อนเครื่องยนต์ระหว่างบิวทานอลและเอทานอล พบว่า บิวทานอลกัดกร่อนเครื่องยนต์น้อยกว่า จากสมบัติข้างต้นจะเห็นได้ว่า บิวทานอลมีสมบัติที่ดีกว่าเอทานอลในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน

การผลิตบิวทานอลสามารถผลิตได้โดย 2 กระบวนการคือ กระบวนการทางปิโตรเคมีและโดยกระบวนการหมัก แต่เนื่องจากปัญหาวิกฤตพลังงานและราคาน้ำมันทำให้การผลิตโดยกระบวนการปิโตรเคมีมีต้นทุนเพิ่มสูงมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้กระบวนการหมักได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถใช้วัสดุชีวภาพเพื่อผลิตเป็นพลังงานอย่างต่อเนื่องและยั่งยืนได้(renewable energy) อีกทั้งยังก่อให้เกิดปริมาณก๊าซพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นเมื่อเทียบกันในอัตราต่อหน่วย จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [เอกสารเชื้อเพลิงชีวภาพ]

การผลิตบิวทานอลสามารถผลิตได้จากของเหลือทางการเกษตร เช่น ลิกโนเซลลูโลส ขุยมะพร้าว เศษไม้ กากอ้อย จากพืชโตเร็ว[biobutanol fact sheet] เช่น มันสำปะหลัง

ข้าวโพด อ้อย เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาง่ายและมีจำนวนมาก นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้าทางการเกษตรอีกทางหนึ่งด้วย

การผลิตบิวทานอลจากกระบวนการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์ *Clostridium acetobutylicum* เป็นกระบวนการเก่าแก่ (รองจากการผลิตเอทานอลจากกระบวนการหมัก) เป็นกระบวนการหมักที่มีความซับซ้อนและควบคุมยาก เนื่องจากมีวิถีเมตาบอลิก (metabolic pathway) หลายขั้นตอน การผลิตบิวทานอลโดยกระบวนการหมักถูกจำกัดจากหลายปัจจัย เช่น ความสามารถของจุลินทรีย์และภาวะการหมัก ทำให้ความเข้มข้นของบิวทานอลที่ได้จากกระบวนการหมักมีค่าต่ำ[Production of Butyric Acid and Butanol from Biomass] และได้ผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างเจือจางในน้ำหมัก ทำให้ต้องใช้พลังงานในการแยก ส่งผลต่อต้นทุนในการดำเนินงานสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จึงมีผู้ศึกษากระบวนการแยกบิวทานอลโดยกระบวนการแยกต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแยกบิวทานอล

Process	Energy requirement (MJ/kg)	
	Results from N. Qureshi,2005	Results from others
steam stripping distillation	24	> 50 (M. Matsumura ,1988)
gas stripping	22	21 (W. J. Groot,1992)
Pervaporation	14	9 (W. J. Groot,1992)
extraction/perstraction	9	14 (W. J. Groot,1992)
Adsorption	8	33 (W. J. Groot,1992)

จากตารางพบว่าการแยกโดยใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน ใช้พลังงานในการแยกต่ำกว่าการแยกโดยวิธีอื่น เช่น กระบวนการกลั่น เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการเพอร์วาพอเรชันมีจุดเด่น เช่น สามารถแยกสารที่มีปริมาณน้อยออกจากระบบ หรือแยกสารที่มีจุดเดือดต่างกันไม่มาก ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีเพิ่มเติม สามารถลดปริมาณการใช้พลังงาน มีมูลค่าการลงทุนของโครงการต่ำกว่ากระบวนการแยกแบบอื่น สามารถเลือกใช้เยื่อแผ่นที่มีสมบัติทนต่อสารเคมีความร้อน และมีสมบัติทางกลที่ดี

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาวิจัยการแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองโดยใช้เยื่อแผ่นPDMS แบบหลายท่อโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

1.2.2 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้น้ำหมักจำลอง ได้แก่ บิวทานอล เอทานอล อาซีโตน กรดบิวทิริก กรดอาซีติก และน้ำ

1.3.2 ใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic membrane)

1.3.3 ภาวะที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสายป้อน อุณหภูมิของสายป้อน อัตราการป้อน โดยให้ค่าความดันด้านเพอร์มิเอตคงที่ วิเคราะห์ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ (Permeation flux) ความเข้มข้นของสารต่าง ๆใน สายเพอมิเอต

1.3.4 สมรรถนะการแยกและภาวะที่เหมาะสม พิจารณาจาก เพอมิเอชันฟลักซ์(Permeation flux) ค่าการเลือกของเยื่อแผ่น (Selectivity) ค่าPSI และร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่าง ๆของสายเพอมิเอต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

1.4.2 ได้กระบวนการแยกบิวทานอลโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชันต้นแบบ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการ พัฒนาสำหรับอุตสาหกรรมในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติและการใช้ประโยชน์ของบิวทานอล

2.1.1. สมบัติของบิวทานอล

บิวทานอลเป็นแอลกฮอล์อิ่มตัวมีสูตรโมเลกุล คือ $C_4H_{10}O$ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 74.12 มีไอโซเมอร์ 4 ชนิด [ชมพูนุท พิภพลาภอนันต์ ,2537] คือ

1. n-Butanol, 1-butanol, n-butyl alcohol
2. Isobutanol, 2-methylpropan-1-ol, isobutyl alcohol
3. sec-Butanol, 2-butanol, sec-butyl alcohol
4. tert-Butanol, tert-butyl alcohol

บิวทานอลจัดอยู่ในกลุ่มของเชื้อเพลิงที่เป็นแอลกอฮอล์ (fuel alcohols) มีจำนวนโซ่คาร์บอน 4 อะตอมในขณะที่เอทานอลมีโซ่คาร์บอนพียง 2 อะตอม จึงมีความใกล้เคียงน้ำมันมากกว่า [Huang และ Meagher,2001] มีความสามารถละลายในน้ำมันได้ดีกว่าเอทานอล บิวทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการปิโตรเคมี และกระบวนการหมักของน้ำตาล ไอโซเมอร์ที่ได้จากกระบวนการหมักที่สามารถใช้เป็นพลังงานทางเลือก คือ เอ็น-บิวทานอล (n-butanol) ตารางที่ 2.1แสดงการเปรียบเทียบสมบัติระหว่างบิวทานอลและเอทานอล

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติของบิวทานอลและเอทานอล

สมบัติ (properties)	บิวทานอล *1	เอทานอล *2
สูตรโมเลกุล	$C_4H_{10}O$	C_2H_6O
มวลโมเลกุล	74.12 กรัมต่อโมล	46.04 กรัมต่อโมล
ความดันไอ	0.33 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	2.0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ความถ่วงจำเพาะ	0.81	0.79

สมบัติ (properties)	Butanol [*1]	Ethanol [*2]
ความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส (^{0}C)	0.81 กรัมต่อลูกบาศ์กเซนติเมตร	0.79 กรัมต่อลูกบาศ์กเซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	-89 องศาเซลเซียส	-114.1 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	117.7 องศาเซลเซียส	78 องศาเซลเซียส
จุดเดือดของสารอะซีโอโทรป	92.7 องศาเซลเซียส	78.4 องศาเซลเซียส
องค์ประกอบที่จุดอะซีโอโทรป	57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	95.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
Heat of combustion [*3]	110,000 Btu per gallon	84,000 Btu per gallon
จุดวาบไฟ	28.9 องศาเซลเซียส	16.6 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง	343 องศาเซลเซียส	363 องศาเซลเซียส
ขีดจำกัดการติดไฟ LEL	1.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	3.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ขีดจำกัดการติดไฟ UEL	11.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	19 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

([*1] http://www.sciencelab.com/xMSDS-1_Butanol-9927115, [*2] https://fscimage.fishersci.com /msds/91467.htm , [*3] http://www.butanol.com)

2.1.2. การใช้ประโยชน์จากบิวทานอล

การใช้ประโยชน์ของบิวทานอล นอกจากใช้เป็นพลังงานทางเลือก ยังสามารถใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้ (http://www2.basf./oxoproducts/pdfs/n-but.pdf)

1. เป็นตัวทำละลายในน้ำมันหอมระเหย
2. ใช้เป็นสารสกัดสำหรับสารปฏิชีวนะ ฮอร์โมน และวิตามิน
3. เป็นตัวทำละลายสำหรับอุตสาหกรรมสี การเคลือบผิว เรซินสังเคราะห์ สีย้อมผ้า
4. ตัวทำละลายสำหรับการบูร
5. สารทำให้เกิดการบวมสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ
6. น้ำมันหล่อลื่นเบรก สารทำความสะอาด

2.2 การผลิตบิวทานอลโดยการหมัก

บิวทานอลสามารถผลิตได้ 2 วิธี [ชมพูนุท พิภพลาภอนันต์,2537] คือ โดยกระบวนการทางปิโตรเคมีและโดยกระบวนการหมัก ในปัจจุบันการผลิตบิวทานอลจากกระบวนการทางปิโตรเคมีมีต้นทุนที่สูงขึ้น ในขณะที่การผลิตบิวทานอลจากกระบวนการหมักมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ สามารถใช้วัสดุชีวภาพเพื่อผลิตเป็นพลังงานอย่างต่อเนื่องและยั่งยืนได้(renewable energy)ได้ อีกทั้งยังก่อให้เกิดปริมาณก๊าซพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นเมื่อเทียบกันในอัตราต่อหน่วย จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [เอกสารเชื้อเพลิงชีวภาพ]

แต่อย่างไรก็ตามการผลิตบิวทานอลจากกระบวนการหมักจะเกิดปฏิกิริยายับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องมาจากตัวทำละลายที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้น ทำให้ร้อยละของการเปลี่ยนสารอาหารไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่ำ คือประมาณร้อยละ 32 ความเข้มข้นของตัวทำละลายรวมมีค่าประมาณ 20.8 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 2.2

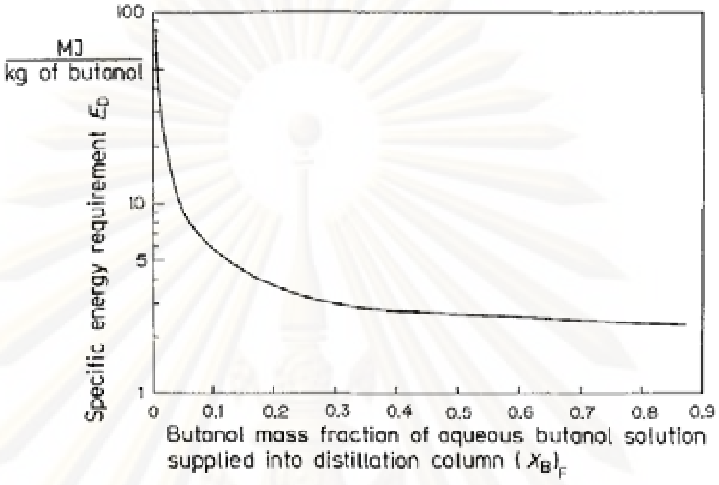
ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมัก

ผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)
บิวทานอล	5 - 10
อาซีโตน	2.5 - 5
เอทานอล	0.5 – 1.0
กรดอาซีติก	0.1 - 0.5
กรดบิวทิริก	0.1 -0.2

โดยทั่วๆไป อัตราส่วนของตัวทำละลายเท่ากับ 3:6:1 (อาซีโตน:บิวทานอล:เอทานอล) (ณรงค์ชัย ประภากรวิริยะ, 2538)

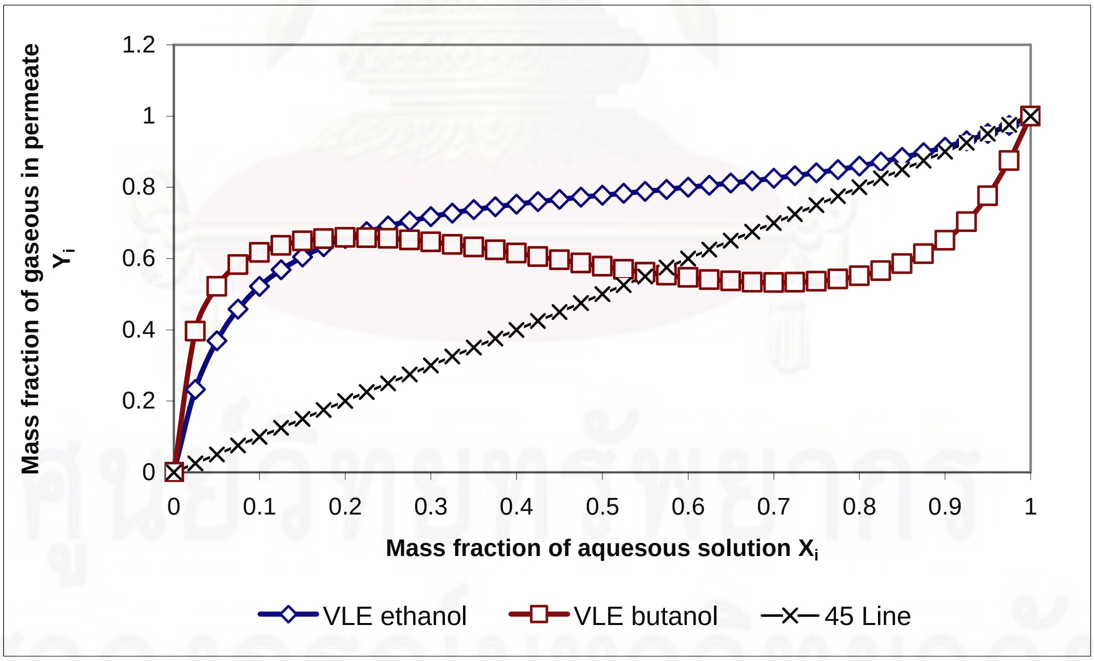
จากการที่สารละลายมีความเข้มข้นของตัวทำละลายต่ำ จึงทำให้สูญเสียพลังงานในการแยกบิวทานอลสูง จากการสำรวจเอกสาร พบว่าการใช้พลังงานในการแยกบิวทานอลโดยการกลั่น ที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใช้พลังงานในการแยกน้อยกว่าความเข้มข้นของบิวทานอลที่ความเข้มข้น 0.5เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก 25 เท่า ดังรูปที่ 2.1 [Matsumura และ Kataoka,1988] รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบภาวะสมดุลก๊าซ-ของเหลวระหว่างบิวทานอลและเอทานอล พบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยมวลของบิวทานอลมีค่า 0.57 ไม่สามารถแยกบิวทานอลให้มีความบริสุทธิ์ได้ เนื่องจากเกิดการรวมตัวของบิวทานอลและน้ำ สำหรับเอทานอลพบว่า

อัตราส่วน โดยมวลของเอทานอลมีค่า 0.95 ไม่สามารถแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์ได้ เนื่องจากเกิดการรวมตัวระหว่างเอทานอลและน้ำ



รูปที่ 2.1 พลังงานจำเพาะในการทำให้บิวทานอลบริสุทธิ์โดยการกลั่น

[Matsumura และ Kataoka ,1988]



รูปที่ 2.2 ภาวะสมดุลก๊าซ-ของเหลว ระหว่างบิวทานอลและเอทานอล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน [Marion,2006]

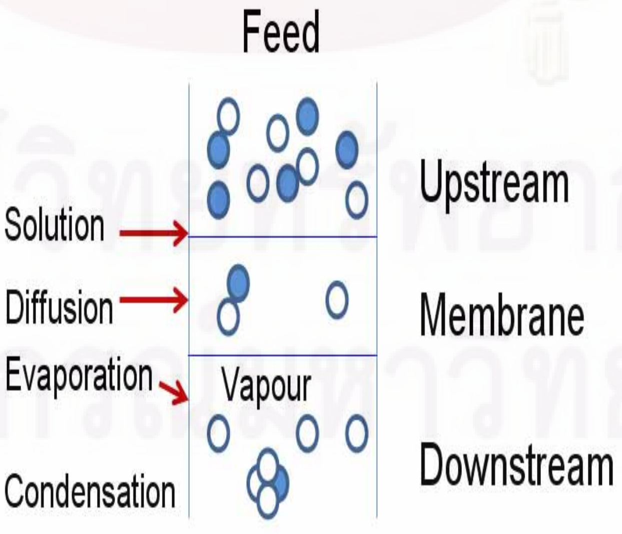
ในปี 1917 Kober สังเกตพบว่าของเหลวมีการระเหยผ่านผ่านถุงเซลโลเฟนที่ปิดสนิทในอากาศจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เพอร์วาพอเรชัน Farber พบว่ากระบวนการเพอร์วาพอเรชันสามารถนำมาใช้ในการแยกและทำให้โปรตีนเข้มข้นขึ้นโดยสามารถนำมาแยกโปรตีนจากกลีเซอรอล และน้ำ

ในปี 1956 Heisler ทำการศึกษาการแยกสารละลายน้ำ-เอทานอล 80 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร โดยใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน และใช้ถุงเซลโลเฟนในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าฟลักซ์ 0.206 กรัมต่อตารางเซนติเมตร-ชั่วโมง

สำหรับการใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ได้มีผู้ทำการศึกษาการแยกสารละลายอินทรีย์-อินทรีย์ (Organic-Organic) โดย Binning และคณะ ทำการศึกษาการแยกสารโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน พบว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมไฮโดรคาร์บอนและเคมีอินทรีย์

2.3.1 แบบจำลองการละลาย - การแพร่ (solution – diffusion model)ในกระบวนการเพอร์วา พอเรชัน

การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นไม่มีรูพรุน (dense membrane) ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน อธิบาย ได้โดยอาศัยแบบจำลองการละลาย-การแพร่ (solution–diffusion model) ขั้นตอนการถ่ายเทมวลประกอบด้วย (รูปที่ 2.3)



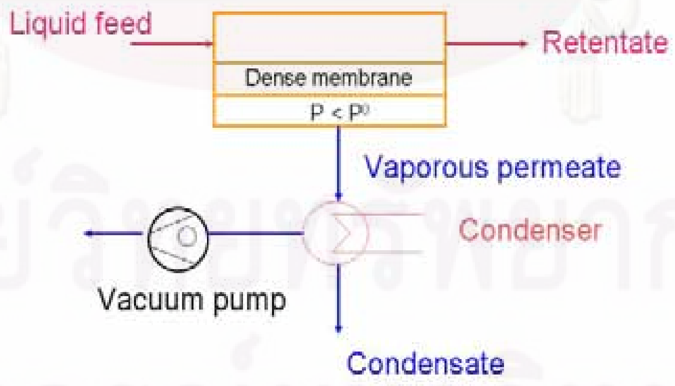
รูปที่ 2.3 กระบวนการ Pervaporation
(รัตนา จิระรัตนานนท์. กระบวนการแยกเยื่อแผ่นสังเคราะห์,2543)

1. การละลายหรือการดูดซับของสารป้อนที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น – สารละลายป้อน
2. การแพร่ในเยื่อแผ่น
3. การระเหยของสารจากผิวเยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอต

ส่วนที่สำคัญคือ เยื่อแผ่น (membrane) โดยเยื่อแผ่น ที่ใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

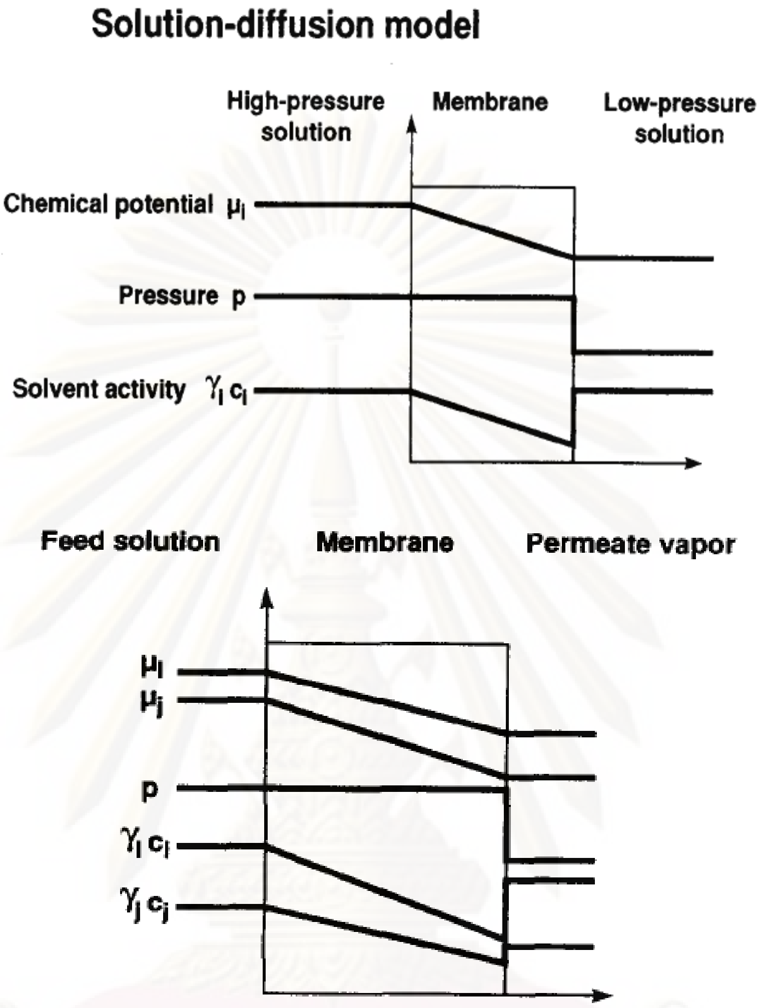
1. Organic selective membrane (Hydrophobic membrane) ได้แก่ Silicone Membrane ชนิดนี้ใช้สำหรับแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลาย
2. Water selective membrane (Hydrophillic membrane) ได้แก่ PVA composite, chitosan Membrane ชนิดนี้ ใช้สำหรับแยกน้ำออกจากสารละลาย

กระบวนการเพอร์วาพอเรชันเป็นกระบวนการแยกสารออกจากสารละลายผสมโดยอาศัยกลไกการแยกแบบการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion)ของสารในเยื่อแผ่นภายใต้แรงขับ โดยสารละลายป้อนจะสัมผัสกับเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุน และสารที่ผ่านเยื่อแผ่นออกทางด้านเพอร์มิเอตจะอยู่ในสถานะก๊าซ เนื่องจากสารป้อนมีความชอบกับเยื่อแผ่นที่ต่างกัน และค่าการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นมีค่าต่างกันจึงทำให้เกิดการแยกได้ กระบวนการเพอร์วาพอเรชันสามารถใช้ในการแยกสารที่มีความเข้มข้นต่ำให้มีความบริสุทธิ์สูง กระบวนการนี้ต่างจากกระบวนการแยกโดยเยื่อแผ่นอื่น เนื่องจากการถ่ายเทมวลในกระบวนการนี้มีการเปลี่ยนสถานะของของเหลวไปสู่สถานะก๊าซ แรงขับในการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเนื่องจากการลดค่าความดันไอทางด้านเพอร์มิเอตให้มีค่าต่ำกว่าความดันทางสารละลายป้อน เช่นการใช้ sweeping gas ชนิดที่เป็น inert gas การทำให้เป็นสุญญากาศ (ดังรูปที่ 2.4) หรือการควบแน่นของไอบนผิวที่เย็น (Volkov,1994)



รูปที่ 2.4 กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน
http://www.iitk.ac.in/che/pkb-rc-membrane_files/image004.jpg

การละลายหรือการดูดซับของสารผสมในสารละลายป้อนเข้าสู่เยื่อแผ่น ขึ้นอยู่กับแรงกระทำระหว่าง โมเลกุลของตัวทำละลายกับโมเลกุลของเยื่อแผ่น ตัวทำละลายที่มีแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์ สูงกว่าจะถูกดูดซับในพอลิเมอร์ได้ดีกว่า (Wijmans,1995)



รูปที่ 2.5 chemical potential gradient และความดัน (P) ในเยื่อแผ่น

ความสามารถในการซึมผ่านเป็นผลมาจากความสามารถในการละลายและการแพร่ของสารในเยื่อแผ่นภายใต้แรงขับ เนื่องจากความแตกต่างของ chemical potential ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับเยื่อแผ่น โดยที่ของไหลในเยื่อแผ่นจะสมดุลกับของไหลที่สัมผัสกับเยื่อแผ่น ซึ่ง chemical potential gradient และความดัน แสดงดังรูปที่ 2.5

บริเวณผิวหน้าร่วม(Interface)ระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่น ค่า chemical potential ของสารละลายป้อนจะสมดุลกับ chemical potential ภายในเยื่อแผ่น ดังสมการ

$$\mu_i^0 + RT\ln(\gamma_{io}c_{io}) + v_i(p_0 - p_{isat}) \quad = \quad \mu_i^0 + RT\ln(\gamma_{io(m)}c_{io(m)}) + v_i(p_0 - p_{isat}) \qquad (2.1)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเข้มข้นบริเวณบริเวณผิวหน้าร่วมของสารละลายป้อนได้

$$c_{i0(m)} = \frac{\gamma_{i0} c_{i0}}{\gamma_{i0(m)}} = K_i \mathrm{g} c_{i0} \qquad (2.2)$$

โดยที่ค่า K_i คือ สัมประสิทธิ์ของ liquid-phase sorption ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของ activity coefficient

โดยที่ $C_{io(m)}$ คือ ความเข้มข้นของสาร i ในเยื่อแผ่น

C_{io} คือ ความเข้มข้นของสาร i ในของเหลว(สายป้อน)ที่สัมผัสเยื่อแผ่น

$$\mu_{io} = \mu_{io(m)}$$

$$\mu_{il(m)} = \mu_{il}$$

เมื่อ i_o คือ สาร i ในสารละลายป้อน

$i_{o(m)}$ คือ สาร i ที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น-สารละลายป้อน

$i_{l(m)}$ คือ สาร i ที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นและด้านเพอร์มิเอต

i_l คือ สาร i ทางด้านเพอร์มิเอต

พิจารณาบริเวณระหว่างบริเวณผิวหน้าร่วมของเยื่อแผ่น และเพอร์มิเอต ความดันจะลดจาก P_o บริเวณเยื่อแผ่น ลงไปสู่ P_e คือความดันไอในสายเพอร์มิเอต(ก๊าซ) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูป chemical potential ในแต่ในเฟส ได้ดังนี้

$$\mu^0{}_i + RT\ln(\gamma_i c_{il}) + RT\ln(\frac{P_l}{P_{isat}}) = \mu_i^o + RT\ln(\gamma_{i(m)} c_{il(m)}) + v_i(P_o - P_{isat}) \qquad (2.3)$$

และจัดรูปสมการใหม่

$$c_{il(m)} = \frac{\gamma_{il}}{\gamma_{il(m)}} \bullet \frac{P_l}{P_{isat}} \bullet c_{il} \bullet \exp\left(\frac{-v_i(P_o - P_{isat})}{RT}\right) \qquad (2.4)$$

เนื่องจาก V_i ในสมการด้านบน คือปริมาตรเชิงโมลของสารในสถานะของเหลวในเยื่อแผ่นซึ่งถือว่าน้อยมาก ดังนั้น term exponential จากสมการที่ (2.4) จึงมีค่าประมาณ 1

$$c_{il(m)} = \frac{\gamma_{il}}{\gamma_{il(m)}} \bullet \frac{P_l}{P_{isat}} \bullet c_{il} \qquad (2.5)$$

เทอม $c_{il}P_l$ สามารถแทนที่ได้ด้วยความดันย่อย (P_{il})

$$c_{il(m)} = \frac{\gamma_{il}}{\gamma_{il(m)}} \bullet \frac{P_l}{P_{isat}} = K_i^G P_{il} \qquad (2.6)$$

โดยที่ K^G คือ sorption coefficient ของเฟสก๊าซ

เทอมความเข้มข้นในสมการที่ (2.2) และ (2.6) สามารถแทนลงในสมการ

$$J_i = \frac{D_i(c_{io(m)} - c_{il(m)})}{l}$$

โดยที่ค่า D_i แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

จากความสัมพันธ์สำหรับค่าฟลักซ์ของเยื่อแผ่น เมื่อของเหลวและก๊าซอยู่ในภาวะสมดุล สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของเหลวและก๊าซแสดงได้ดังนี้

$$\mu_i^0 + RT\ln(\gamma^L{}_{io}c^L{}_{io}) + v_i(p_0 - p_{isat}) = \mu_i^0 + RT\ln(\gamma^G{}_{io(m)}c^G{}_{io(m)}) + RT\ln(\frac{p_0}{p_{isat}}) \qquad (2.7)$$

และทำตามสมการที่ (2.3) ถึง (2.6) จะได้

$$c_{io} = \frac{\gamma^G{}_{io}}{\gamma^L{}_{io}P_{isat}} P_{io} \qquad (2.8)$$

โดยที่ P_{io} คือ ค่าความดันไอย่อยของสาร i ที่สมดุลกับของไหลป้อน เทอม $\frac{\gamma^G{}_{io} \cdot P_{isat}}{\gamma^L{}_{io}}$ สามารถแทนได้ด้วยค่า Henry's coefficient,H_i แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้

$$c_{io(m)} = \frac{\gamma^G{}_{io}}{\gamma_{io(m)}} \bullet \frac{P_{io}}{P_{isat}} = K_i^G P_{io} \qquad (2.9)$$

รวมสมการที่ (2.6) และ (2.9) ในสมการ $J_i = \frac{D_i(c_{io(m)} - c_{il(m)})}{l}$ จะได้

$$J_i = \frac{P^G{}_i}{l}(P_{io} - P_{il}) \qquad (2.10)$$

$$= \frac{P^G{}_i}{l}(c_{io}\gamma^L{}_{io}P_{isat} / \gamma^G{}_{io} - P_{il})$$

$$= \frac{P^G{}_i}{l}(c_{io}H_i - P_{il})$$

จากสมการที่ (2.8) จะได้

$$K_i = K^G{}_i H_i \qquad (2.11)$$

$$P_i = P^G{}_i H_i \qquad (2.12)$$

สมการที่ (2.10) สามารถจัดรูปอยู่ในเทอมของฟลักซ์ ดังสมการที่ (2.13)

$$J_i = \frac{P_i}{l}(c_{io} - P_{il} / H_i) \qquad (2.13)$$

2.4 สมรรถนะของกระบวนการ เพอร์วาพอเรชัน (Feng,2009 ; Huang,1997 ; Huang และ Meagher, 2001.)

การพิจารณาสมรรถนะของกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน นอกจากค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์แล้วยังต้องพิจารณา

2.4.1. ค่าการเลือกของเยื่อแผ่น (selectivity, separation factor α_{ij}) ดังแสดงในสมการ

$$\alpha_{ij} = \frac{(C_{ip} / C_{jp})}{(C_{if} / C_{jf})} \qquad (2.14)$$

เมื่อ α_{ij} = 1 แสดงว่าไม่มีการแยกสารในระบบ

เมื่อ α_{ij} มีค่าสูง แสดงว่ามีการเลือกสารผ่านเยื่อแผ่นได้ดี

เมื่อ i = องค์ประกอบของสารป้อนที่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีกว่า

j = องค์ประกอบของสารป้อนที่ผ่านเยื่อแผ่นได้น้อยกว่า

p =สายเพอร์มิเอต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

f = สารละลายป้อน

2.4.2. การเลือกสารของเยื่อแผ่นได้ในเทอมของ Enrichment factor, β_i ดังสมการ

$$\beta_i = \frac{C_{ip}}{C_{if}} \qquad (2.15)$$

ซึ่ง β_i คืออัตราส่วน ความเข้มข้นของสาร i ในสายเพอร์มิเอตต่อสารละลายป้อน ถ้า β_i มีค่าสูง แสดงว่าเยื่อแผ่นแยกสารได้ดี ค่า α_{ij} นิยมใช้ในทางปฏิบัติมากกว่าค่า β_i

2.4.3. Pervaporation separation index เป็นดัชนีที่ใช้ในการเลือกเยื่อแผ่น ซึ่งพิจารณาจากค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ (J) และค่าการเลือกผ่านสาร (α_{ij}) (Fouad and Feng,2009)

$$PSI = J(\alpha_{ij} - 1) \qquad (2.16)$$

เนื่องจากฟลักซ์และการเลือกของเยื่อแผ่นแปรผกผันกัน คือ เมื่อค่าฟลักซ์สูง ค่าการเลือกจะต่ำ ทำให้ไม่สามารถประเมินสมรรถนะของกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

Huang and Yeom (1990) ได้นิยาม pervaporation separation index (PSI) เป็นดัชนีที่ใช้ในการเลือกเยื่อแผ่นที่มีความเหมาะสม ระหว่างเพอร์มิเอชันฟลักซ์ และ ค่าการเลือกสารของเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ

ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นและค่าการเลือกผ่าน (selectivity) ได้แก่ ความดันเพอร์มิเอต อุณหภูมิ ความเข้มข้นและองค์ประกอบของสารละลายป้อน สมบัติของทางกายภาพและเคมีของสาร ความหนาของเยื่อแผ่น การพองตัวของเยื่อแผ่น รวมถึงการเกิด concentration polarization

2.5.1. ความดันเพอร์มิเอต (Smitha ,2004 ; Marion,2006)

ความแตกต่างของความดันระหว่างสารละลายป้อนและสายเพอร์มิเอต มีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทมวล โดยทั่วไปความดันด้านเพอร์มิเอตจะควบคุมให้มีค่าต่ำที่สุดและให้มีค่าต่ำกว่าความดันด้านสารละลายป้อน เพื่อเพิ่มแรงขับทางด้านพอมิเอต ให้มีค่ามากที่สุด และเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2.5.2. อุณหภูมิ (Villaluenga and Tabe-Mohammadi,2000 ; Marion, 2006)

อุณหภูมิมีผลต่อค่าการแยกและค่าฟลักซ์ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยมีผู้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าการแยกที่ลดลง และค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าฟลักซ์ จะขึ้นกับอุณหภูมิตามสมการของ Arrhenius

$$J = J_0 \exp\left\{-\frac{E_a}{RT}\right\}$$

โดยที่ ค่า E_a คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับการซึมผ่าน

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (universal gas constant)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ในปี 1968 Huang และ Lin และในปี 1995 Sun และ Ruckenstein (Villaluenga and Tabe-Mohammadi,2000) ได้อธิบายถึงผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเยื่อแผ่นดังนี้ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลทำให้โซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนขยายตัว ทำให้การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลอื่นที่ถูกกักไว้สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเยื่อแผ่นได้ จึงทำให้ค่าการเลือกผ่านของเยื่อแผ่นมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้เกิดแรงพันธะอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลและเยื่อแผ่นทำให้ค่าการละลายลดลง

2.5.3. ความเข้มข้นของสารในสายป้อน (Marion,2006 ; Johnson and Thomas,1999)

การเพิ่มความเข้มข้นของสารในสายป้อน มีผลทำให้เยื่อแผ่นเกิดการพองตัว และทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการคลายตัว ทำให้ค่าการเลือกของเยื่อแผ่นมีค่าลดลง แต่ค่าฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลอื่นที่ถูกกักไว้ สามารถแพร่ออกทางด้านเพอร์มิเอตได้มากขึ้น

2.5.4. สมบัติทางกายภาพและเคมีของเยื่อแผ่น

ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน การซึมผ่านของสารผ่านเยื่อแผ่นจะขึ้นกับปัจจัย สำคัญ 2 ประการคือ ค่าการละลาย (Solubility) และค่าการแพร่ (Diffusivity) โดยค่าการละลายจะขึ้นกับสมบัติของสารด้านเพอร์มิเอต ในขณะที่ค่าการแพร่จะขึ้นกับขนาด รูปร่าง ของโมเลกุลและค่าการแพร่ในเยื่อแผ่น (Volkov ,1994)

ในปี 1961 Binning (Marion,2006 ; Binning,1961) ได้ศึกษาปัจจัยดังกล่าว พบว่าค่าการแพร่มีค่าลดลง เมื่อขนาดโมเลกุลที่ซึมผ่านทางด้านเพอร์มิเอตมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปร่างของโมเลกุลมีผลต่อค่าฟลักซ์ คือ ถ้าโมเลกุลมีลักษณะเป็นโซ่ตรง จะทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าสูงกว่า ตัวอย่างเช่น ค่าฟลักซ์ของเฮกเซนโซ่ตรงมีค่าฟลักซ์มากกว่าโซ่กิ่ง ถึง 3 เท่า

สมบัติของสาร ถึงแม้ว่าสารที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม เท่ากันแต่ค่าการเลือกของเยื่อแผ่นมีความแตกต่างกัน เนื่องมาจากค่าการละลายของสารมีค่าต่างกัน ซึ่งค่าการละลาย เป็นปัจจัยหลักในการเลือกผ่านของเยื่อแผ่น

2.5.5. ความหนาของเยื่อแผ่น

ค่าการซึมผ่านจะเป็นสัดส่วนผันกลับของความหนาของเยื่อแผ่น แต่ค่าการเลือกจะไม่ขึ้นกับความหนาของเยื่อแผ่น [Marion,2006] ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน เยื่อแผ่นที่ใช้ถ้ามีความบางมาก จะทำให้ได้ค่าฟลักซ์ที่สูงเนื่องจากความต้านทานในการแพร่มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นที่มีความหนา

2.5.6. การพองตัวของเยื่อแผ่น

เมื่อค่าการละลายมีความสำคัญมากกว่าค่าการแพร่ จะทำให้เยื่อแผ่นเกิดการบวม หรือพองตัว(swelling)ซึ่งจะมีผลต่อค่าฟลักซ์และค่าการเลือกมีค่าลดลง[Sunและ Ruckenstein.1995, Smitha ,2004] รวมถึงทำให้ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นมีค่าลดลง โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาเยื่อแผ่นให้มีความชอบต่อสารหนึ่งมากกว่าอีกชนิดหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าการชอบต่อสารใดมีค่าสูงมาก จะทำให้เกิดการพองตัว และสูญเสียลักษณะของเยื่อแผ่น [Villaluenga และ Tabe-Mohammadi,2000]

2.5.7. การเกิดปรากฏการณ์ Concentration polarization

สำหรับระบบ 2 องค์ประกอบ อัตราการซึมผ่าน (permeation rate) จะขึ้นกับสาร สารที่ถูกกักทางด้านบริเวณด้านหน้าของเยื่อแผ่นจะสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Concentration Polarization (CP) [Smitha, 2004 ; Marion, 2006] ปรากฏการณ์นี้จะมีผลต่อค่าการแยกของสารละลายอินทรีย์ – อินทรีย์ แต่จะไม่มีผลต่อสารละลายอินทรีย์-น้ำ

โดยทั่วไปวิธีการลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ Concentration polarization นิยมเพิ่มอัตราเร็วของสารละลายป้อนให้มีค่าอยู่ในช่วงการไหลปั่นป่วน (turbulent flow) เพื่อลดการสะสมที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น และลดบริเวณ Stagnant zone [Wijmans, 1996]

2.6 จุดเด่นของกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน [Meagher, 2001; Volkov ,1994 ; Matsumura และคณะ,1988 ; Fouad และ Feng,2009 ; Smitha, 2004]

1. สามารถแยกสารที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน สารที่ไวต่อความร้อน (heat sentsitive)
2. สามารถแยกสารอะซีโอโทรป (Azeotrope)
3. ประหยัดพลังงาน เมื่อเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการแยกโดยวิธีการอื่น
4. สามารถใช้อุณหภูมิในการดำเนินการต่ำ เมื่อเทียบกับกระบวนการแยกโดยวิธีการอื่น
5. เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สะอาด และปลอดภัย เนื่องจากในกระบวนการไม่ต้องเติมสารเคมีเพื่อช่วยในการแยก
6. ต้นทุนในการลงทุนต่ำกว่ากระบวนการอื่น

2.7 การประยุกต์ใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน [Marion, 2006]

การประยุกต์ใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชันสามารถบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

1. การนำน้ำออกจากสารละลายอินทรีย์ (dehydration aqueous oraganic mixture) [Rapin,1988 ; Deng และคณะ1991]
2. การแยกสารประกอบอินทรีย์ที่ละเหยง่าย (Volutile organic compound) ออกจากสารละลาย [Voilley และคณะ,1988 ;Bengstsson และคณะ ,1989]
3. การแยกสารละลายอินทรีย์ ออกจากสารละลายอินทรีย์ [Smitha, 2004]

2.8 การใช้งานในอุตสาหกรรม [Marion ,2006]

ในปี 1984 บริษัท GFT ใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน.ในอุตสาหกรรม ในปี 1996 มีอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชันมากถึง 63 แห่ง โดย 22 แห่งเป็นอุตสาหกรรมสำหรับการแยกเอทานอล (dehydration ethanol) 16 แห่ง สำหรับการแยก isopropanol 12 แห่ง สำหรับการแยกตัวทำละลายอินทรีย์ (Jonquieres และคณะ, 2002 ; Marion,2006)

สำหรับกระบวนการแยกสารอินทรีย์ในโรงงานอุตสาหกรรมโดยการใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชันเพื่อแยกเมทานอลออกจาก methyl tert-butyl ether (MTBE) เพื่อการผลิตสารเพิ่มค่าออกเทน [Marion ,2006 ; Smitha , 2004 ; Villaluenga และคณะ,2003]

บริษัท GFT ใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชันเพื่อทำการแยกเมทานอลในการสังเคราะห์ methyl ester 8.5 ตันต่อวัน โดยใช้เยื่อแผ่นที่ใช้สำหรับการแยกแอลกอฮอล์จากสารประกอบ Alcohol/ether/hydrocarbon เพื่อทำให้ ethyl tert-butyl ether (ETBE) มีความบริสุทธิ์และเพิ่มค่าออกเทน (Jonquieres และคณะ,2002 ; Marion ,2006)

นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่อใช้กระบวนการผสมระหว่างกระบวนการกลั่นและกระบวนการเพอร์วาพอเรชันพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการแยกได้ถึง10-30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งดีกว่ากระบวนการกลั่น เยื่อแผ่นที่มีการจำหน่ายทางการค้ารุ่นแรก PERVAP2256-1 PERVAP2256-2 ใช้สำหรับแยก ethyl tert-butyl ether (ETBE) (Jonquieres และคณะ,2002 ; Marion,2006 ; Roizard และคณะ,1999)

บริษัท Texaco ทำการศึกษากระบวนการเพอร์วาพอเรชันในการแยก demethyl carbonate ให้มีความบริสุทธิ์ โดยแยกสารอะซีโอโทรป ประกอบด้วยเมทานอล 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งกระบวนการผสมระหว่างกระบวนการกลั่นและกระบวนการเพอร์วาพอเรชันสามารถใช้ในการแยกสารอะซีโอโทรปรวมถึงช่วยลดต้นทุนในการดำเนินการสูงถึง60เปอร์เซ็นต์ของกระบวนการกลั่น (Jonquieres และคณะ,2002)

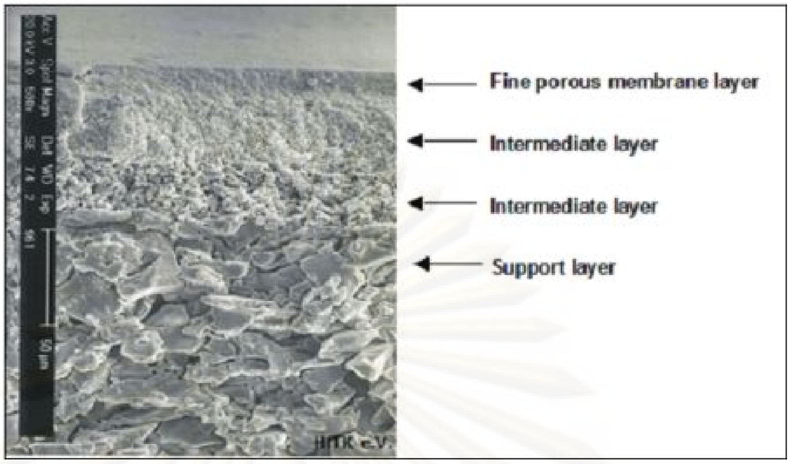
2.9 โครงสร้างของเยื่อแผ่นและวัสดุ

การใช้เยื่อแผ่นในกระบวนการแยกใช้มาตั้งแต่ปี 1960 [Smitha, 2004 ; Marion ,2006] ในปี 2004 Smitha [Smitha, 2004] ได้ศึกษาพบว่าวัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่นมีหลายชนิด เช่น zeolites ceramic วัสดุทางชีวภาพและพอลิเมอร์ ในส่วนของพอลิเมอร์มีการใช้หลายประเภท ได้แก่ ชนิดมีรูพรุน (porous) ไม่มีรูพรุน (dense) และ เยื่อแผ่นแบบไม่สมมาตร (asymmetric) (รูปที่2.6)

การขึ้นรูปเยื่อแผ่นนั้น ต้องประกอบไปด้วยชั้นการแยกที่บางมาก ซึ่งทำให้ได้ค่าฟลักซ์ที่สูง รวมถึงรักษาสมบัติความแข็งแรงของเยื่อแผ่นเอาไว้

สำหรับเยื่อแผ่นแบบไม่สมมาตร ประกอบด้วยชั้นไม่มีรูพรุน (dense) อยู่ด้านบนสุดของชั้นรองรับที่มีรูพรุนที่เป็นสารชนิดเดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปการเตรียมใช้วิธี phase inversion โดยที่สารละลายพอลิเมอร์จะถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิมล์บางๆ หรือปั่นเป็น hollow fiber และถูกจุ่มลงไปในสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย หลังจากนั้นทำให้ระเหยในอากาศ เยื่อแผ่นจะขึ้นเป็นรูปโดยการตกตะกอนของพอลิเมอร์ เมื่อตัวทำละลายถูกแทนที่โดยสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย

สำหรับเยื่อแผ่นชนิด Composite ประกอบด้วยชั้นรองรับที่มีรูพรุน โดยมีชั้นไม่มีรูพรุน (dense skin layer) อยู่ด้านบนสุดของเยื่อแผ่น โดยชั้นทั้ง 2 ของเยื่อแผ่นจะเป็นพอลิเมอร์ต่างชนิด ข้อดีของเยื่อแผ่นชนิดนี้คือ สามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและวัสดุที่นำมาขึ้นรูปเยื่อแผ่น ซึ่งเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพและราคาสูง



รูปที่ 2.6 เยื่อแผ่นไม่สมมาตร

http://kwi.dechema.de/kwi_media/Bilder/tc/ProjektF487/Figure_05.jpeg

2.10 การขึ้นรูปเยื่อแผ่น [Marion,2006]

ในปี 1982/1983 [Marion,2006] บริษัท GFT ได้ทำการพัฒนาเยื่อแผ่นชนิด composite สำหรับกระบวนการแยกเอทานอล โดยมี 3 ชั้น โดยที่ชั้นบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น คือ ชั้น PVAที่บางมาก ชั้นที่ 2 จะเป็นชั้นรองรับที่มีรูพรุนประกอบด้วย polyacrylonitrile (PAN) และชั้นที่ 3 ถูกรองรับโดย porous non-woven membrane support fabric ซึ่งพบว่าเยื่อแผ่นที่ทำการพัฒนามีความเหมาะสมในการแยกสารละลายอินทรีย์

โดยทั่วไปพอลิเมอร์ชนิด Composite เป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งต้องทำการ crosslink เพื่อให้เสถียรเมื่อสัมผัสกับของเหลวเนื่องจากพอลิเมอร์มีการละลายในของเหลวได้ วัสดุ composite ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชนิดอนินทรีย์ (inorganic polymer) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกสารละลายอินทรีย์

เยื่อแผ่นที่ผลิตจากเซรามิกเสริมแรง มีจุดเด่น คือสามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงในการดำเนินงานได้ สำหรับพอลิเมอร์อัลลอย (Polymer alloy) ใช้สำหรับแยกสารละลายอินทรีย์ โดยการใช้พอลิเมอร์ 2 ชนิด โดยชนิดแรกที่ไม่ละลายในสารละลายจะใช้เป็นส่วนโครงสร้างของเยื่อแผ่น ส่วนพอลิเมอร์อีกชนิดที่ละลายในสารละลายจะกำหนดความชอบของเยื่อแผ่นที่มีต่อการเลือกผ่าน

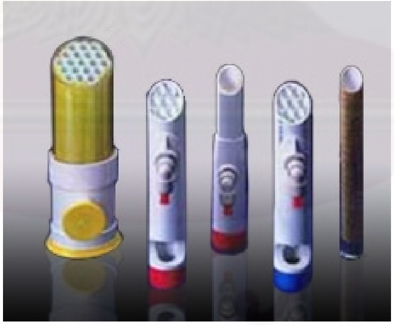
2.11 เยื่อแผ่นและโมดูล [Smitha,2004]

ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันแตกต่างจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมอื่น เนื่องจากมีการเปลี่ยนเฟสของการถ่ายเทมวล รวมถึงต้นทุนการผลิตเยื่อแผ่นมีต้นทุนสูง ส่วนที่มีความสำคัญของเยื่อแผ่นคือ โมดูล ซึ่งมีการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน สิ่งที่สำคัญในการพิจารณาการออกแบบโมดูล คือ packing density ความคุ้มค่าในการเปลี่ยนเยื่อแผ่น โดยทั่วไปสามารถแบ่งเยื่อแผ่นออกเป็น 4 ชนิด [Smitha, 2004] คือ

1. โมดุลแบบท่อ (Tubular Module)
2. โมดุลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module)
3. โมดุลแบบแผ่นเรียบและกรอบ (Plate and flames systems)
4. โมดุลแบบม้วน (Spiral wound modules)

2.11.1 โมดุลแบบท่อ (Tubular Module)

สำหรับโมดูลแบบท่อ เยื่อแผ่นมีลักษณะเป็นท่อที่มีรัศมีภายใน 12-24 มิลลิเมตรจะบรรจุในhousing โดยทั่วไปค่า packing densityของโมดูลชนิดนี้มีค่าต่ำจึงการจัดเรียงเยื่อแผ่นภายใน housing หลายเยื่อแผ่นเพื่อเพิ่มค่า packing density เยื่อแผ่นที่นิยมนำมาใช้สำหรับโมดูลนี้ คือ Zeolite จุดเด่นของโมดูลแบบท่อ สามารถป้องกันการเกิดFouling เมื่อความดันลดมีค่าน้อย แต่โมดุลชนิดนี้จะมีราคาสูงและไม่สามารถดำเนินการได้ที่ความดันสูงได้



รูปที่ 2.7 โมดุลแบบท่อ (Tubular Module)
(http://158.108.88.131/courseware/wiroj/membrane/2-6b.jpg)

2.11.2 โมดุลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module)

โมดุลแบบเส้นใยกลวง ประกอบด้วยเส้นใยที่มีรูพรุนที่มัดรวมกันบรรจุในภาชนะทรงกระบอก การป้อนสำหรับโมดูลแบบเส้นใยกลวงจะป้อนในแนวรัศมีหรือขนานกับเส้นใยกลวง ค่า packing density ของโมดูลชนิดนี้มีค่าสูง และต้นทุนการผลิตมีค่าต่ำ สำหรับปัญหาของโมดูล

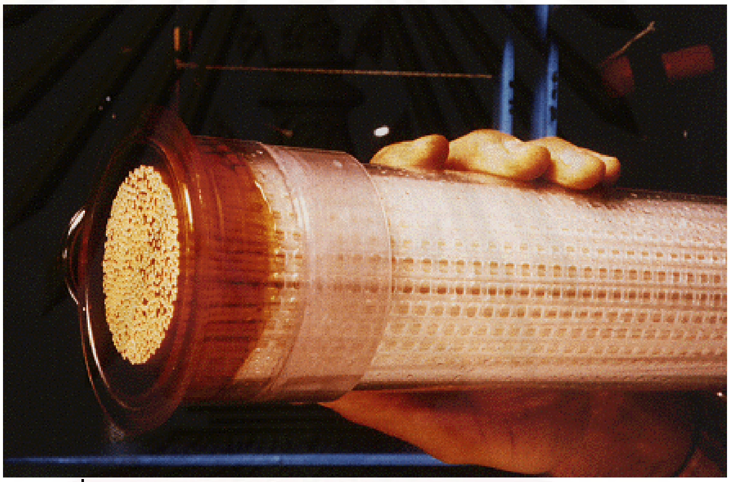
ชนิดนี้จะเกิดการสูญเสียความร้อนตามแนวการไหล และไม่สามารถใช้พื้นที่ผิวเยื่อแผ่นบริเวณด้านขาออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.11.3 โมดูลแบบแผ่นเรียบและกรอบ (Plate and flames systems)

โมดูลแบบแผ่นเรียบและกรอบ สารละลายป้อนจะไหลผ่านเยื่อแผ่นซึ่งเป็นช่องทรงกระบอกค่า packing density ของโมดูลนี้ มีค่า 100 - 400 ตารางเมตรต่อลูกบาศ์กเมตร การใช้งานสำหรับโมดูลชนิดนี้ นิยมใช้เนื่องจาก

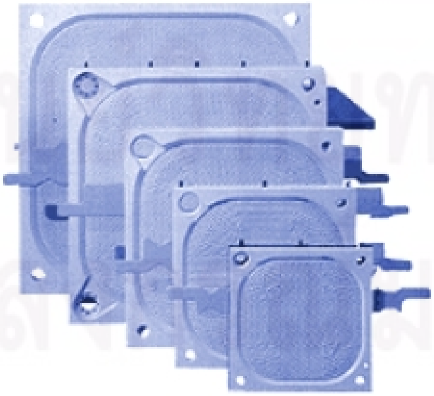
1.การใช้แผ่นปะเก็นที่ทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์

2.การใช้งานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากสามารถใส่ฮีตเตอร์ระหว่างชั้นได้



รูปที่ 2.8 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module)

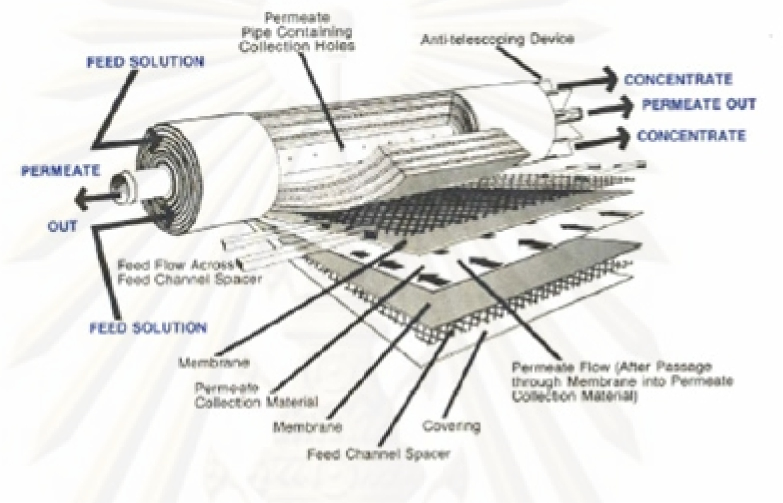
http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/wtprimer/revosmo/filter.gif



รูปที่ 2.9 โมดูลแบบแผ่นเรียบและกรอบ (Plate and flames systems)

http://158.108.88.131/courseware/wiroj/membrane/platandfram1.jpg

2.11.4 โมดูลแบบม้วนมีค่า packing density มากกว่า 900 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยเยื่อแผ่นและแผ่นรองรับวางซ้อนกันถูกม้วนรอบท่อกลวง และบรรจุในภาชนะทรงกระบอก โดยทั่วไปโมดูลประเภทนี้ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกรรมเนื่องจาก ไม่สามารถทำการเปลี่ยนเยื่อแผ่นได้



รูปที่ 2.10 โมดูลแบบม้วน (Spiral wound modules)
(http://www.kochmembrane.com/images/spiral_3.jpg)

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเพอร์วาพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่นที่เลือกสารอินทรีย์ผ่าน

Fangfang Liu และคณะ (2005) ศึกษาการแยกของอาซีโตน–บิวทานอล–เอทานอล (ABE) จากสารละลายเจือจางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ โดยใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน เยื่อแผ่นที่ใช้ คือ Poly(ether block amide) (PEBA 2533) ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นที่เลือกสารอินทรีย์ผ่านเพื่อแยกสารละลายอาซีโตน–น้ำ บิวทานอล–น้ำ และเอทานอล–น้ำ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 23–70 องศาเซลเซียส โดยสารละลายป้อนมีความเข้มข้นไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความหนาของเยื่อแผ่นที่ใช้ คือ 30 และ 100 ไมโครเมตร จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในสารละลายป้อน เพอร์มิเอชันฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะให้ค่าการเลือกผ่านของเยื่อแผ่น คือ บิวทานอล > อาซีโตน > เอทานอล และค่าการเลือกผ่านของเยื่อแผ่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นที่เพิ่ม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้เพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลลดลง ในทางตรงกันข้ามฟลักซ์ของอาซีโตนและเอทานอลเพิ่มขึ้น ค่าการเลือกผ่านของเยื่อแผ่นจะลดลง และจากการศึกษาผลของความหนาของเยื่อแผ่น พบว่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์เพิ่มขึ้นได้โดยการลดความหนาของเยื่อแผ่น และผลของ boundary layer มีความสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของเพอร์มิเอชันฟลักซ์

Fouad และคณะ (2008) ศึกษาภาวะในการดำเนินการทดลองและ concentration polarization ของการใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชันในการแยกบิวทานอลออกจากสารละลายเจือจางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งช่วงความเข้มข้นของบิวทานอล 0.03-0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เยื่อแผ่นชนิด Poly(ether-block-amide) (PEBA) ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นที่เลือกสารอินทรีย์ผ่าน ที่อุณหภูมิ 29-60 องศาเซลเซียส ความหนาของเยื่อแผ่น 50-81 ไมโครเมตร และควบคุมอัตราการไหลทางด้านสารละลายป้อนคงที่ ที่ 1.6 ลิตรต่อนาที จากการศึกษาพบว่าฟลักซ์ของบิวทานอลเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสารละลายป้อนแต่ฟลักซ์ของน้ำคงที่และแฟกเตอร์ของการแยกจะมีค่าลดลง สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ทั้งเพอร์มิเอชันฟลักซ์และแฟกเตอร์การแยกเพิ่มขึ้น ในขณะที่เยื่อแผ่นบางจะให้เพอร์มิเอชันฟลักซ์ที่สูงกว่าเยื่อแผ่นหนา และแฟกเตอร์การแยกเป็นที่ยอมรับได้ ความหนาของเยื่อแผ่นมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยก ซึ่งใช้ผลของ boundary layer ในการวิเคราะห์ เนื่องจากผลของการถ่ายเทมวล มีอิทธิพลมากกว่าผลของ concentration polarizationทำให้เพอร์มิเอชันของบิวทานอลและน้ำแตกต่างกัน

Fouad และ Xianshe Feng (2009) ใช้กระบวนการแยกเพอร์วาพอเรชันในการแยกบิวทานอลออกจากสารละลายเจือจางที่ได้จากการหมัก โดยใช้เยื่อแผ่น silicalite แบบ PDMS (silicalite-filled poly (dimethy siloxane)) ทำการศึกษาผลขององค์ประกอบทางสารละลาย

ป้อน (0.1-0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และอุณหภูมิ (25-65 องศาเซลเซียส) ที่มีผลต่อเพอร์มิเอชันฟลักซ์, แฟกเตอร์การแยก และดัชนีการแยกโดยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน (PSI) โดยเยื่อแผ่นที่ใช้มีพื้นที่ผิวสัมผัส 13.85 ตร.ซม. และควบคุมอัตราการไหลทางด้านสารละลายป้อนคงที่ ที่ 1.6 ลิตรต่อนาที เพื่อทำการลดผลของ Boundary layer และ ควบคุมความดันทางด้านเพอร์มิเอต ให้คงที่เท่ากับ 5 มม.ปรอท สำหรับความเข้มข้นของบิวทานอลจากสายเพอร์มิเอตวัดโดยใช้ Total organic carbon Analyzer (Shimadzu TOC-500) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นทางสารละลายป้อน โดยควบคุมอุณหภูมิ ค่าฟลักซ์รวมมีค่าเพิ่มขึ้นและจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับแฟกเตอร์การแยก พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นทางด้านสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับค่า PSI พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่ำ ค่าPSIจะมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นทางด้านสารละลายป้อนพบว่า ค่า PSI มีค่าลดลง สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิพบว่าทำให้ค่า PSI มีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายป้อนมีค่าน้อย การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ค่าการเลือกของเยื่อแผ่นมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปัจจัยความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็นสำคัญ

Jicai Huang และ Meagher (2001) ศึกษาการแยกบิวทานอลออกจากสารละลาย ABE ด้วยกระบวนการแยกเพอร์วาพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่น silicalite-filled silicone composite ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพของเยื่อแผ่น การทดลองใช้เยื่อแผ่นที่มีพื้นที่ผิวสัมผัส 0.01 ตารางเมตร ความเร็วสารละลายป้อน 1440 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอร์มิเอตอยู่ในช่วง 0.5–3 มม.ปรอท อุณหภูมิที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วง 30 – 70 องศาเซลเซียส และ ความเข้มข้นของบิวทานอลในสารละลายป้อนในช่วง 0.5–50 กรัมต่อลิตร วิเคราะห์องค์ประกอบของเพอร์มิเอตโดยใช้ Gas Chromatograph GC-17 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ฟลักซ์และค่าการเลือกของเยื่อแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นทางสารละลายป้อน พบว่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกบิวทานอลผ่านของเยื่อแผ่นมีค่าลดลง และสมบัติการแยกของเยื่อแผ่นที่ใช้แยกน้ำหมัก ABE ที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อพบว่า ค่าการเลือก ของบิวทานอลมีค่าน้อยกว่าในระบบ 2 องค์ประกอบ (binary mixture) ของสารละลายบิวทานอล-น้ำ แต่การใช้เยื่อแผ่น silicalite-filled silicone composite ไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ fouling ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น

Qureshi และคณะ (1999) ได้ทำการสังเคราะห์เยื่อแผ่นซิลิโคนโดยการเติมซิลิกาไลต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงบิวทานอลออกจากสารละลาย ABE-น้ำ และ จากน้ำหมัก จากการทดสอบความสามารถในการดูดซับของซิลิกาไลต์ในสารละลายผสมอาซีโตน, บิวทานอล และเอทานอล มีค่าเท่ากับ 8-12, 85-90 และ <5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยอัตราการดูดซับบิวทานอลที่อุณหภูมิ 36 และ 79 องศาเซลเซียส นั้นไม่แตกต่างกันมาก และอัตราการคาย

ซับบิวทานอลจะเกิดขึ้นเร็วที่สุดที่อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส และความดัน 1-3 ทอร์, สำหรับการศึกษาการแยกบิวทานอลโดยกระบวนการแยกเพอร์เวเพอเรชันในช่วงความเข้มข้นบิวทานอลในสารละลายป้อน 5-9 กรัมต่อลิตร , ความดันด้านเพอร์มิเอท 2-5 ทอร์ อุณหภูมิ 35-85 องศาเซลเซียส โดยใช้เยื่อแผ่นที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิการไลต์-ซิลิโคนเท่ากับ 1.5:1 พื้นที่ของเยื่อแผ่นรวม 0.022 ตารางเมตร พบว่าเยื่อแผ่นที่บางจะมีค่าการเลือกต่ำและฟลักซ์สูง ในขณะที่เยื่อแผ่นหนาจะมีค่าการเลือกบิวทานอลผ่านสูงและฟลักซ์ต่ำ ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า ฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสารละลายป้อนจะทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นแต่ค่าการเลือกบิวทานอลผ่านจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการเลือกบิวทานอลผ่านของเยื่อแผ่นซิลิการไลต์-ซิลิโคนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบค่าการเลือกของเยื่อแผ่นซิลิโคน

ชมพูนุท พิภพลาภอนันต์ (1994) ทำการศึกษากระบวนการเพอร์เวเพอเรชันที่สามารถใช้แยกบิวทานอลออกจากสารละลายบิวทานอล-น้ำ โดยใช้เยื่อที่ทำจากท่อยางซิลิโคน ได้ทำการทดลองโดยใช้สารป้อนที่มีความเข้มข้นของบิวทานอลจาก 0.5-4.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 35-60 องศาเซสเซียส และที่ความดันเพอร์มิเอท 20-50 มิลมิเมตรปรอท จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของบิวทานอลและอุณหภูมิในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟลักซ์ของบิวทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับความดันเพอร์มิเอทมีค่าลดลงในขณะที่ฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา ฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและลดความดันเพอร์มิเอทลง ซึ่งแฟกเตอร์การแยกมีค่าประมาณ 20-60 และจากการศึกษาผลของความหนาของเยื่อแผ่น พบว่าฟลักซ์ของสารเพิ่มขึ้นได้โดยการลดความหนาของเยื่อแผ่น

Srinivasan (2007) ได้ทำการศึกษากระบวนการเพอร์เวเพอเรชันในการ recovery ของ 1-butanol จากน้ำเสียของการผลิตยา โดยเยื่อแผ่นที่ใช้ คือ poly(vinylidene difluoride) membrane (PVDF) ซึ่งผลิตจาก silicon grease (ultra-thin layer) ทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรในการดำเนินการทดลอง คือ องค์ประกอบในสารละลายป้อน, อุณหภูมิในสารละลายป้อน และอัตราการไหลของเพอร์มิเอชันฟลักซ์ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของการดำเนินการทดลอง จากการทดลองพบว่า ที่องค์ประกอบในสารละลายป้อนต่ำๆ จะได้ค่าแฟกเตอร์การแยกของบิวทานอล 6.4 และฟลักซ์รวม 4.126 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบในสารละลายป้อน 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่สารละลายป้อน 50 องศาเซสเซียส อัตราการไหล 600 มิลลิลิตรต่อนาที และจะได้ว่า ฟลักซ์รวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขององค์ประกอบ อุณหภูมิ และอัตราการไหลในสารละลายป้อน ในขณะเดียวกันแฟกเตอร์การแยกจะมีค่าลดลง

Matsumura (1988) ได้ศึกษาผลของการลดพลังงานของกระบวนการเพอร์วาพอเรชันโดยการใช้เยื่อแผ่นที่ตรึงด้วยโอลีลแอลกอฮอล์ (oleyl alcohol liquid membrane) ใน

กระบวนการทำบิวทานอลให้บริสุทธิ์ เยื่อแผ่นเหลว(liquid membrane) ได้ถูกพัฒนาให้ใช้สำหรับกระบวนการแยกในปี 1987 ซึ่งในการทดลองเพอร์วาพอเรชันจะเปรียบเทียบระหว่างยางซิลิโคนกับเยื่อแผ่นที่ตรึงด้วยโอลีลแอลกอฮอล์ และเปรียบเทียบกระบวนการเพอร์วาพอเรชันกับกระบวนการกลั่นแยก จะพบว่า การใช้โอลีลแอลกอฮอล์ (oleyl alcohol) ตรึงบนเยื่อที่มีรูพรุน ทำให้สารละลายบิวทานอลที่มีความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร เข้มข้นขึ้น 100 เท่า ซึ่งเยื่อแผ่นที่ตรึงด้วยโอลีลแอลกอฮอล์นี้มีค่าการเลือกและยอมให้สารผ่านได้ดีกว่ายางซิลิโคน สำหรับกระบวนการเพอร์วาพอเรชันที่ใช้เยื่อแผ่นที่ตรึงด้วยโอลีลแอลกอฮอล์ในกระบวนการทำบิวทานอลให้บริสุทธิ์นั้น พบว่าพลังงานที่ใช้ไปเพียง 1 ใน 10 ของกระบวนการกลั่นแยก

Fadeev , Meagher และคณะ (2000) ศึกษาการแยกบิวทานอลออกจากสารละลายและจากกระบวนการหมัก ABE โดยกระบวนการแยกเพอร์วาพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่น poly[-1-(trimethylsilyl)-1-propyne] และ (PTMSP) ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในห้องทดลอง มีพื้นที่ผิวสัมผัส 109 ตร.ซม. อัตราการไหลของสารละลายป้อน 1.2 – 1.3 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 20 กรัมต่อลิตร ความดันในสาย permeate ควบคุมที่ความดันต่ำกว่า 0.01 ทอร์ วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ในสารละลายป้อน และสายเพอร์มิเอต โดยวิธีแก๊ส-โครมาโตรกราฟฟี จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ค่าการเลือก มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุด 135 และค่าเพอร์มิเอต มีค่าสูงสุดที่ 72 เปอร์เซ็นต์ ที่ 37 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเติม fatty acid พบว่าทำให้ค่าฟลักซ์ ลดลง และเกิดการ fouling ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น

Yan Wang และคณะ (2009) ศึกษาการแยกบิวทานอล ออกจาก isomer ของบิวทานอล โดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน และเยื่อแผ่นที่ใช้ในการทดลองคือ polyamide-imide (PAI) และ α-,β- หรือ γ-cyclodextrin (CD) โดยการทดลองควบคุมอัตราการป้อนที่ 80 – 85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอตถูกควบคุมให้มีค่าน้อยกว่า 0.5 kPa โดยเยื่อแผ่นมีพื้นที่ผิวสัมผัส 15.2 ตารางเซนติเมตร วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ในสายเพอร์มิเอต และสารละลายป้อน โดยใช้ GC-7890 (HP) จากผลการทดลองพบว่า PAI/α-CD มีค่าแฟกเตอร์การแยกสูงที่สุด แต่มีค่า ฟลักซ์ต่ำที่สุด เมื่อใช้ PAI/γ-CD มีค่าแฟกเตอร์การแยกต่ำที่สุด แต่มีค่าฟลักซ์สูงที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้ PAI/β-CD โดยพบว่ามีค่าแฟกเตอร์การแยก 1.53 และฟลักซ์รวม 4.4 กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของ β-CD เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ β-CD พบว่าค่าแฟกเตอร์การแยกลดลง แต่ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอล ในสารละลายป้อนพบว่าค่าฟลักซ์รวมและค่าแฟกเตอร์การแยกมีค่าลดลง

Veronica García และคณะ (2009) ศึกษาการแยกบิวทานอล โดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ (22 -40 องศาเซลเซียส) การเลือกใช้เยื่อแผ่น ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (0 – 1.36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ CELFA และ 0 – 1.0

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ P500 – 1) ความดันด้านเพอร์มิเอตควบคุมให้มีค่าต่ำกว่า 300 Pa ทุกการทดลอง และอัตราการไหล 5 x 10^{-5} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อป้องกันการเกิด concentration polarization และระบบที่มีเกลือ NaCl (0 – 1.0 % โดยน้ำหนัก) ผสมโดยเยื่อแผ่นที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิด คือ CMX-GF-010-D, CELFA และ PERTHESE P500 – 1 เยื่อแผ่นทั้ง 2 ชนิด เป็นเยื่อแผ่นแบบไม่ชอบน้ำ จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้ฟลักซ์และค่าการเลือกบิวทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายป้อนพบว่า ฟลักซ์รวม สำหรับ P500 -1 มีค่าอยู่ในช่วง 6.99-0.45 x 10^{-6} กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที สำหรับ CELFA มีค่าอยู่ในช่วง 67.91 – 101.71 x 10^{-6} กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที และค่าแฟกเตอร์การแยก สำหรับ P500 -1 มีค่า 56 $\pm$ 8 สำหรับ CELFA มีค่า 39 $\pm$ 1 สำหรับค่าเพอร์มิเอตของบิวทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสารละลายป้อน เมื่อทำการศึกษาผลของเกลือ NaCl ที่ใส่ในระบบพบว่า การใส่เกลือลงในระบบไม่มีผลต่อค่าการเลือกของเยื่อแผ่นทั้ง 2 ชนิด

ฉลองศรี วานิชกร (1994) ปรับปรุงสมบัติการแยกเอทานอลจากสารผสมเอทานอล-น้ำของเยื่อแผ่นซิลิโคน โดยเติมผงซิลิกาไลท์ (silicalite) ลงในเยื่อแผ่น ปริมาณซิลิกาไลต์ที่เติมตั้งแต่ 10-55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการทดลองที่ 20-60 องศาเซลเซียส สารละลายป้อนมีความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าค่าการเลือกเอทานอลผ่านเยื่อแผ่นและฟลักซ์มีค่าสูงขึ้น เยื่อแผ่นยางซิลิโคนที่มีผงซิลิกาไลต์ 50 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลดีที่สุดโดยมีค่าการเลือกเอทานอลผ่านของเยื่อแผ่นเท่ากับ 24 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อน 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

พิชัย ตั้งศรีสำเริง (1997) ศึกษาการทำให้สารสกัดจากใบขี้เหล็กเข้มข้นขึ้นโดยใช้กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน ใช้เยื่อแผ่นซิลิโคนแบบท่อมัด อุณหภูมิสารละลายป้อน 30-50 องศาเซลเซียส และความดันเพอร์มิเอต 2-10 ทอร์ เพื่อแยกสารละลายเอทานอลออกจากสารสกัด พบว่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 33.172 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและ ความดันเพอร์มิเอต 2 ทอร์ ค่าการเลือกเอทานอลผ่านเยื่อแผ่นมีค่าสูงกว่าค่าการเลือกน้ำผ่านเยื่อแผ่น สารละลายบาราคอลสามารถทำให้เข้มข้นได้สูงสุด 1.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ณรงค์ขัย ประภากรวิริยะ (1995) ศึกษาการแยกและทำให้ตัวทำละลายเข้มข้นจากของผสมน้ำ-อาซีโตน-บิวทานอล-เอทานอล-กรดอาซิติก-กรดบิวทิริก และ น้ำหมักอาซีโตน-บิวทานอล โดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน ด้วยเยื่อแผ่นซิลิโคนแบบท่อมัด ที่อุณหภูมิสารป้อน 40-80 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 2-30 ทอร์ ความหนาของเยื่อแผ่น 0.25-1.0 มิลลิเมตร พบว่าภาวะการดำเนินงานที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิสารป้อน 60 องศาเซลเซียส ความดันด้านเพอร์มิเอต 2 ทอร์ และความหนาของเยื่อแผ่น 0.25 มิลลิเมตร โดยเพอร์มิเอชันฟลักซ์ ค่า

การเลือกบิวทานอลผ่านเยื่อแผ่นและค่าการเก็บเกี่ยวโดยมวลของบิวทานอลจากของผสม น้ำ-อาซีโตน-บิวทานอล-เอทานอล-กรดอาซีติก-กรดบิวทิริก มีค่า 11.29 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง, 47.26 และ 9.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และของน้ำหมักอาซีโตน-บิวทานอลคือ 8.76 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง, 43.86 และ 7.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Liang และ Ruckenstein (1996) ใช้เยื่อแผ่นชนิด Ploydimetnylsiloxane-Polystyrene interpenetrating polymer network (PDMS-PS IPN) เพื่อแยกเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำ ซึ่งเยื่อแผ่นชนิดนี้ให้ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์สูงกว่าการใช้เยื่อแผ่นชนิด PDMS

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

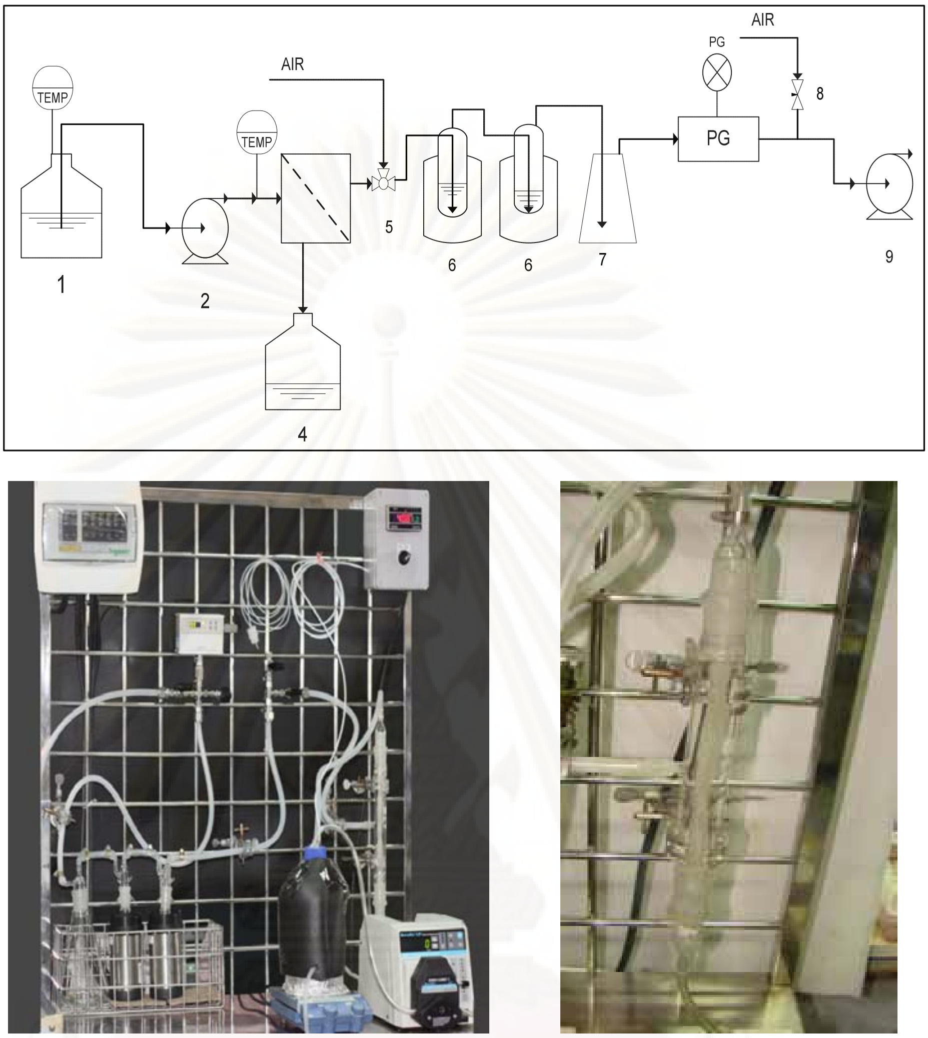
อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เคมีภัณฑ์

1. นอร์มอล-บิวทานอล (n-butanol) analytical reagent A.R. QRec
2. อาซีโตน (Acetone) analytical reagent A.R. QRec
3. เอทานอล (Ethanol) Baker analyzed ® A.C.S. reagent
4. กรดบิวทิริก (n-butyric acid) analytical reagent A.R. QRec
5. กรดอาซีติก (acetic acid) Pro analysis MERCK
6. น้ำกำจัดแร่ธาตุ (demineral water)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดทดลองการแยกบิวทานอลโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.1
2. ชุดเกจวัดความดันสุญญากาศ รุ่น KVC450 ของบริษัท KVC
3. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) รุ่น E2M1.5 ของบริษัท EDWARD อัตราการดึงไอ 1.8 ลูกบาก์ศเมตรต่อชั่วโมง
4. ปั๊มป้อนสารแบบรีด (peristaltic pump) Master flex L/S รุ่น Easy-Load II model 77200-60 ของบริษัท Cole-Parmer Instrument
5. ชุดควบแน่น จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน โดยใช้ไนโตรเจนเหลว (อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส) เป็นตัวดึงความร้อนออกเพื่อให้เพอร์มิเอตควบแน่น
6. ขวดเก็บสารขนาด 1 ลิตร จำนวน 2 ขวด สำหรับสายป้อนและสายรีเทนเทต
7. เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี รุ่น GC-14B (Gas Chromatography and integrator) ของบริษัท Shimadsu



รูปที่ 3.1 แสดงชุดการทดลองการแยกบิวทานอลโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ

1. ภาชนะสายป้อน
2. ปั๊มป้อนสารแบบรีด (peristaltic pump)
3. เยื่อแผ่น
4.ถังเก็บสายรีเทนเทต
5. วาล์ว 3 ทาง (3-way valve)
6. ชุดควบแน่น
7. ชุดดักของเหลว (Liquid trap)
8. วาล์วปรับความดัน
9. ปั๊มสุญญากาศ

TEMP เทอร์โมคัปเปิล

PG อุปกรณ์วัดความดันสุญญากาศ (PG, Pressure Gauge)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปเยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ

3.3.1.1 เตรียมสาย PDMS ความยาว 35 เซนติเมตร จำนวน 10 เส้น นำมาบรรจุในแท่งแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร หลังจากนั้น นำปลายทั้ง 2 ด้าน ใส่เข้าไปในรูของแผ่นอะครีลิค ทั้ง 2 ด้าน ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมสาย PDMS

รูปที่ 3.3 แผ่นอะครีลิคที่ใช้ในการขึ้นรูปสาย PDMS แบบหลายท่อ

3.3.1.2 นำปลายจิ้มฟันตัดปลายออกทั้ง 2 ด้าน ความยาว 2 เซนติเมตร ใส่ไม้จิ้มฟันลงในสาย PDMS 1 เซนติเมตร และนำแท่งแก้วมาติดกับแผ่นอะครีลิค ดังแสดงในรูปที่ 3.4

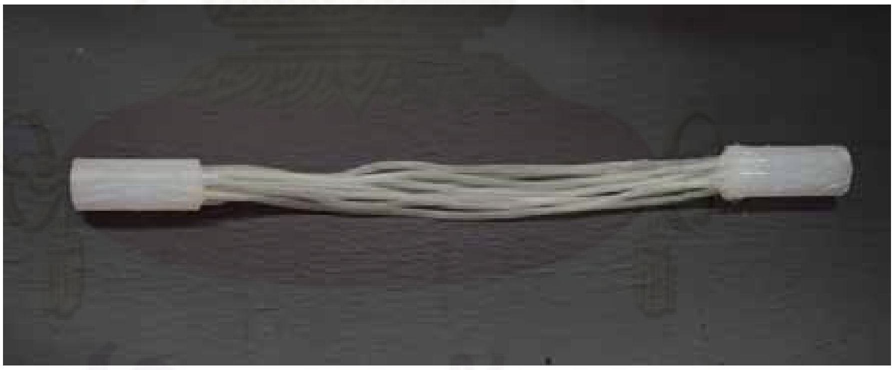
รูปที่ 3.4 สาย PDMS ที่บรรจุในแท่งแก้ว

3.3.1.3 นำซิลิโคนปิดปลายแผ่นอะครีลิค และบริเวณผิวของแท่งแก้ว ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งซิลิโคนแข็งตัว และทำการปิดปลายแผ่นอะครีลิค และบริเวณผิวของแท่งแก้วอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 สาย PDMS และแผ่นอะครีลิคที่ทำการปิดปลายโดยใช้ซิลิโคน

3.3.1.4 ทำการตรึงท่อแก้วโดยใช้อุปกรณ์ยึดจับ หลังจากนั้นจึงเติมซิลิโคนเหลวลงไปในท่อที่ทำการขึ้นรูปจากขั้นตอนที่ 3 ทิ้งให้ซิลิโคนที่บริเวณผิวหน้าแข็งตัว ประมาณ 2 ชั่วโมง และทำการเทซิลิโคนลงในท่อแก้วอีกด้านหนึ่งเช่นเดียวกัน ทิ้งไว้ประมาณ 1วัน ดึงไม้จิ้มฟันออกทั้ง 2 ด้าน และตัดแผ่นอะครีลิคออก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.6 สาย PDMS ภายหลังการเติมซิลิโคน



รูปที่ 3.7 เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 ภาวะการทดลอง

องค์ประกอบของน้ำหมักจำลองในสายป้อนและภาวะการทดลองแยกบิวทานออกจากสารละลายน้ำหมักจำลองโดยใช้เยื่อแผ่น PDMSแบบหลายท่อ แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำหมักจำลองในสายป้อน

	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)				
	บิวทานอล	อาซีโตน	เอทานอล	กรดอาซิติก	กรดบิวทิริก
น้ำหมักจำลองที่มีความเข้มข้นของบิวทานอล 10 กรัมต่อลิตร	10	6	0.25	0.5	0.2
น้ำหมักจำลองที่มีความเข้มข้นของบิวทานอล 20 กรัมต่อลิตร	20	12	0.5	1	0.4
น้ำหมักจำลองที่มีความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร	40	24	1	2	0.8
น้ำหมักจำลองที่มีความเข้มข้นของบิวทานอล 80 กรัมต่อลิตร	80	48	2	4	1.6
น้ำหมักจำลองที่มีความเข้มข้นของบิวทานอล 100 กรัมต่อลิตร	100	60	2.5	5	2

ตารางที่ 3.2 ภาวะการทดลองแยกบิวทานออกจากสารละลายน้ำหมักจำลองโดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ

น้ำหมักจำลองที่มีความเข้มข้นของบิวทานอล (กรัมต่อลิตร)	ภาวะการทดลอง		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	เวลาไหลวน (ชั่วโมง)
10	40 50 60 70	4.85	3

20	40 50 60 70	4.85	3
40	40 50 60 70	4.85	3
80	40 50 60 70	4.85	3
100	40 50 60 70	4.85	3
40	40	1.86 4.85 7.46 10.98	3
40	40	1.86	3 6 9

โดยควบคุมความดันเพอร์มิเอตที่ 5 ทอร์ทุกการทดลอง

3.3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ ค่าการเลือก และค่า PSI ร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่าง ๆในสายเพอร์มิเอต

นำสารละลายน้ำหมักจำลองใส่ลงในขวดเก็บสารป้อน ก่อนการทดลองทำการดึงอากาศออกจากระบบเป็นเวลา 30 นาที เริ่มการทดลองโดยป้อนสารละลายเข้าโมดูลแบบท่อที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้ปั๊มป้อนสารแบบรีด อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายในขวดเก็บสารป้อนและโมดูล ด้วยน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controlled water bath) เติมไนโตรเจนเหลวลงในชุดควบแน่น เพื่อควบแน่นไอทางด้านเพอร์มิเอต จากนั้นเปิดปั๊มสูญญากาศด้านเพอร์มิเอต ควบคุมความดันเพอร์มิเอตให้คงที่ที่ 5 ทอร์ ทำการทดลองเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิสายป้อน 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 10 20 40 80 และ 100 กรัมต่อลิตร จากนั้นชั่งน้ำหนักเพอร์มิเอตที่เก็บได้ในชุดควบแน่น วิเคราะห์ปริมาณบิวทานอล อาซีโตน เอทานอล กรดอาซีติก กรดบิวทิริก ในสายเพอร์มิเอตด้วยเครื่อง GC นำผลการวิเคราะห์มาคำนวณหาค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ ค่าการเลือก และค่า PSI และร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอต

3.3.4 ศึกษาผลของอัตราป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ ค่าการเลือก และค่า PSI ร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอต

ทำการทดลองเหมือนข้อ 3.3.2 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิสายป้อน 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัมต่อลิตร เวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราป้อน 1.86 4.85 7.46 และ 10.98 ลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักเพอร์มิเอตที่เก็บได้ในชุดควบแน่น วิเคราะห์ปริมาณบิวทานอล อาซีโตน เอทานอล กรดอาซีติก กรดบิวทิริก ในสายเพอร์มิเอตด้วยเครื่อง GC นำผลการวิเคราะห์มาคำนวณหาค่า

เพอร์มิเอชันฟลักซ์ ค่าการเลือก และค่า PSI และร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอต

3.3.5 ศึกษาผลของเวลาในการไหลวนต่อค่าการนำกลับของ บิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล

ทำการทดลองที่อุณหภูมิสายป้อน 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัมต่อลิตร ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราป้อน 1.86 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาในการไหลวน 3 6 และ 9 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักเพอร์มิเอตที่เก็บได้ในชุดควบแน่น วิเคราะห์ปริมาณบิวทานอล อาซีโตน เอทานอล กรดอาซีติก กรดบิวทิริก ในสายเพอร์มิเอตด้วยเครื่อง GC นำผลการวิเคราะห์มาคำนวณหาค่าการนำกลับ

3.3.6 การวิเคราะห์ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์และค่าการเลือก

ชั่งน้ำหนักชุดควบแน่นก่อนการทดลอง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างจากชุดควบแน่น ตามเวลาและนำมาชั่งน้ำหนัก โดยค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$J = \frac{W}{At} \qquad (3.1)$$

โดยที่ J คือ ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์รวม

W คือ มวลของเพอมิเอตที่เก็บตามเวลา

A คือ พื้นที่ของเยื่อแผ่น

t คือ ช่วงเวลาระหว่างเก็บตัวอย่าง

สำหรับค่าการเลือก หาโดยนำตัวอย่างที่เก็บตามเวลา และทำการวิเคราะห์หาปริมาณบิวทานอลโดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี ค่าการเลือกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\alpha = \left[\frac{\frac{y}{(1-y)}}{\frac{x}{(1-x)}}\right] \qquad (3.2)$$

โดยค่า y คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอลในเพอมิเอต

x คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอลในสารละลายป้อน

3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณบิวทานอลโดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟฟี

ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี รุ่น GC-14B (Gas Chromatography and integrator) ของบริษัท Shimadsu

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ บิวทานอล อาซีโตน เอทานอล กรดอาซีติดก และกรดบิวทิริก ในสารละลายน้ำหมักจำลอง โดยเครื่องแก๊สโครมาโตรกราฟฟี รุ่น GC-14B (Gas Chromatography and integrator) โดยมีเงื่อนไขในการวิเคราะห์ดังนี้

Column	Parapak Q
Column temperature	210 ^{0}C
Injection temperature	185 ^{0}C
Detector temperature (FID)	210 ^{0}C
N_2 flow	50 g/L
Retention time :	
Butanol	4.5 minute
Acetone	1.4 minute
Ethanol	0.9 minute
Acetic acid	2.3 minute
Butyric acid	9.6 minute

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

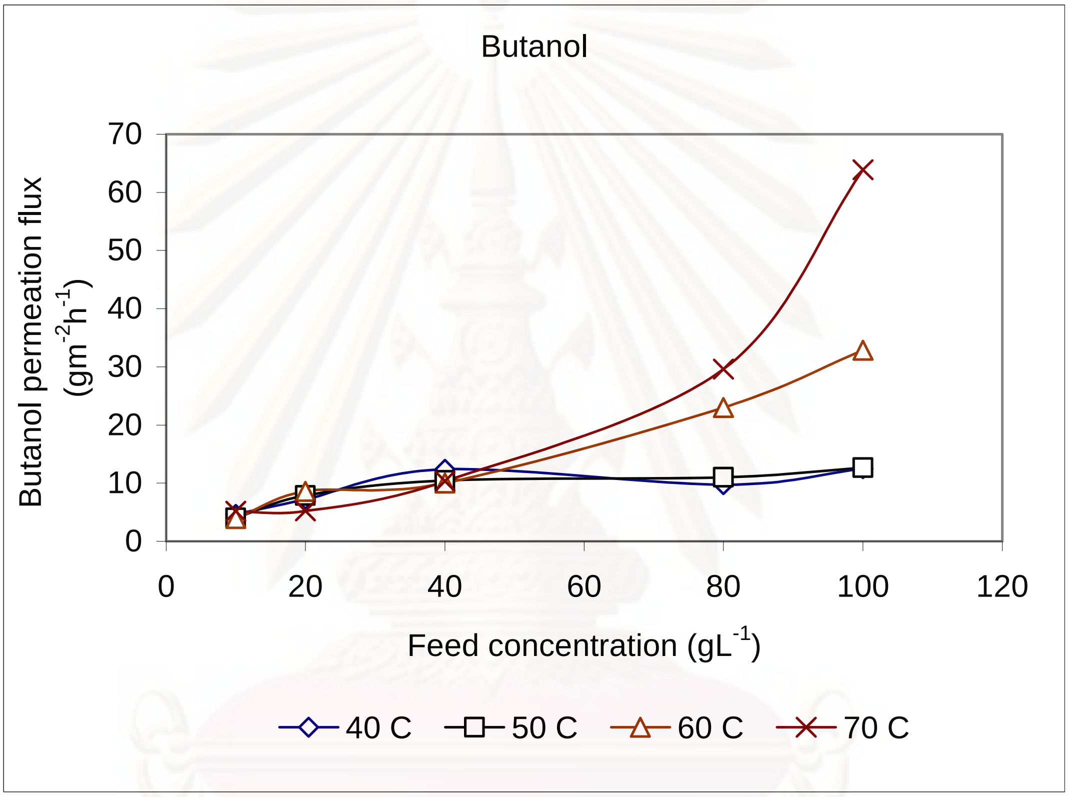
บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์

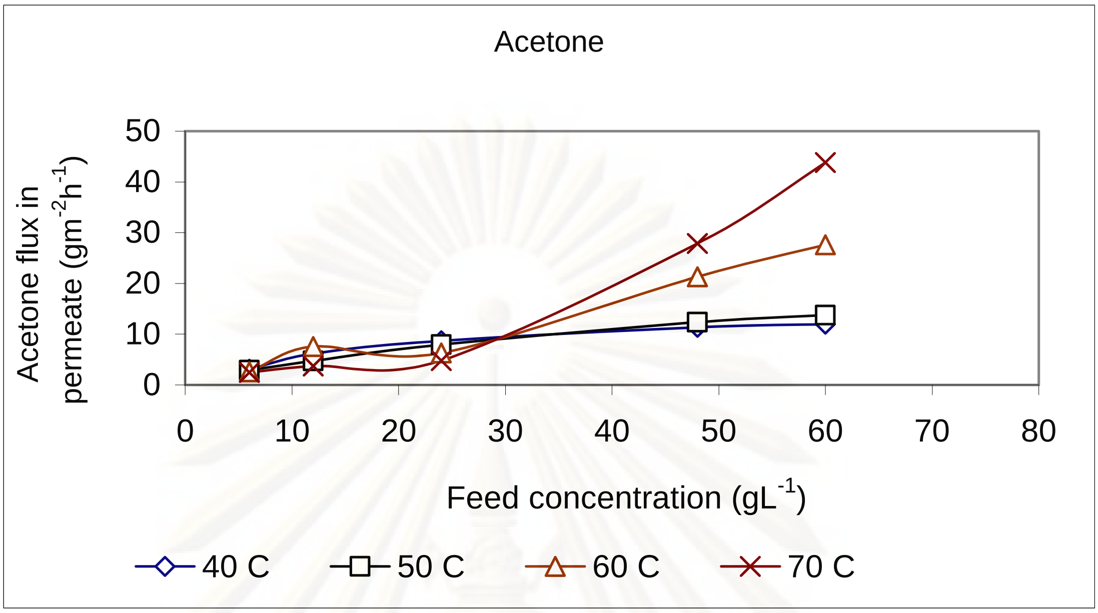
ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารต่างๆ ในสายป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 พบว่าที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ (40-50 องศาเซลเซียส) เพอร์มิเอชันฟลักซ์ไม่ได้แปรผันตามความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิสูง (60-70 องศาเซลเซียส) เพอร์มิเอชันฟลักซ์แปรผันตามความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่ำๆ (10-40 กรัมต่อลิตร) เพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกอุณหภูมิ จากรูปที่4.2 และ 4.3 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของ อาซีโตน และเอทานอล พบว่ามีแนวโน้มเหมือนฟลักซ์ของบิวทานอล โดยค่าฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 63.88 43.84 และ0.42 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Garcia Villaluenga,2000 ซึ่งอธิบายว่าค่าฟลักซ์จะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิ ตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนที่อุณหภูมิของสายป้อนคงที่ พบว่าค่าฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการพองตัวของเยื่อแผ่น จึงทำให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลของสายโซ่โพลิเมอร์เกิดการคลายตัว โมเลกุลจึงสามารถแพร่ผ่านได้เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอลมีค่าสูงขึ้น ผลงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Garcia Villaluenga ,2000 และยังพบอีกว่าที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่ำ ค่าฟลักซ์ไม่ได้แปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งอธิบายได้จากกฎข้อที่ 1 ของ Fick’s ที่ความเข้มข้นของสายป้อนต่ำ ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นสายป้อนและสายเพอร์มิเอตมีค่าต่ำ ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์จึงมีค่าไม่ต่างกันทุกอุณหภูมิ และที่อุณหภูมิต่ำค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ไม่ได้แปรผันตามความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสายป้อนต่ำ โมเลกุลของบิวทานอลจะรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเนื่องจากแรงพันธะไฮโดรเจน ส่งผลต่อการดูดซึมจะมีค่าต่ำ ความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านในเยื่อแผ่น PDMS จึงมีค่าต่ำมาก ดังนั้นอาจจะไม่มีแรงกระทำระหว่างสารที่ซึมผ่านในเยื่อแผ่น ซึ่งแรงกระทำดังกล่าวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีค่าสูงขึ้น จากรูปที่ 4.4 และ4.5 แสดงค่าฟลักซ์ของกรดอาซีติก และกรดบิวทิริก พบว่าเมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดอาซีติกและกรดบิวทิริก ค่าฟลักซ์ของกรดอาซีติกมีค่าลดจาก 5.40 เป็น 0.41 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ในขณะที่ฟลักซ์ของกรดบิวทิริกมีค่าน้อยมาก เนื่องจากกรดบิวทิริกไม่สามารถแพร่ผ่านเยื่อแผ่น PDMS ได้

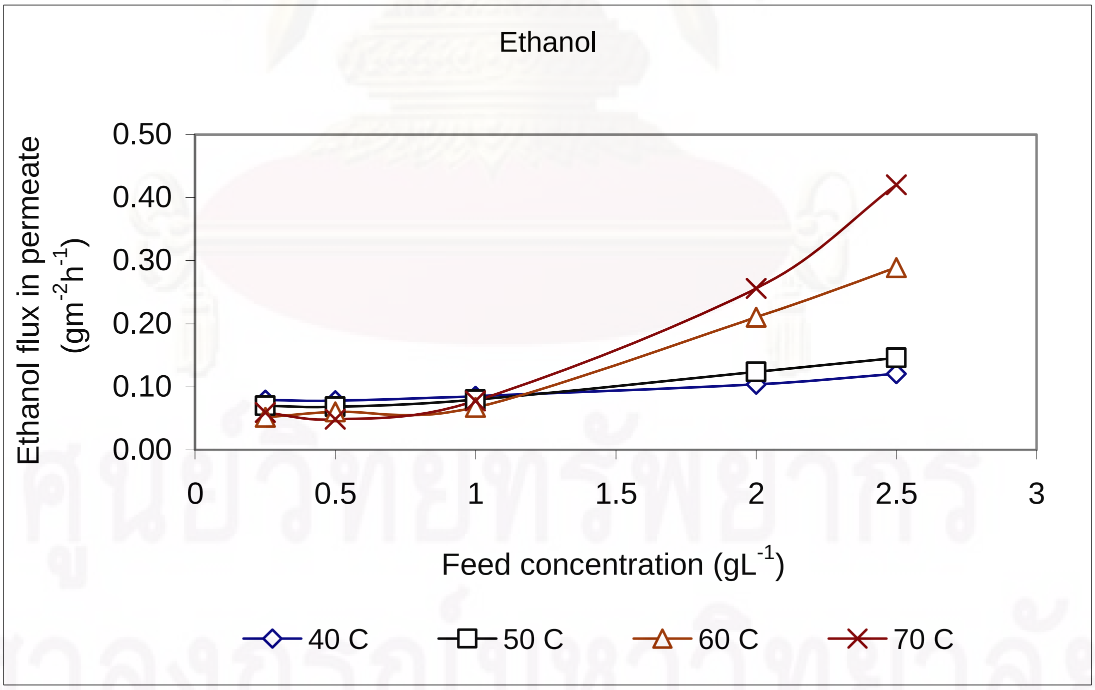


รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อฟลักซ์ของบิวทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง

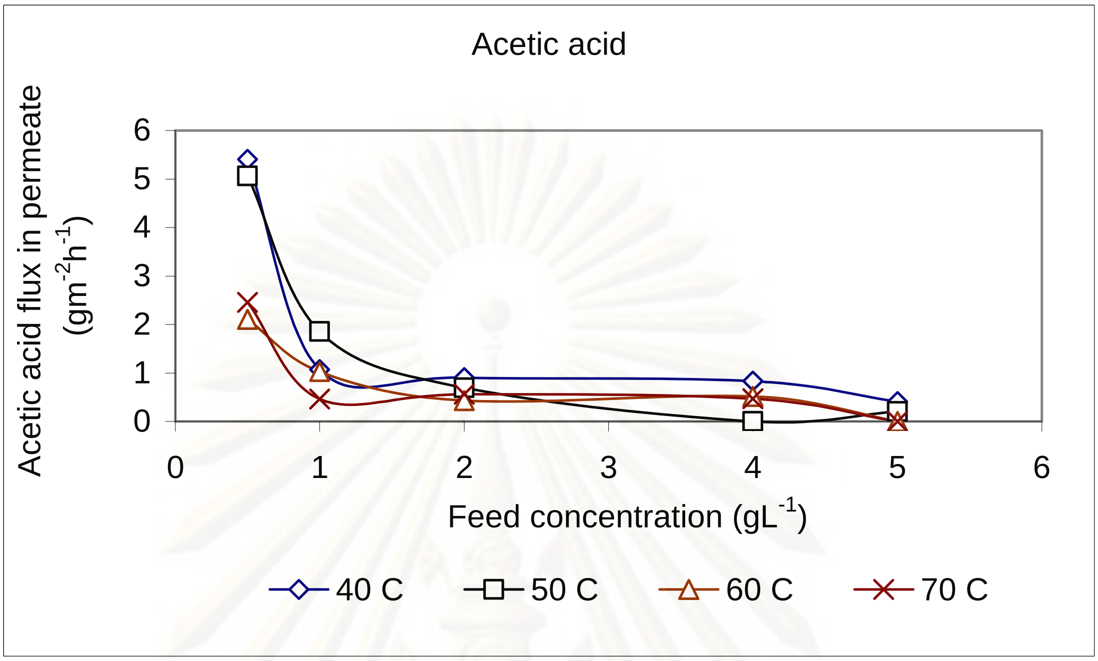
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



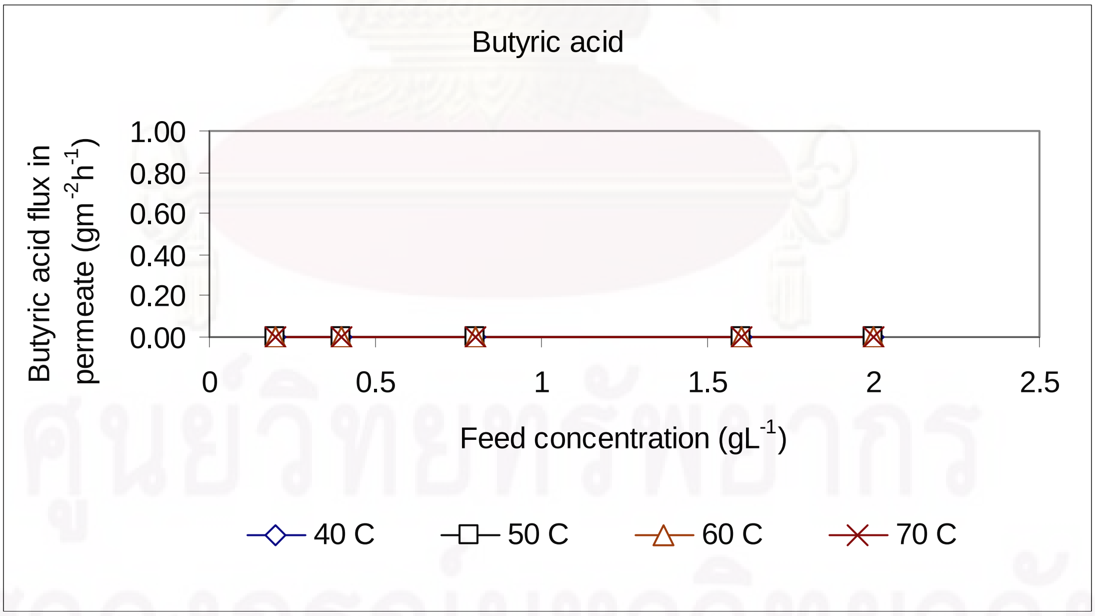
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของอาซีโตนในสายป้อนต่อฟลักซ์ของอาซีโตน ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลในสายป้อนต่อฟลักซ์ของเอทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดอาซีติกในสายป้อนต่อฟลักซ์ของกรดอาซีติก ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดบิวทิริกในสายป้อนต่อฟลักซ์ของกรดบิวทาริก ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง

4.2 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารต่าง ๆในสายป้อนต่อค่าการเลือก และค่า PSI

ผลของของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารต่าง ๆในสายป้อนต่อค่าการเลือกของ บิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล แสดงอยู่ในรูปที่ 4.6-4.8 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.6 พบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ ค่าการเลือกของบิวทานอลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าการเลือกของบิวทานอลมีค่าลดลงเช่นกัน แต่ลดลงในสัดส่วนที่น้อยกว่าผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนสูง ๆอุณหภูมิมีผลต่อค่าการเลือกน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน มีผลต่อค่าการเลือกมากกว่าอุณหภูมิ โดยค่าการเลือกของบิวทานอลสูงสุดอยู่ที่ 49.68 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 10 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srinicasan K.2007 ซึ่งอธิบายว่าค่าการเลือกมีค่าลดลงเนื่องจากโมเลกุลสายโซ่ของเยื่อแผ่นเกิดการคลายตัว จึงทำให้โมเลกุลอื่นที่ถูกกักไว้บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นสามารถแพร่ผ่านเยื่อแผ่นออกมาได้ จึงมีผลทำให้ค่าการเลือกมีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงค่าการเลือกของอาซีโตนและเอทานอล พบว่ามีแนวโน้มเหมือนค่าการเลือกของบิวทานอล แต่อุณหภูมิมีผลต่อค่าการเลือกของอาซีโตนมากกว่าของบิวทานอล และเอทานอล โดยค่าการเลือกสูงสุดของอาซีโตน และเอทานอลอยู่ที่ 47.42 และ 22.91 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของอาซีโตนและเอทานอลในสายป้อนเท่ากับ 6 และ 0.25 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เนื่องจากฟลักซ์และการเลือกของเยื่อแผ่นแปรผกผันกัน คือ เมื่อค่าฟลักซ์สูง ค่าการเลือกจะต่ำ ทำให้ไม่สามารถประเมินสมรรถนะของกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

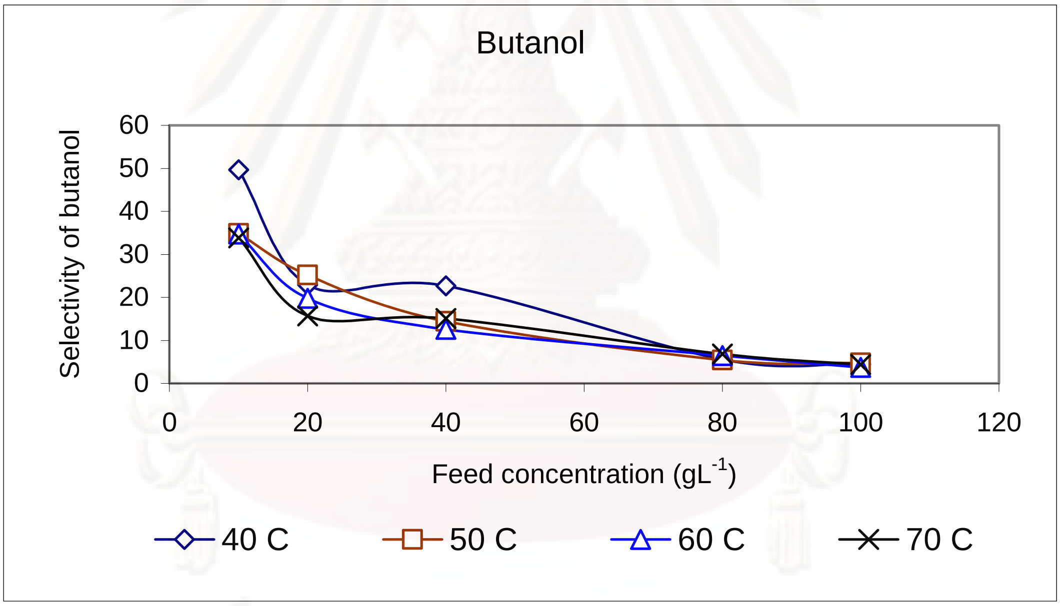
Huang and Yeom (1990) จึงได้นิยาม pervaporation separation index (PSI) เป็นดัชนีที่ใช้ในการเลือกเยื่อแผ่นที่มีความเหมาะสม ระหว่างเพอร์มิเอชันฟลักซ์ และ ค่าการเลือกสารของเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้คำนวณหาค่าPSI โดยใช้ข้อมูลของค่าฟลักซ์และค่าการเลือก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11 ซึ่งแสดงค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ตามลำดับ จากรูปที่ 4.9 พบว่าที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส ค่าPSI ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน แสดงว่าค่าการเลือกบิวทานอลของเยื่อแผ่นมีผลต่อค่า PSI มากกว่าค่าฟลักซ์ ในขณะที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสในช่วงความเข้มข้น 40 ถึง 100 กรัมต่อลิตร พบว่าค่า PSI มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีผลต่อค่า PSI มากกว่าค่าการเลือก โดยค่า PSI ของบิวทานอลสูงสุดอยู่ที่ 664.65 ที่อุณหภูมิ 40 และ 70

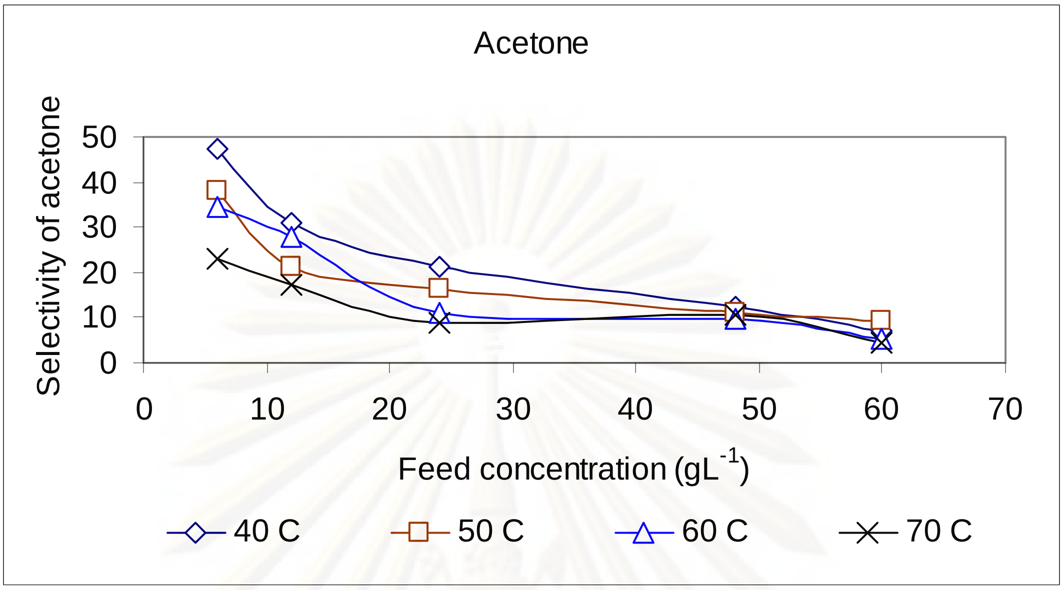
องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่า PSI ของอาซีโตน พบว่ามีแนวโน้มเหมือนของบิวทานอล แต่แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าPSI มากกว่า โดยค่า PSI ของอาซีโตนสูงสุดอยู่ที่ 801.25 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของอาซีโตนในสายป้อนเท่ากับ 12 กรัมต่อลิตร

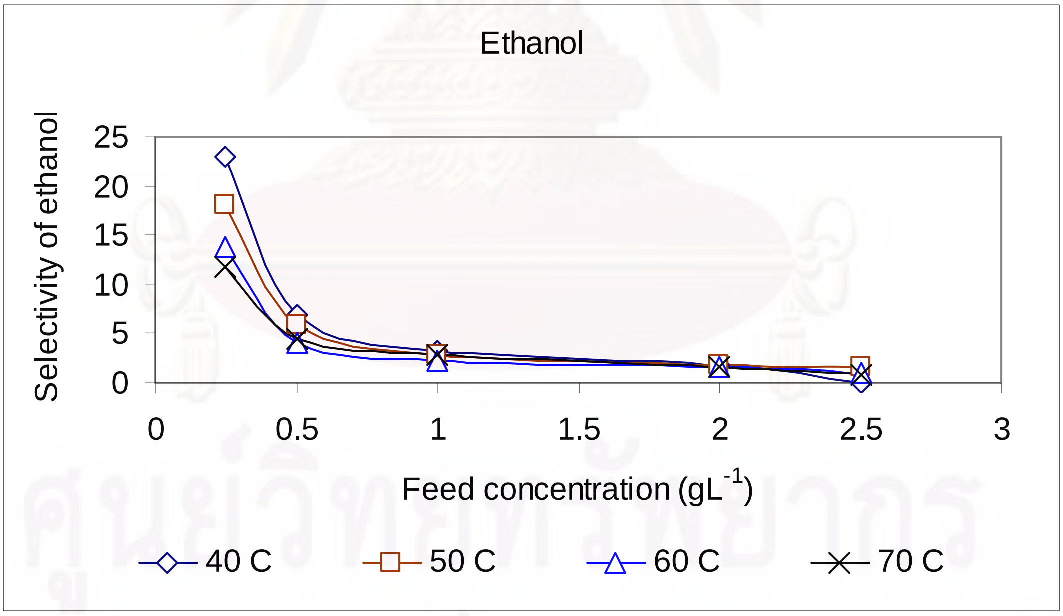
จากรูปที่ 4.11 แสดงค่า PSI ของเอทานอล พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล ค่า PSI มีค่าลดลงที่ทุกอุณหภูมิ ซึ่งสาเหตุดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า การเลือกมีผลต่อค่า PSI ของเอทานอลมากกว่าค่าเพอร์มิเอชันของเอทานอล โดยค่า PSI ของเอทานอลสูงสุดอยู่ที่ 304.24 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของเอทานอลในสายป้อนเท่ากับ 0.25 กรัมต่อลิตร



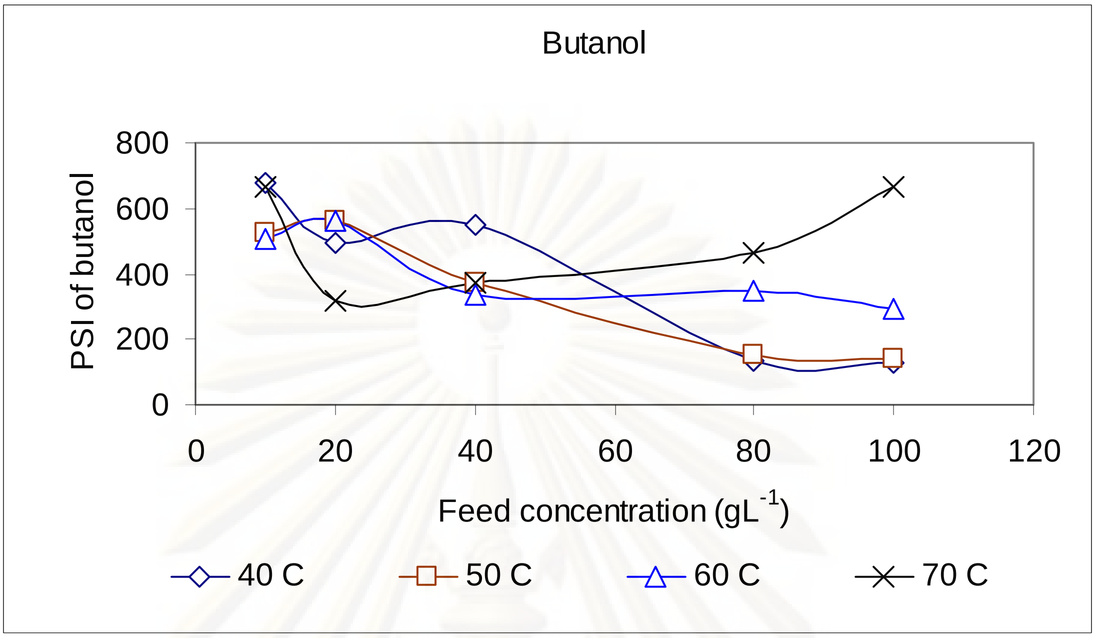
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อค่าการเลือกของบิวทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



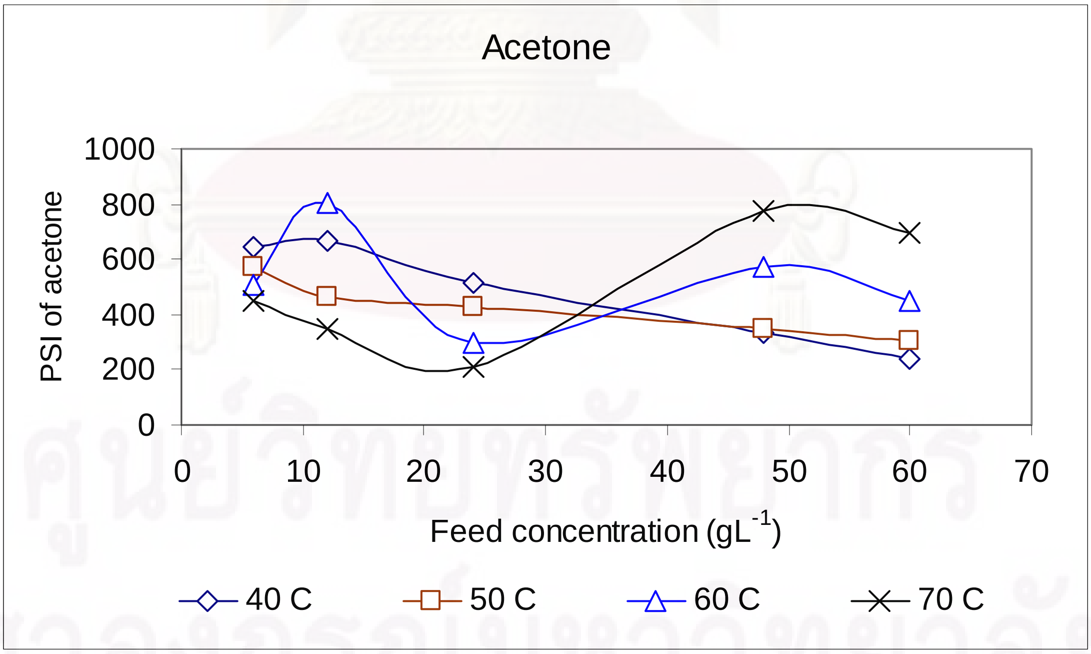
รูปที่4.7 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของอาซีโตนในสายป้อนต่อค่าการเลือกของอาซีโตน ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



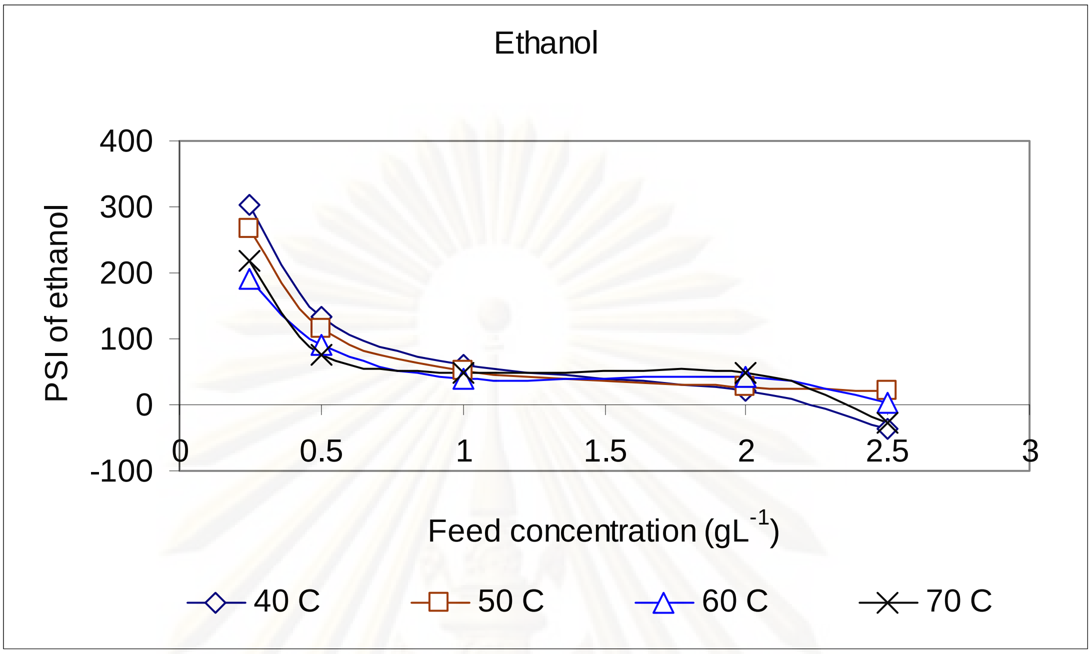
รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลในสายป้อนต่อค่าการเลือกของเอทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อค่า PSI ของบิวทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของอาซีโตนในสายป้อนต่อค่าPSIของอาซีโตน ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



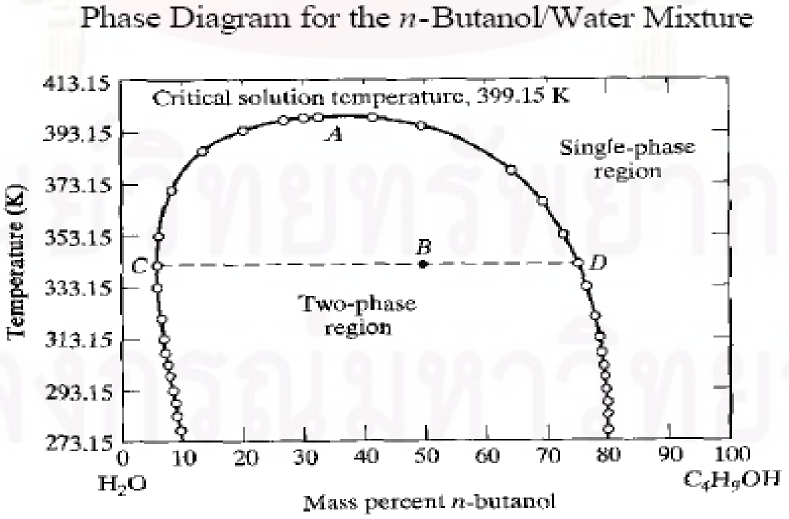
รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของเอทานอลในสายป้อนต่อค่าPSIของเอทานอล ที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

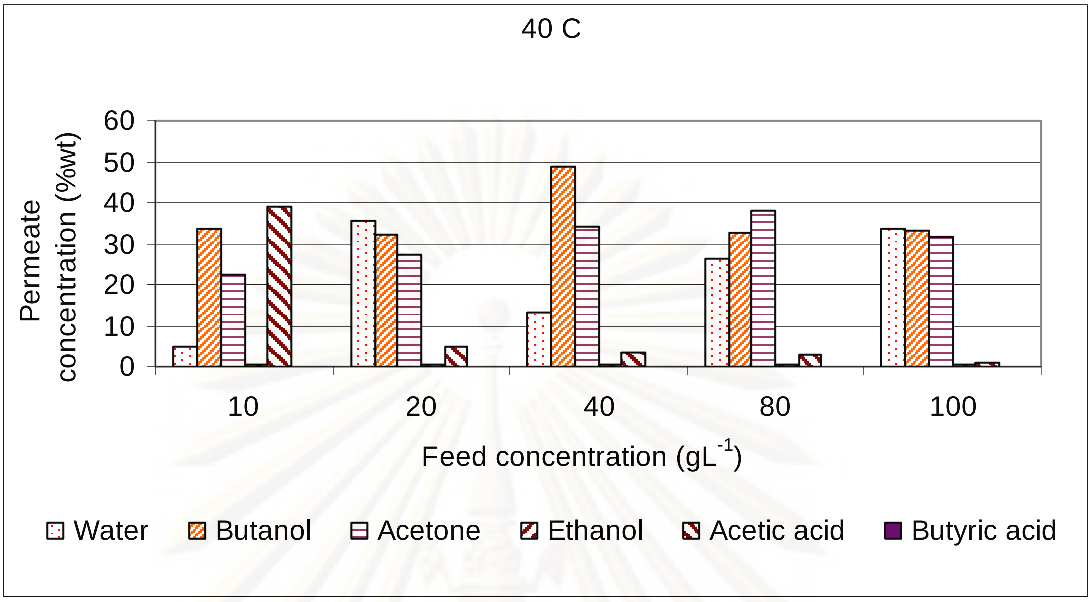
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆในสายเพอร์มิเอตที่อุณหภูมิต่างๆกัน

ในกระบวนการแยกสารโดยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน นอกจากค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์แล้ว ความเข้มข้นของสารต่างๆในสายเพอมิเอตเป็นข้อมูลที่ควรทราบ เพื่อเป็นประโยชน์ในการแยกขั้นบริสุทธิ์ต่อไป ผลของความเข้มข้นของสารต่างๆในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอล อาซีโตน เอทานอล กรดอาซีติก และกรดบิวทิริก ในสายเพอมิเอต ที่อุณหภูมิ 40 – 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.12 -4.15 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำในเพอมิเอตเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้นแม้ว่าที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าฟลักซ์ของบิวทานอลมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่ฟลักซ์ของน้ำก็สูงเช่นกัน ซึ่งจะส่งผลการแยกบิวทานอลในขั้นต่อไป โดยที่ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลสูงสุดอยู่ที่ 48.6 ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบงานวิจัยของ Matsumura, 1988 พบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลมีค่าแปรผันตามความเข้มข้นของสายป้อน โดยร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลมีค่าสูงสุดที่ 80 ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

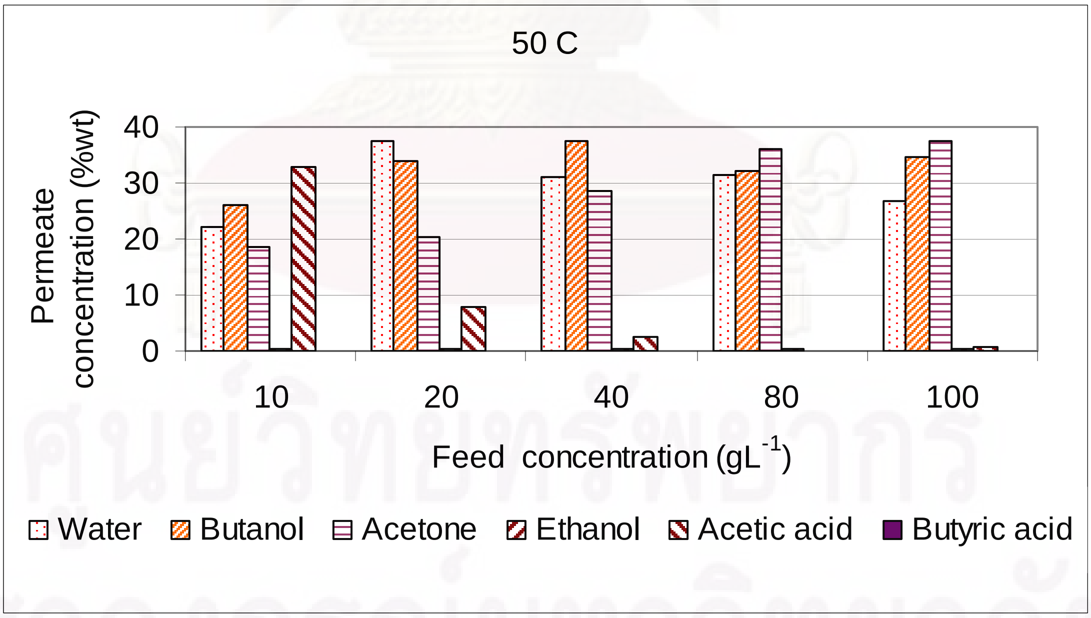
จากข้อมูลค่าการละลายของบิวทานอลในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ช่วงอุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส ค่าการละลายของบิวทานอลในน้ำอยู่ที่ประมาณ 5 % (50 กรัมต่อลิตร) ดังนั้นสารละลายที่มีเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนที่มากกว่า 50 กรัมต่อลิตร จะเกิดการแยกชั้น ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองอยู่ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนอยู่ที่ 40 กรัมต่อลิตร



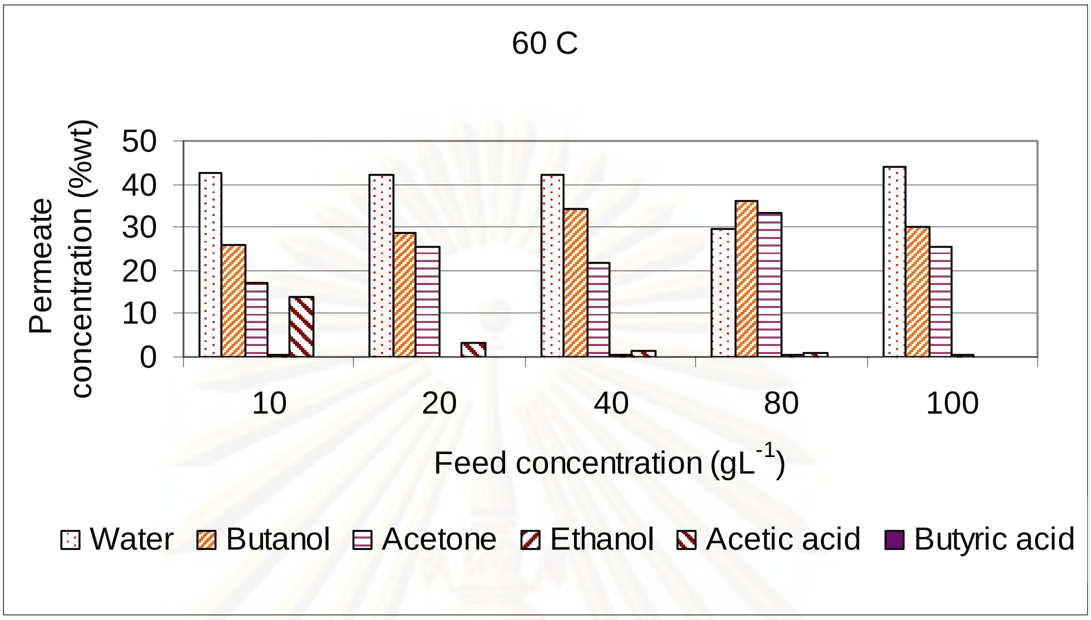
รูปที่ 4.12 ค่าการละลายละลายของบิวทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ



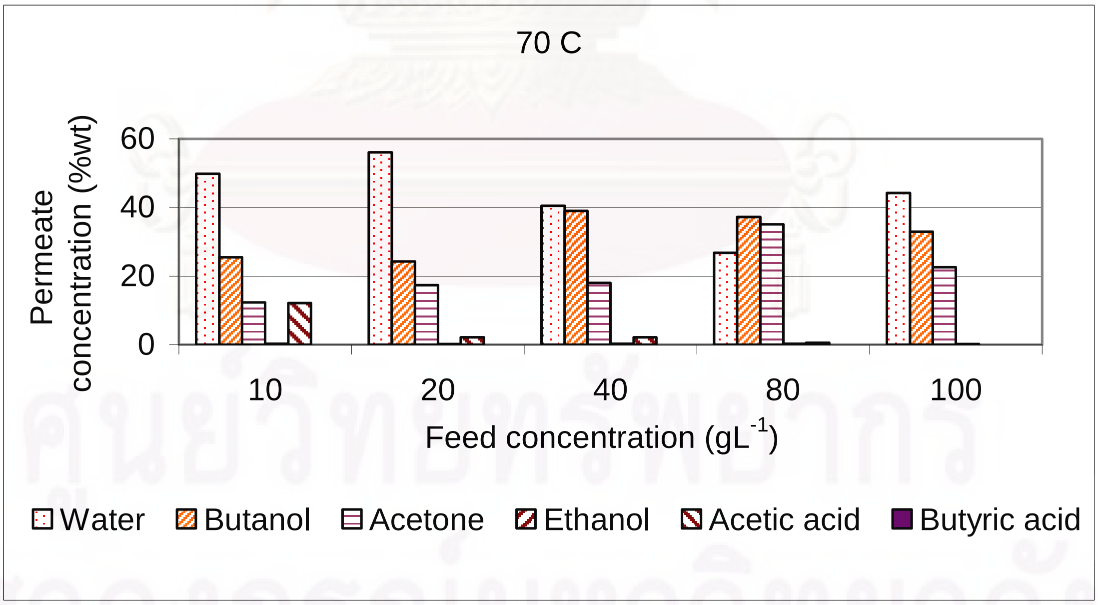
รูปที่ 4.13 ผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่าง ๆในสายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.14 ผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่าง ๆในสายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.15 ผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่าง ๆในสายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่าง ๆในสายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง

4.4 ผลของอัตราป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1-4.3 พบว่า ภาวะที่เหมาะสมอยู่ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนอยู่ที่ 40 กรัมต่อลิตร ดังนั้นการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ จะดำเนินการที่ภาวะนี้ โดยแปรเปลี่ยนอัตราป้อนที่ 1.86 4.85 7.46 และ 10.98 ลิตรต่อชั่วโมง (ค่า Superficial velocity 0.99 2.57 3.96 และ 5.83 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ)

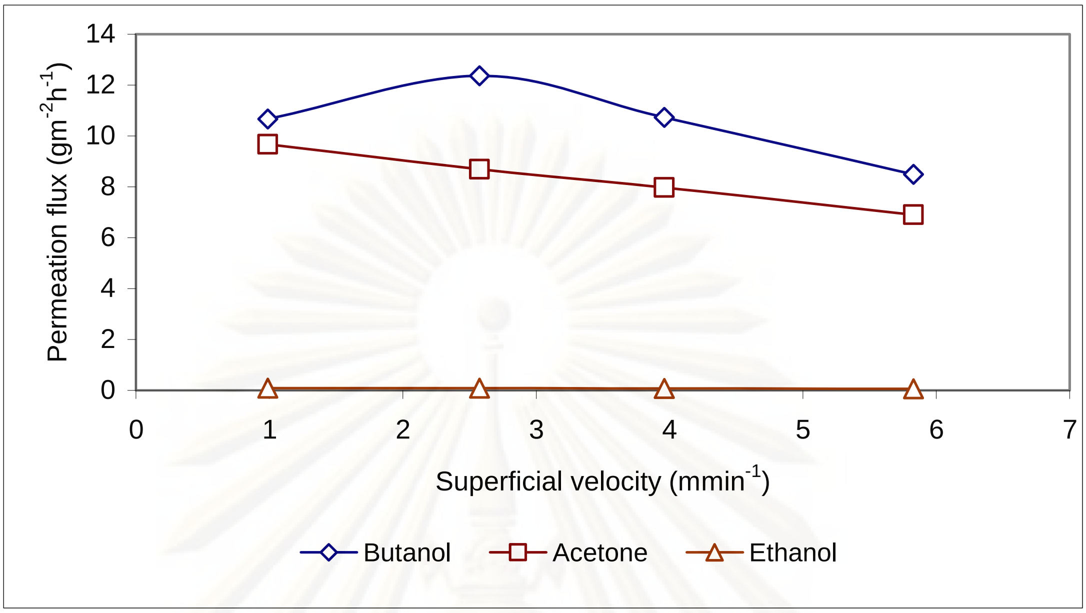
ผลของอัตราป้อนต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ดังแสดงในรูป 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนจนถึง 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอัตราป้อนขึ้นไปอีกเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 12.35 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง

ในขณะที่เพอร์มิเอชันฟลักซ์ของอาซีโตนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราป้อน และเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของเอทานอลมีค่าต่ำที่สุด ผลการทดลองอธิบายได้ว่า การเพิ่มอัตราป้อนในช่วงการทดลองมีผลต่อการลดความต้านทานด้านสายป้อนไม่มากนัก เนื่องจากอัตราป้อนอยู่ในช่วงลามินาร์ และความต้านทานต่อการโอนถ่ายมวลมากสุดอยู่ที่เยื่อแผ่น ซึ่งสมการสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.1 Ming Peng, 2003

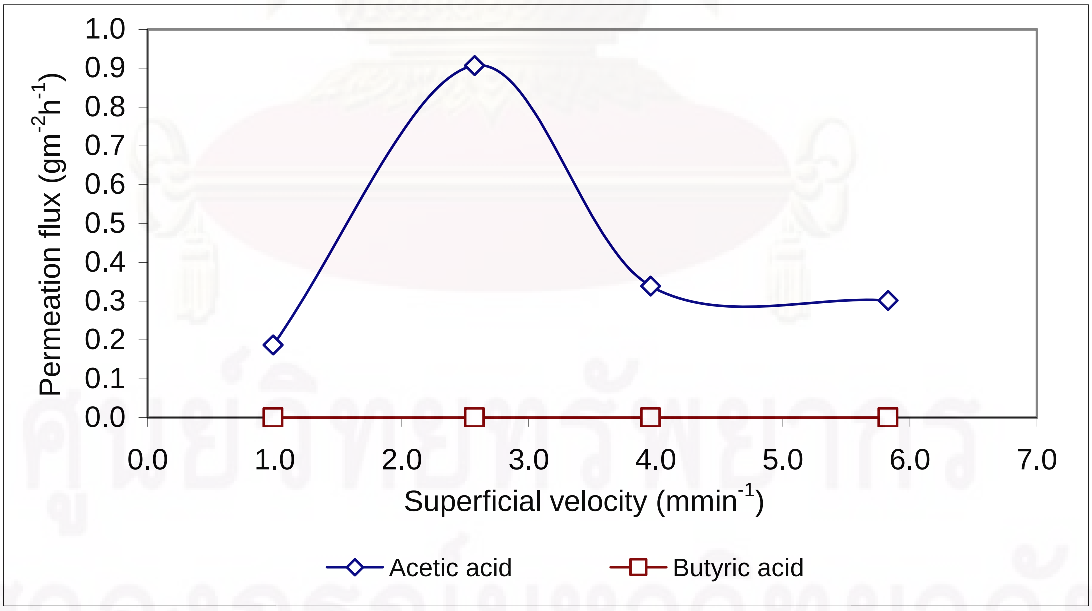
$$\frac{1}{K^{ov}} = \frac{1}{k^{b}} + \frac{l}{P_{m}} \qquad (4.1)$$

เมื่อเพิ่มอัตราป้อนทำให้เวลาที่สารสัมผัสกับผิวหน้าของเยื่อแผ่นลดลง ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซับสารบนผิวหน้าของเยื่อแผ่น จึงมีผลต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ลดลง

รูปที่ 4.17 แสดงค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของกรดอาซีติก และกรดบิวทิริก พบว่าค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของกรดอาซีติกมีแนวโน้มเหมือนค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล แต่อัตราป้อนมีผลต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีผลมากกว่า ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของกรดอาซีติก โดยค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของกรดอาซีติก มีค่าสูงสุดที่ 0.91 ที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่เพอร์มิเอชันของกรดบิวทิริกมีค่าน้อยมาก เนื่องจากกรดบิวทิริกไม่สามารถแพร่ผ่านเยื่อแผ่น PDMS ได้



รูปที่ 4.17 ผลของอัตราป้อนต่อเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น 3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร

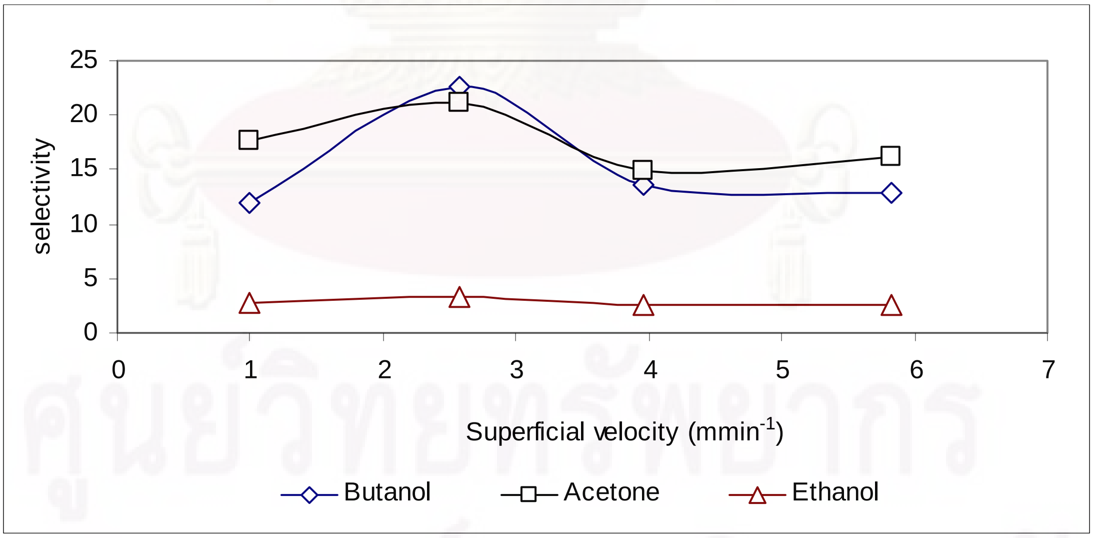


รูปที่ 4.18 ผลของอัตราป้อนต่อเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของกรดอาซีติก และกรดบิวทิริก ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น 3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร

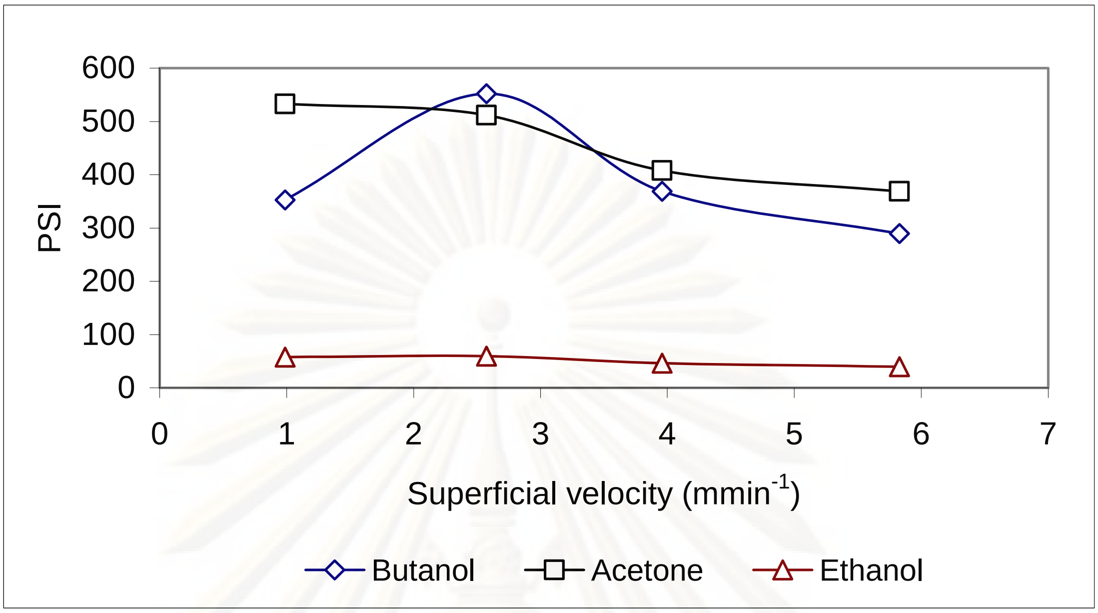
4.5 ผลของอัตราป้อนต่อค่าการเลือก และค่า PSI

ผลของอัตราป้อนต่อค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล แสดงอยู่ในรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่ออัตราป้อนน้อยๆ (1.86 – 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง) ค่าการเลือกของบิวทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าการเลือกของบิวทานอลสูงสุดอยู่ที่ 22.7 ที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการเลือกของอาซีโตนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับบิวทานอล เมื่อเพิ่มอัตราป้อน แต่เพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่น้อยกว่าค่าการเลือกของบิวทานอล โดยค่าการเลือกของอาซีโตนสูงสุดอยู่ที่ 21.1 ที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ค่าการเลือกของเอทานอลมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าการเลือกของเอทานอลสูงสุดอยู่ที่ 3.35 ที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล พบว่าค่า PSI ของบิวทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราป้อน เมื่อเพิ่มอัตราป้อนขึ้นพบว่าค่า PSI ของบิวทานอลลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงว่าค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีผลต่อค่า PSI โดยค่า PSI สูงสุดอยู่ที่ 551.7 ที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า PSI ของอาซีโตนและเอทานอลมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอัตราป้อน แสดงให้เห็นว่าค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์มีผลต่อค่า PSI โดยค่า PSI ของอาซีโตนสูงสุดที่ 532.7 ที่อัตราป้อน 1.86 ลิตรต่อชั่วโมง และค่า PSI เอทานอล สูงสุดอยู่ที่ 59.7 ที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



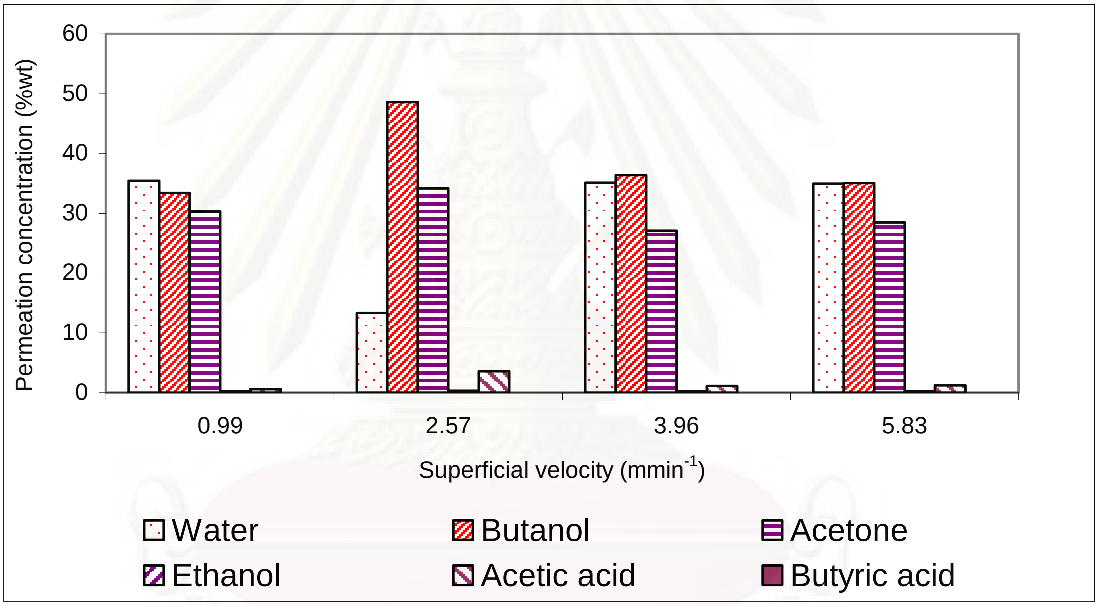
รูปที่ 4.19 ผลของอัตราป้อนต่อค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และ เอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น 3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร



รูปที่ 4.20 ผลของอัตราป้อนต่อค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และ เอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น 3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร

4.6 ผลของอัตราป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆในสายเพอร์มิเอต

ผลของอัตราป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนจาก 1.86 ไปถึง 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราป้อนมากกว่า 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลมีค่าลดลง สำหรับอาซีโตนและเอทานอล มีแนวโน้มเหมือนบิวทานอล โดยร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล สูงสุดที่ 48.6 34.19 และ 0.33 ตามลำดับ ที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่4.21 ผลของอัตราป้อนต่อร้อยละโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอต ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พื้นที่ตัดขวางของเยื่อแผ่น 3.14 x 10^{-5} ตารางเมตร

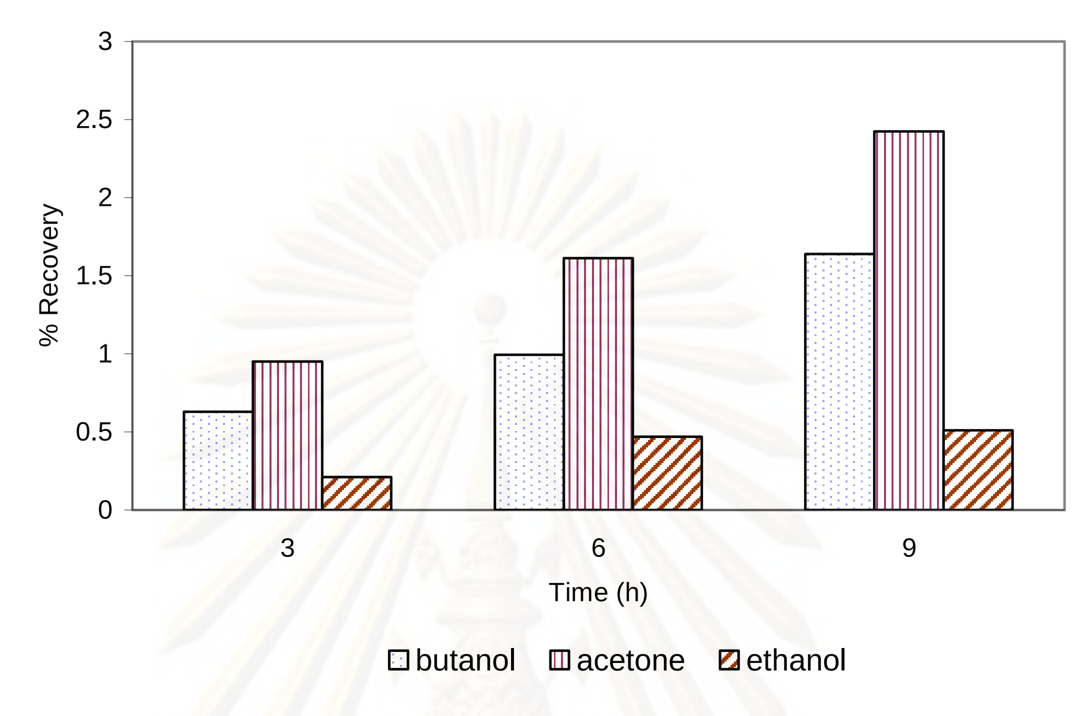
4.7 ผลของเวลาในการไหลวนต่อค่าการนำกลับ

การทดลองที่ผ่านมาดำเนินการ 3 ชั่วโมง การทดลองในส่วนนี้จะเพิ่มเวลาในการไหลวนเพื่อศึกษาการนำกลับของบิวทานอลและสารอื่นๆ จากรูปที่ 4.21 แสดงค่าการนำกลับ ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอลตามเวลา พบว่าเมื่อเวลาในการไหลวนเพิ่มขึ้น การนำกลับสารต่าง ๆเพิ่มสูงขึ้นไม่มากนักเนื่องจากเพอร์มิเอชันฟลักซ์มีค่าต่ำ การเพิ่มพื้นที่ผิวเยื่อแผ่นจะช่วยเพิ่มค่าการนำกลับสารได้ โดยค่าการนำกลับของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอลที่ 9 ชั่วโมงมีค่า 1.64 2.42 และ 0.51 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงสมดุลมวลสารของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอลที่เวลาในการไหลวน 3 6 และ 9 ชั่วโมง

องค์ประกอบสายป้อน	ปริมาณในสายป้อน (กรัม)	ปริมาณในสายเพอร์มิเอต (กรัม) เวลาในการไหลวน (ชั่วโมง) 3	6	9
บิวทานอล	40	0.2513	0.3977	0.6556
อาซีโตน	24	0.228	0.3871	0.5816
เอทานอล	1	0.0021	0.0034	0.0051

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่4.22 ผลของเวลาในการไหลวนต่อค่าการนำกลับของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราป้อน 1.86 ลิตรต่อนาที ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8 การใช้พลังงานในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

การทดลองนี้เพื่อศึกษาการใช้พลังงานใน การแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองด้วยกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการกลั่น จากรูปที่ 4.22 แสดงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ บิวทานอลในสายป้อนต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอลในสายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อนาที ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอลในสายป้อน อัตราส่วนของบิวทานอลในสายเพอร์มิเอตมีค่ามากกว่าที่ภาวะสมดุลก๊าซ-ของเหลวของบิวทานอล ในช่วงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอลในสายป้อนจาก 0.01 ไปถึง 0.04 เนื่องจากที่อัตราส่วนในช่วงดังกล่าวปริมาณบิวทานอลในสายเพอร์มิเอตมีค่าสูงกว่าน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของบิวทานอลในช่วงจาก 0.04 ไปถึง 0.1 อัตราส่วนของบิวทานอลในสายเพอร์มิเอตมีค่าลดลง สาเหตุดังกล่าวเนื่องจากปริมาณน้ำในสายเพอร์มิเอตมีค่าสูงขึ้น แสดงว่าภาวะที่เหมาะสมในการแยกบิวทานอลโดยใช้เยื่อแผ่น PDMS อยู่ในช่วงอัตราส่วนโดยมวลของบิวทานอล 0.01-0.04 ผลการทดลองดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Ohya,1984 ซึ่งใช้ เยื่อแผ่น Polypropylene Hollow-Fiber และ Matsumura,1988 ใช้ OALตรึงในเยื่อแผ่น Polypropylene Hollow-Fiber และ Silicone พบว่าเยื่อแผ่น OAL สามารถแยกบิวทานอลได้ดีกว่าเยื่อแผ่น Silicone และ Polypropylene Hollow-Fiber ตามลำดับ ผลการแยกที่ได้แตกต่างกันเนื่องมาจากเยื่อแผ่นต่างชนิดกัน มีความสามารถในการแยกบิวทานอลไม่เท่ากัน

การใช้พลังงานในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันคำนวณได้จาก พลังงานจากการควบแน่นและพลังงานจากปั๊มสุญญากาศ พลังงานจากการควบแน่นขึ้นกับอุณหภูมิที่ของเหลวกลั่นตัว ซึ่งเป็นปัจจัยจาก อุณหภูมิ และความดันด้านเพอร์มิเอต สำหรับระบบ 2 องค์ประกอบสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{y_1 P^{tot}}{P_1^{vap}(T)} + \frac{y_2 P^{tot}}{P_2^{vap}(T)} = 1$$

$$f(1) = \frac{y_1 P^{tot}}{P_1^{vap}(T)}$$

$$f(2) = \frac{y_2 P^{tot}}{P_2^{vap}(T)}$$

โดยที่ y_i คือ อัตราส่วนโดยโมลทางด้านเพอร์มิเอต

P_i^{vap} คือ ความดันไอของสาร i

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่สารกลั่นตัวเป็นของเหลวอยู่ที่ 9 องศาเซลเซียส พลังงานที่ใช้ในการควบแน่นอยู่ที่ 1.676 MJ/kg โดยใช้โปรแกรม HYSYS 3.1

พลังงานจากปั๊มสุญญากาศสามารถหาได้จากสมการ Matsumura,1988

$$W^{*} = \frac{RT}{(\gamma-1)}\left[1-\left(\frac{P2}{P1}\right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}\right]$$

โดยที่ ค่า R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น

P_1 คือ ความดันขาเข้า

P_2 คือ ความดันขาออก

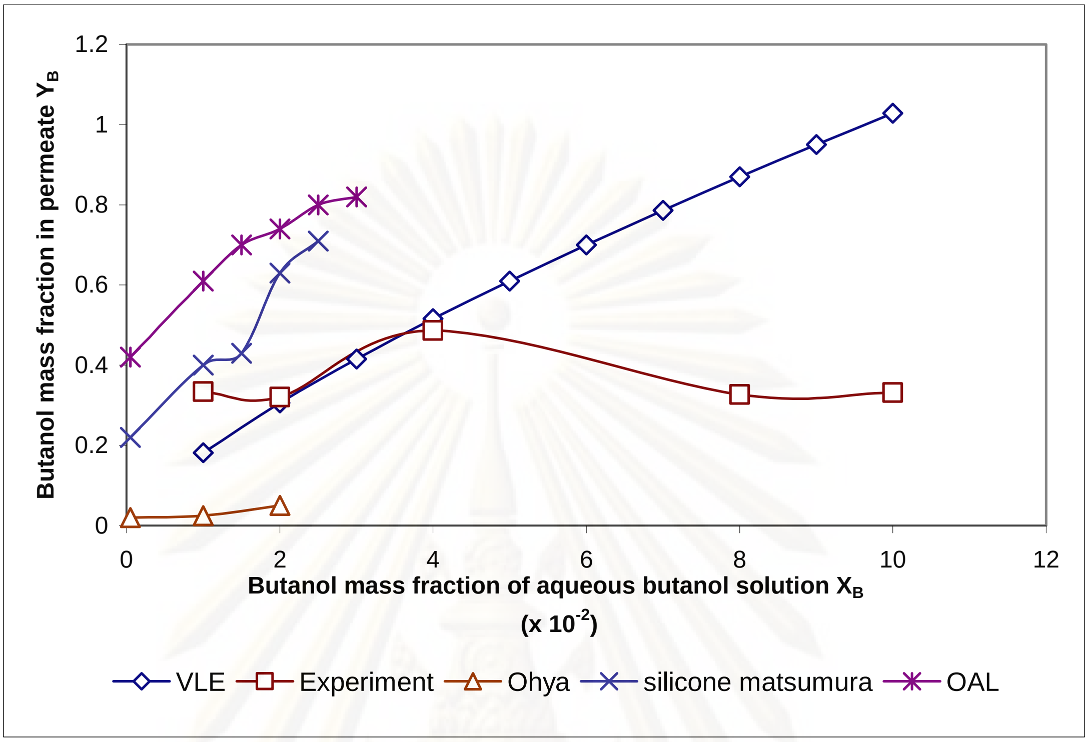
γ คือ ค่าคงตัวในระบบ Adiabatic

พลังงานที่ใช้สำหรับปั๊มสุญญากาศพบว่ามีค่า 0.61 MJ/kg butanol เมื่อรวมกับพลังงานที่ใช้ในการควบแน่นคิดเป็นพลังงานรวมที่ใช้ในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันมีค่า 2.286 MJ/kg butanol เมื่อนำเพอมิเอตไปแยกต่อด้วยกระบวนการกลั่นเพื่อให้ได้บิวทานอลบริสุทธิ์ 99.9 % พบว่าใช้พลังงานอีก 16 MJ/kg butanol (จากรูปที่ 4.24) พลังงานรวมทั้งหมดจากกระบวนการเพอร์วาพอเรชันและกระบวนการกลั่น มีค่า 18.286 MJ/kg butanol ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกลั่นอย่างเดียวเพื่อให้ได้บิวทานอลบริสุทธิ์ 99.9 % (จากรูปที่ 4.24) พบว่าต้องใช้พลังงาน 23.6 MJ/kg ดังแสดงในตารางที่ 4.2ดังนั้นกระบวนการเพอร์วาพอเรชันร่วมกับการกลั่นใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการกลั่นอย่างเดียว 1.29 เท่า

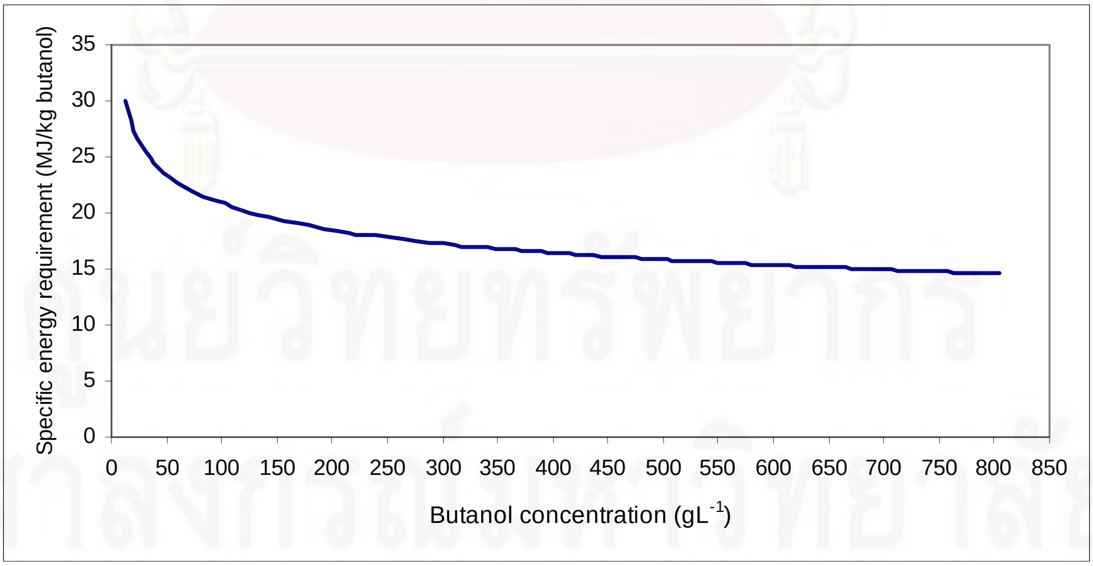
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการแยกบิวทานอลให้บริสุทธิ์

	กระบวนการกลั่น	กระบวนการเพอร์วาพอเรชันร่วมกับกระบวนการกลั่น
การใช้พลังงาน (MJ/kg butanol)	23.6	18.286
ความบริสุทธิ์ของบิวทานอล (%wt)	99.9	99.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่4.23 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอลในสายป้อนต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของบิวทานอบในสายเพอร์มิเอต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อนาที ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์



รูปที่ 4.24 พลังงานจำเพาะในการทำให้บิวทานอลบริสุทธิ์โดยการกลั่น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองในกระบวนการเพอร์วาพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อ ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 10 20 40 80 และ 100 กรัมต่อลิตร อัตราการไหลของสายป้อน 1.86 4.85 7.46 และ10.98 ลิตรต่อชั่วโมง และ เวลาของการไหลวน 3 6 และ 9 ชั่วโมง โดยความดันด้านเพอร์มิเอตควบคุมที่ 5 ทอร์ และเยื่อแผ่นหนา 0.5 มิลลิเมตร ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (40-50 องศาเซลเซียส) เพอร์มิเอชันฟลักซ์ไม่แปรผันตามความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพอร์มิเอชันฟลักซ์แปรผันตามความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน ในขณะที่ความเข้มข้นของบิวทานอลต่ำเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลมีค่าใกล้เคียงกันทุกอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่า เพอร์มิเอชันฟลักซ์ของอาซีโตนและเอทานอลมีแนวโน้มเหมือนเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล ฟลักซ์ของกรดอาซีติกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้น ในขณะที่ฟลักซ์ของกรดบิวทิริกมีค่าน้อยมาก เนื่องจากกรดบิวทิริกไม่สามารถแพร่ผ่านเยื่อแผ่น PDMS ได้

2. ค่าการเลือกของบิวทานอลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนสูงๆ ความเข้มข้นของบิวทานอลมีผลต่อค่าการเลือกมากกว่าอุณหภูมิ ค่าการเลือกของอาซีโตนและเอทานอลมีแนวโน้มเหมือนค่าการเลือกของบิวทานอล แต่อุณหภูมิมีผลต่อค่าการเลือกของอาซีโตนมากกว่าของบิวทานอล และเอทานอล

3. ที่ช่วงอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส ค่า PSI ของบิวทานอลลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน และมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ค่า PSI ของอาซีโตนมีแนวโน้มเหมือนของบิวทานอล ในขณะที่ค่า PSI ของเอทานอลมีค่าลดลงที่ทุกอุณหภูมิเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล

4. ผลการศึกษาร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบในเพอมิเอตพบว่า ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำในเพอมิเอตเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิร้อยละ

โดยน้ำหนักของบิวทานอลจะมีค่าลดลง การเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนจะทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อนมากกว่า 40 กรัมต่อลิตรจะทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอลในเพอมิเอตลดลง

5. การเพิ่มอัตราป้อนในช่วงลามินาร์ทำให้ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเวลาสัมผัสลดลง

6. ผลของเวลาในการไหลวนต่อค่าการนำกลับของบิวทานอล และอาซีโตน พบว่าเวลาในการไหลวนแปรผันโดยตรงกับค่าการนำกลับ

7. ภาวะที่เหมาะสมในการแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักจำลองในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่น PDMS แบบหลายท่อที่ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแยกบิวทานอลคือ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของบิวทานอลในสายป้อน 40 กรัมต่อลิตร superficial velocity 2.57 ลิตรต่อนาที ให้ค่าฟลักซ์ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล 12.36 8.69 และ 0.085 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล 22.7 22.13 และ 3.35 ค่าPSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล 551.73 511.72 และ 59.73 ร้อยละโดยน้ำหนักของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล 48.61 34.19 และ 0.33

8. พลังงานในการแยกบิวทานอลในกระบวนการเพอร์วาพอเรชันร่วมกับการกลั่น ใช้พลังงานในการแยกน้อยกว่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นอย่างเดียว 1.29 เท่า

ข้อเสนอแนะ

1. ควรลดขนาดความหนาของเยื่อแผ่นและความดันด้านเพอร์มิเอต จะทำให้ได้ค่าเพอร์มิเอตชันฟลักซ์มีค่าสูงขึ้น
2. เนื่องจากเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของบิวทานอลค่อนข้างน้อยจึงควรเปลี่ยนชนิดของเยื่อแผ่นเพื่อศึกษาผลของชนิดของเยื่อแผ่นที่มีต่อการแยกบิวทานอลออกจากสารละลายน้ำหมัก

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชมพูนุท พิภพลาภอนันต์.(2537). **เพอร์เวเพอเรชันของของผสมน้ำ-บิวทานอล**.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณรงค์ชัย ประภากรวิริยะ.(2538). **การแยกและการทำให้ตัวทำละลายเข้มข้นจากน้ำหมักอะซิโตน-บิวทานอลด้วยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิชัย ตั้งศรีสำเริง.(2540). **การสกัดสารขั้นต้นจากใบขี้เหล็กและทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน**.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลลิตา อัตนโถ.(2543).**การประยุกต์ใช้กระบวนการเพอร์เวเพอเรชันเพื่อการแยกน้ำออกจากสารสกัดหยาบจากใบขี้เหล็ก**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รัตนา จิระรัตนานนท์.(2543). **กระบวนการแยกเยื่อแผ่นสังเคราะห์**. กรุงเทพ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). **เอกสารเชื้อเพลิงชีวภาพ**.(ออนไลน์).(ม.ป.ป.) แหล่งที่มา : http://www.pttplc.com/Files/Document/Pdf/energy/biofuel_thai.pdf [2552,พฤศจิกายน 20]

ภาษาอังกฤษ

Bengtsson, E., G. Tragardh and B. Hallstrom (1989). Enrichment of aroma Compounds by pervaporation. **Engineering and food, vol. 3, advanced processes**. W. E. L. Spiess and H. Schubert. London, UK, Elsevier: 270-279.

Binning, R. C., R. J. Lee, J. F. Jennings and E. C. Martin (1961). Separation of liquid mixtures by permeation. **Industrial and Engineering Chemistry** 53(1): 45-50. David Ramey.

Deng, S., S. Sourirajan, K. Chan, B. Farnand, T. Okada and T. Matsuura (1991). Dehydration of oil-water emulsion by pervaporation using porous hydrophilic membranes.**Journal of Colloid and Interface Science** 141(1): 218-225.

Dupont Company. **Biobutanol fact sheet** [online]. (n.d.) Available from: http://www2.dupont.com/Production_Agriculture/en_US/assets/downloads/pdfs/BP_DuPont_Fact_Sheet_Biobutanol.pdf [2009,November 11]

Fadeev, A.G., Meagher, M.M., Kelley, S.S. and Volkov, V.V. (2000). Fouling of poly[-1-(trimethylsilyl)-1-propyne] membranes in pervaporative recovery of butanol from aqueous solutions and ABE fermentation broth. **Journal of Membrane Science**. 173: 133–144.

Fisher Scientific. **ETHANOL MSDS** [online]. (2004) Available from : https://fscimage.fishersci.com/msds/91467.htm [2009,November 25]

Fouad, E.A. and Feng, X. (2008). Use of pervaporation to separate butanol from dilute aqueous solution: Effect of operating condition and concentration polarization. **Journal of Membrane Science**. 323: 428–435.

Fouad, E.A. and Feng, X. (2009). Pervaporative separation of n-butanol from dilute aqueous solutions using silicalite-filled poly(dimethyl siloxane) membranes. **Journal of Membrane Science**. 339: 120–125.

Garcia Villaluenga, J.P., Tabe-Mohammadi A. (2000). A review on the separation of benzene/cyclohexane mixtures by pervaporation processes. **Journal of Membrane Science** 169 : 159-174.

Groot,W.J.,Baart de la Faille,Donck,P.B.,R.G.J.M. van der Lans and K.Ch.A.M.Luyben.

(1991). Masstransfer in silicone rubber membranes for the recovery of Fermentation products by pervaporation and presentation. **Bioseparation 2** : 261-277.

Ramey, D. **Production of Butyric Acid and Butanol from Biomass** [online]. (2004a). Available from: http://www.afdc.energy.gov/afdc/pdfs/843183.pdf [2009,November 17]

Ramey,D. **BUTANOL** [online]. (2004b) Available from : http://www.lightparty.com/Energy/Butanol.html [2009,November 17]

Ramey,D.E**. Heat of combustion**[online]. (n.d.) Available from: http://www.butanol.com [2009,November 19]

Huang, J. and Meagher, M.M. (2001). Pervaporative recovery of n-butanol from aqueous solutions and ABE fermentation broth using thin-film silicalite-filled silicone composite membranes. **Journal of Membrane Science**. 192: 231–242.

Jonquières, A., R. Clément, P. Lochon, J. Néel, M. Dresch and B. Chrétien (2002). Industrial state-of-the-art of pervaporation and vapour permeation in the western countries. **Journal of Membrane Science** 206(1-2): 87-117.

Liang, L. and Ruckenstein, E. (1996). Pervaporation of ethanol-water mixtures through polydimethylsiloxane-polystylene interpenetrating polymer network supported membraned. **Journal of Membrane Science**. 114: 227-234.

Liu, F.F., Liu, L. and Feng, X. (2005). Separation of acetone-butanol-ethanol (ABE) from dilute aqueous solution by pervaporation. **Separation and Purification Technology**. 42: 273–282.

Marion K.(2006). **The use of solubility parameters to select membrane materials for pervaporation of oranic mixtures**.Doctoral dissertation. The University of Waikato.

Matsumura, M., Kataoka, H., Ibaraki, Sueki, M., Araki, K. and Yokohama. (1988). Energy saving effect of pervaporation using oleyl alcohol liquid membrane in butanol purification**. Bioprocess Engineering**. 3: 93-100.

Ming Peng , Leland M. Vane , Sean X. Liu. (2003). Recent advances in VOCs removal from water by pervaporation.**Journal of Hazardous Materials** B98 (2003) 69–90

Ohya, H.(1984) Feasibility of concentration of dilute aqueous ethanol solution by favorable-unfavorable membranes system. **Membrane**

9 171- 176.

Qureshi, N., Meagher, M.M. and Hutkins, R.W. (1999). Recovery of butanol from model solutions and fermentation broth using a silicalite/silicone membrane. **Journal of membrane science**. 158: 115-125.

Rapin, J. L. (1988). The betheniville pervaporation unit: The first large-scale productive plant forthe dehydration of ethanol. **Proceedings of the 3rd International Conference on Pervaporation Processes**, Bakish Materials Corporation, Englewood, USA.

Roizard, D., Jonquières, C. Léger, I. Noezar, L. Perrin, Q. T. Nguyen, R. Clément, H. Lenda,P. Lochon and J. Néel (1999). Alcohol/ether separation by pervaporation. Highperformance membrane design. **Separation Science and Technology** 34(3): 369 - 390.

Sciencelab. **BUTANOL MSDS** [online]. (n.d.) Available from : http://www.sciencelab.com/xMSDS-1_Butanol-9927115 [2009,November 25]

Smitha B.,Suhanya D.,Sridhar S. and Ramakrishna (2004). Separation of organic-organic mixtures by pervaporation – a review. **Journal of Membrane Science** 241 : 1-21.

Srinivasan, K., Palanivelu, K. and Navaneetha Gopalakrishnan, A. (2007). Recovery of 1-butanol from a model pharmaceutical aqueouswaste by pervaporation. **Chemical Engineering Science**. 62: 2905–2914.

Sun F., Ruckenstein. E. (1995). Sorbtion and pervaporation of benzene-cyclohexane mixtures through composite membrane prepared via concentrated emulsion polymerization. **Journal of Membrane Science** 99(3) : 273-284.

BASF Corporation. **Techicial Data sheet n-Butanol** [Online]. (n.d.). Available from : http://www2.basf. /oxoproducts/pdfs/n-but.pdf [2010 ,February 8]

Verkerk, A.W., van Male, P., Vorstman, M.A.G. and Keurentjes, J.T.F. (2001). Properties of high flux ceramic pervaporation membranes for dehydration of alcohol/water mixtures. **Separation and Purification Technology**. 22-23: 689–695.

Veronica Garcia, Eva Pongracz, Esa Muurinen and Riitta L. Keiski. (2009). Recovery of n-butanol from salt containing solutions by pervaporation. **Desalination**. 241: 201-211.

Voilley A., Schmidt B., Simatos and Baudron S. (1988). Extraction of aroma Compounds by the pervaporation technique. **Proceedings of Third International Conference on Pervaporation Processes in the Chemical Industry**,Bakish Materials Corporation,Englewood,NJ

Volkov V.V.,(1994). Separation of liquids by pervaporation through polymeric membrasnes . **Russian Chemical Bulletin**, Vol.43 No.2, February

Wijmans J.G.,Baker R.W. (1995). The solution-diffusion model : a review. **Journal of Membrane Science** 107: 1-21.

Xianshe Feng and Robert Y. M. Huang.(1997). Liquid Separation by Membrane Pervaporation: A Review. **Ind. Eng. Chem. Res**., 36, 1048-1066.

Yan Wang, Tai Shung Chung, Huan Wang and Suat Hong Goh. (2009). Butanol isomer separation using polyamide–imide/CD mixed matrix membranes via pervaporation. **Chemical Engineering Science**. 64: 5198 – 5209.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

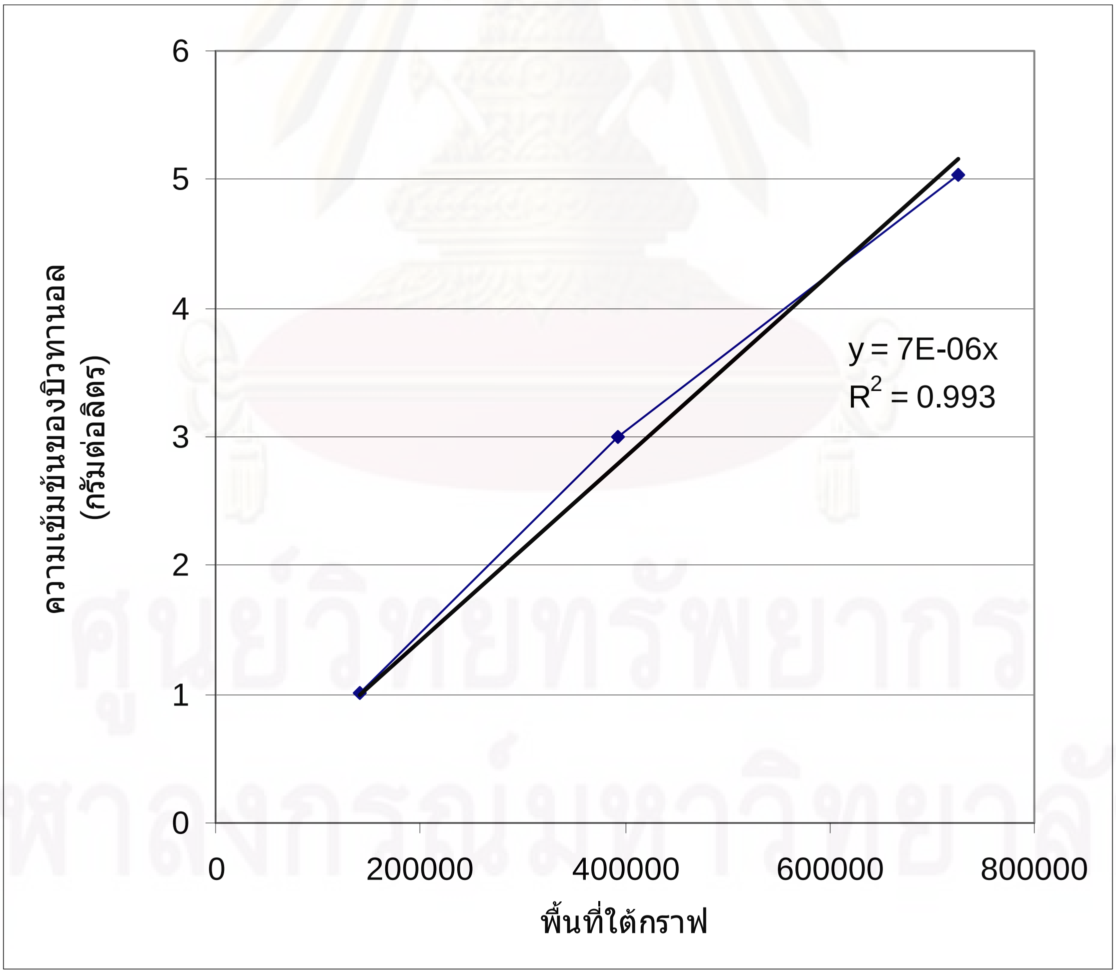
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

เส้นกราฟมาตรฐาน

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของบิวทานอล

ความเข้มข้นของบิวทานอล (กรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
1.01	140525
3	393329
5.04	726244

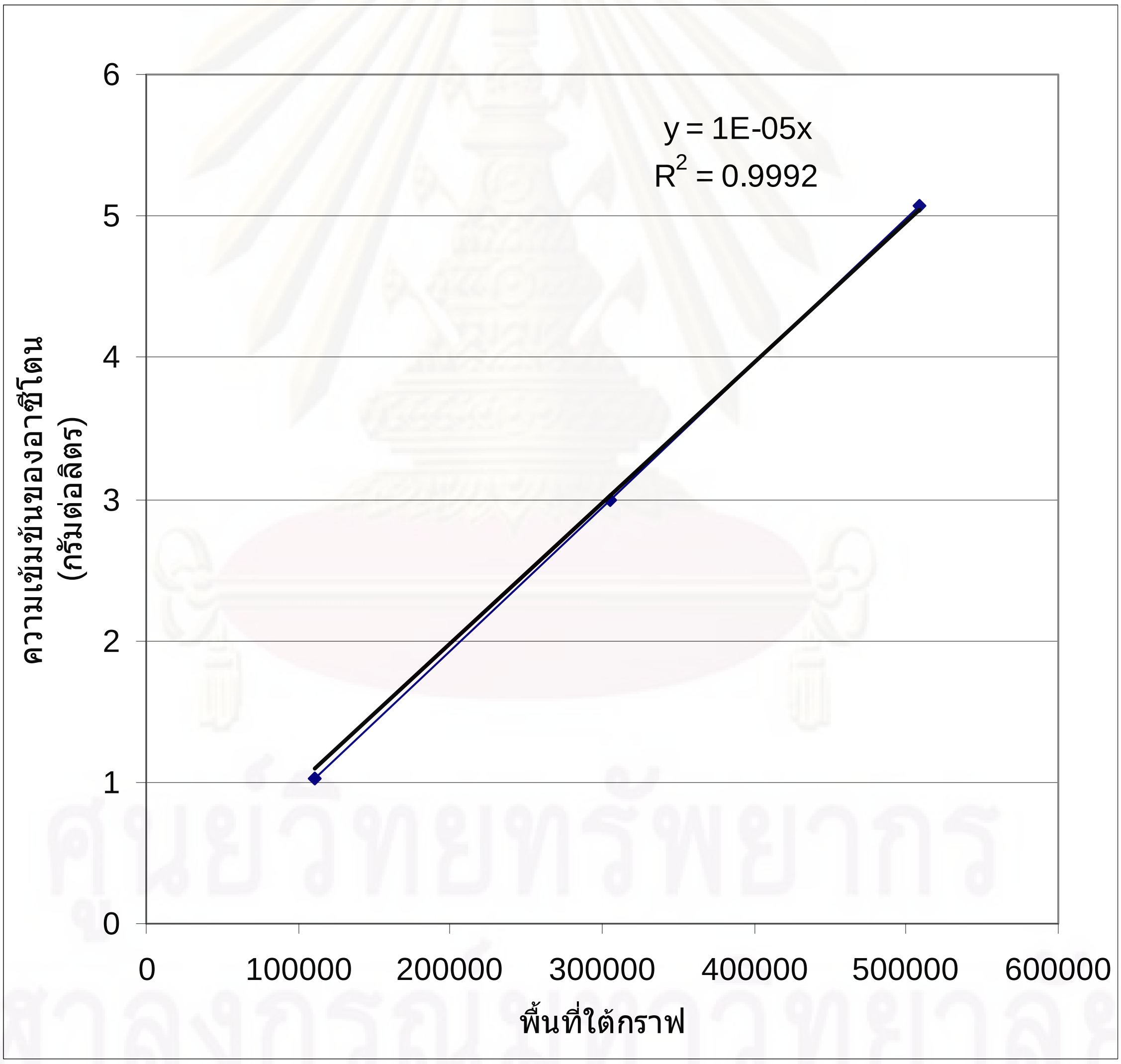


รูปที่ ก.1 แสดงเส้นกราฟมาตราฐานของบิวทานอล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของอาซีโตน

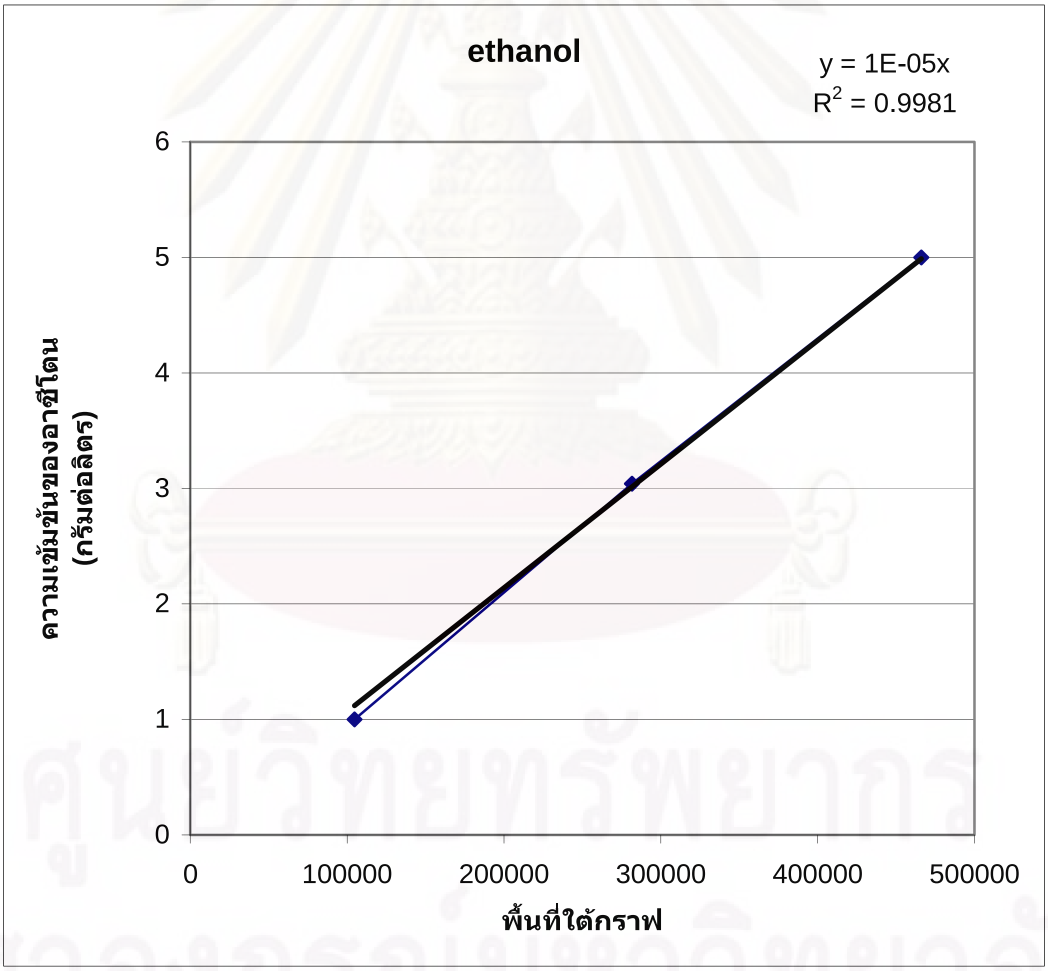
ความเข้มข้นของอาซีโตน (กรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
1.02	110344
3	305266
5.07	509199



รูปที่ ก.2 แสดงเส้นกราฟมาตราฐานของอาซีโตน

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของเอทานอล

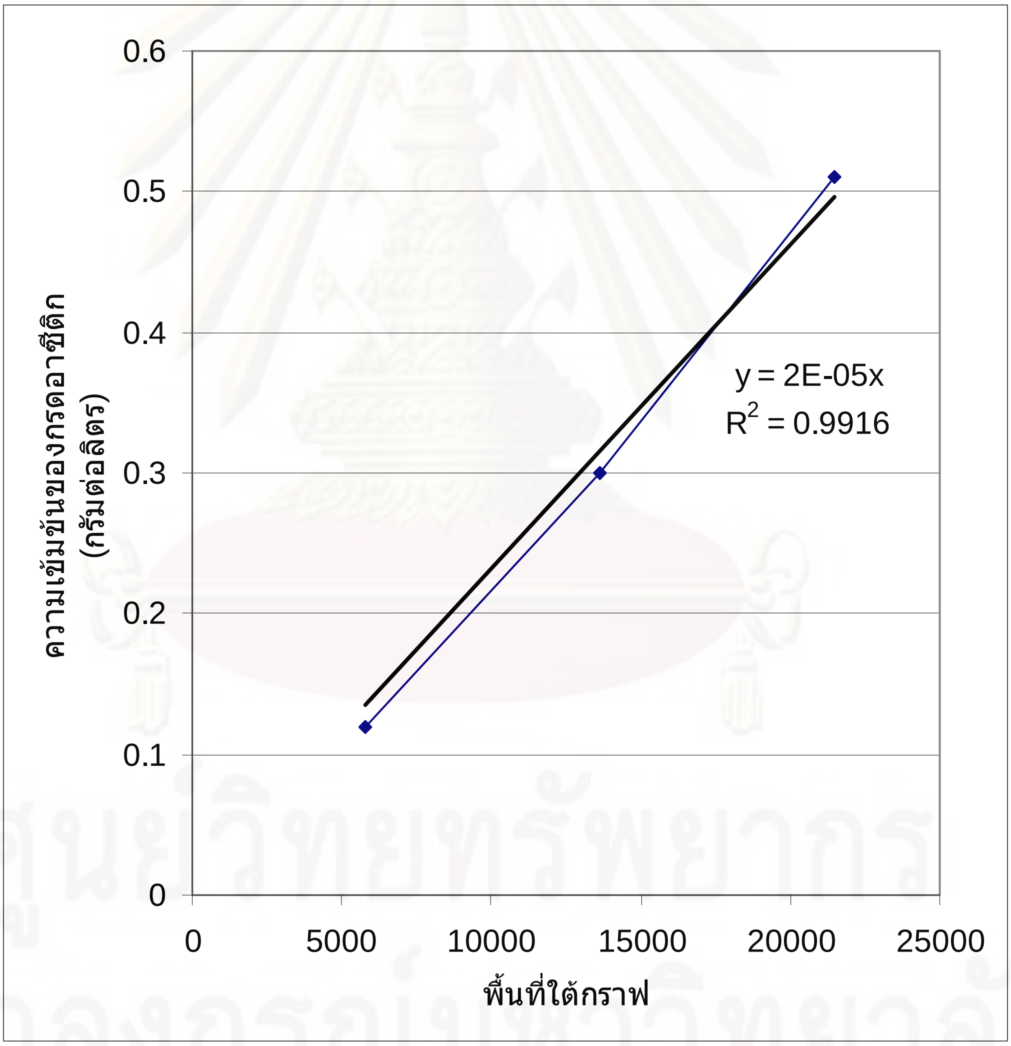
ความเข้มข้นของอาซีโตน (กรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
1	104625
3.04	281602
5	465952



รูปที่ ก.3 แสดงเส้นกราฟมาตราฐานของเอทานอล

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของกรดอาซีติก

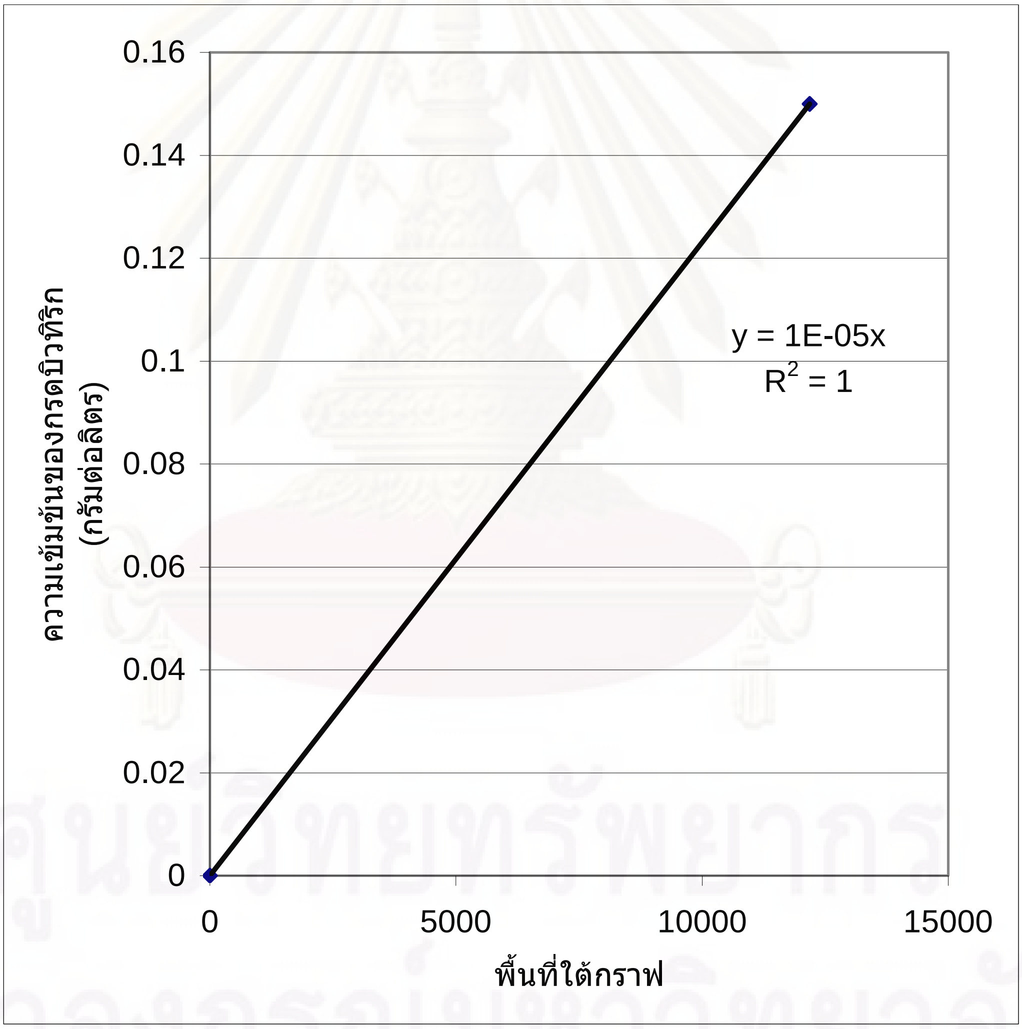
ความเข้มข้นของกรดอาซีติก (กรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
0.12	5811
0.3	13646
0.51	21453



รูปที่ ก.4 แสดงเส้นกราฟมาตราฐานของกรดอาซีติก

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของกรดบิวทิริก

ความเข้มข้นของกรดบิวทิริก (กรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
0	0
0.15	12186



รูปที่ ก.5 แสดงเส้นกราฟมาตราฐานของกรดบิวทิริก

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

การหาค่า Reynolds number

$$Re = \frac{\rho Vd}{\mu} \qquad ข.1$$

$$V = \frac{Q}{A} \qquad ข.2$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของสารละลาย (km/m^3)

V คือ ความเร็วในการไหลผ่านท่อ (m/s)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

μ คือ ความหนืดของสารละลาย (kg/m-s)

Q คือ อัตราการป้อน (m^3/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดขวางของการไหล (m^2)

การหาค่า Superficial velocity

$$v_o = \frac{Q}{A} \qquad ข.3$$

โดยที่ Vo คือ superficial velocity

Q คือ อัตราการป้อน (m^3/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดขวางทั้งหมดของเยื่อแผ่น (m^2)

ตัวอย่างการคำนวณ

สารละลายน้ำหมักจำลองความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ป้อนด้วยอัตราการไหล 1.86 ลิตรต่อชั่วโมง ผ่านเยื่อแผ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร จำนวน 10 เส้น ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลา 3 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิ 40 ^{0}C ρ = 992.1 kg/m^3

μ = 0.653 x 10^{-3} kg/m-s

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$Q = \frac{1.86\ L}{h} \cdot \frac{1m^3}{1000\ L} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{1}{10}$$

$$= 5.17 \times 10^{-8}\ m^3/s$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$= \frac{\pi g (2x10^{-3})^2}{4}$$

$$= 3.14 \times 10^{-4}\ m^2$$

$$V = \frac{5.17 \times 10^{-8}}{3.14 \times 10^{-5}}$$

$$= 0.0164\ m/s$$

$$Re = \frac{992.1 \times 2 \times 10^{-3} \times 0.0164}{0.653 \times 10^{-3}}$$

= 49.83

$$v_o = \frac{Q}{A}$$

$$= \frac{1.86\ L}{h} x \frac{1m^3}{1000\ L} x \frac{1\ h}{3600s} x \frac{1}{10 \bullet \left[\frac{\pi \bullet (2x10^{-2})^2}{4}\right]}$$

= 0.9873 m/min

2. กระบวนการเพอร์วาพอเรชัน

2.1 เพอร์มิเอชันฟลักซ์ของสารละลาย (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

$$J = \frac{W}{AT} \qquad \text{ข.4}$$

โดยที่ J คือ ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์รวม

W คือ มวลของเพอร์มิเอต (กรัม)

A คือ พื้นที่ของเยื่อแผ่น (ตารางเมตร)

T คือ ช่วงเวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)

2.2 ฟลักซ์ของบิวทานอล (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

$$J_{Bu} = y_{Bu} \bullet J \qquad \text{ข.5}$$

โดยที่ y_{Bu} คือ ความเข้มข้นของบิวทานอลด้านเพอร์มิเอต (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

2.3 ฟลักซ์ของอาซีโตน (กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

$$J_{Acet} = y_{Acet} \bullet J \qquad \text{ข.6}$$

โดยที่ y_{Acet} คือ ความเข้มข้นของอาซีโตนด้านเพอร์มิเอต (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

2.4 ฟลักซ์ของเอทานอล (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

$$J_{Et} = y_{Et} \bullet J \qquad \text{ข.7}$$

โดยที่ y_{Et} คือ ความเข้มข้นของเอทานอลด้านเพอร์มิเอต (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

2.5 ฟลักซ์ของกรดอาซีติก (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

$$J_{Aa} = y_{Aa} \bullet J \qquad \text{ข.8}$$

โดยที่ y_{Aa} คือ ความเข้มข้นของdกรดอาซีติกด้านเพอร์มิเอต (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

2.6 ฟลักซ์ของกรดบิวทิริก (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

$$J_{Buty} = y_{Buty} \bullet J \qquad ข.9$$

โดยที่ y_{Buty} คือ ความเข้มข้นของกรดบิวทิริกด้านเพอร์มิเอต (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

2.7 ฟลักซ์ของน้ำ (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

$$J_W = J - J_{Bu} - J_{Acet} - J_{Et} - J_{Aa} - J_{Buty} \qquad ข.10$$

2.8 ค่าการเลือกบิวทานอลผ่านเยื่อแผ่น

$$\alpha = \left[\frac{\left(\frac{C_{Bu,perm}}{1-C_{Bu,perm}}\right)}{\left(\frac{C_{Bu,feed}}{1-C_{Bu,feed}}\right)}\right] \qquad ข.11$$

2.9 ค่า PSI

$$PSI = J_i(\alpha-1) \qquad ข.12$$

โดยที่ J_i คือ ค่าฟลักซ์ของบิวทานอลในสายเพอร์มิเอต (กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

2.10 ค่าเพอร์มิเอบิลิตีของบิวทานอล

$$P_{Bu} = \frac{(J_{Bu})l}{(p_{Bu,feed} - p_{Bu,perm})} \qquad ข.13$$

โดยที่ $p_{Bu,feed}$ คือ ความดันย่อยของบิวทานอลในสายป้อน (ทอร์)

$p_{Bu,perm}$ คือ ความดันย่อยของบิวทานอลในสายเพอร์มิเอต (ทอร์)

l คือ ความหนาของเยื่อแผ่น

2.11 ค่าการนำกลับ

$$\text{Recovery (\%)} = \frac{W_{permeate,i}}{W_{feed,i}} g100$$ ข.14

โดยที่ $W_{permeate,i}$ = น้ำหนักของสาร i ทางสายเพอร์มิเอต (กรัม)

$W_{feed,i}$ = น้ำหนักของสาร i ทางสายป้อน (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อมูลการแยกออกจากสารละลายน้ำหมักจำลองที่ ความเข้มข้นของบิวทานอล 10 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาในการไหนวน 3 ชั่วโมง พื้นที่การถ่ายเทมวลสาร 0.007854 ตารางเมตร

จากตารางที่ ค.3 : น้ำหนักเพอร์มิเอต 0.3217 กรัม

2.1 เพอร์มิเอชันฟลักซ์ของสารละลาย (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง) จากสมการที่ ข.4

$$J = \frac{W}{AT}$$

$$J = \frac{0.3217}{0.007854 \bullet (3)}$$

= 13.8825 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

2.11 ฟลักซ์ของบิวทานอล (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง) จากสมการที่ ข.5

$$J_{Bu} = y_{Bu} \bullet J$$

$$= 0.3341 \times 13.8825$$

= 4.6390 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

2.12 ฟลักซ์ของอาซีโตน (กรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง) จากสมการที่ ข.6

$$J_{Acet} = y_{Acet} \bullet J$$
$$= 0.2226 \times 13.8825$$

= 3.0897 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

2.13 ฟลักซ์ของเอทานอล (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง) จากสมการที่ ข.7

$$J_{Et} = y_{Et} \bullet J$$
$$= 0.0057 \times 13.8825$$

= 0.0791 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

2.14 ฟลักซ์ของกรดอาซีติก (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง) จากสมการที่ ข.8

$$J_{Aa} = y_{Aa} \bullet J$$
$$= 0.3895 \times 13.8825$$

= 5.4075 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

2.15 ฟลักซ์ของกรดบิวทิริก (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง) จากสมการที่ ข.9

$$J_{Buty} = y_{Buty} \bullet J$$
$$= 0 \times 13.8825$$

= 0 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

2.16 ฟลักซ์ของน้ำ (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง) จากสมการที่ ข.10

$$J_W = J - J_{Bu} - J_{Acet} - J_{Et} - J_{Aa} - J_{Buty}$$

= 13.8825 – 4.6390 – 3.0897 – 0.0791 – 5.4075

= 0.6672 กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

2.17 ค่าการเลือกบิวทานอลผ่านเยื่อแผ่น จากสมการที่ ข.11

$$\alpha = \left[\frac{\left(\frac{C_{Bu,perm}}{1-C_{Bu,perm}}\right)}{\left(\frac{C_{Bu,feed}}{1-C_{Bu,feed}}\right)}\right]$$

$$\alpha = \left[\frac{\left(\frac{0.01}{1-0.01}\right)}{\left(\frac{0.3341}{1-0.3341}\right)}\right]$$

$$= 49.6845$$

2.18 ค่า PSI จากสมการที่ ข.12

$$\begin{aligned} PSI &= J_i(\alpha-1) \\ &= 13.8825(49.6845-1) \\ &= 675.8644 \end{aligned}$$

2.19 ค่าการนำกลับ จากสมการที่ ข.14

$$\begin{aligned} \text{Recovery (\%)} &= \frac{W_{permeate,i}}{W_{feed,i}} g100 \\ &= \frac{0.1093}{10} x100 \\ &= 1.093 \end{aligned}$$

3 อุณหภูมิที่สารผสมกลั่นตัว

$$\sum \frac{y_i P^{tot}}{P_i^{vap}(T)} = 1 \qquad \text{ข.15}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{y_1 P^{tot}}{P_1^{vap}(T)} + \frac{y_2 P^{tot}}{P_2^{vap}(T)} + \frac{y_3 P^{tot}}{P_3^{vap}(T)} + \ldots + \frac{y_n P^{tot}}{P_n^{vap}(T)} = 1 \qquad \text{ข.16}$$

สำหรับระบบ 2 องค์ประกอบสามารถลดรูปได้

$$\frac{y_1 P^{tot}}{P_1^{vap}(T)} + \frac{y_2 P^{tot}}{P_2^{vap}(T)} = 1 \qquad \text{ข.17}$$

$$f(1) = \frac{y_1 P^{tot}}{P_1^{vap}(T)} \qquad \text{ข.18}$$

$$f(2) = \frac{y_2 P^{tot}}{P_2^{vap}(T)} \qquad \text{ข.19}$$

โดยค่า P^{tot} คือ ค่าความดันในสายเพอร์มิเอต

f(1) คือ ฟังค์ชันของบิวทานอลที่อุณหภูมิใดๆ

f(2) คือ ฟังค์ชันของน้ำที่อุณหภูมิใดๆ

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

สารละลายน้ำหมักจำลองความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์พบว่ามีอัตราส่วนโดยมวลของบิวทานอลเท่ากับ 0.4861 และน้ำเท่ากับ 0.5139

สมมุติฐาน ระบบ 2 องค์ประกอบ

น้ำหนักเพอร์มิเอตทั้งหมด 1 กรัม

โมลของบิวทานอล = อัตราส่วนโดยมวลของบิวทานอล / น้ำหนักโมเลกุลของบิวทานอล

= 0.4861/74

= 6.569×10^{-3}

โมลของน้ำ = อัตราส่วนโดยมวลของน้ำ / น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ

= 0.5139/18

= 0.02855

โมลรวม = โมลของบิวทานอล + โมลของน้ำ

= 0.0351

อัตราส่วนโดยโมลของบิวทานอล = โมลของบิวทานอล / โมลรวม

= 6.569 x 10^{-3} / 0.0351

= 0.1872

อัตราส่วนโดยโมลของน้ำ = 1- อัตราส่วนโดยโมลของบิวทานอล

= 0.8128

ที่อุณหภูมิ 9 องศาเซลเซียส

ความดันไอของบิวทานอล = 1.63 มิลลิเมตรปรอท

ความดันไอของบิวทานอล = 8.57 มิลลิเมตรปรอท

$$\frac{y_1 P^{tot}}{P_1^{vap}(T)} + \frac{y_2 P^{tot}}{P_2^{vap}(T)} = 1$$ จากสมการที่ ข.17

$$f(1) = \frac{y_1 P^{tot}}{P_1^{vap}(T)}$$

$$= \frac{0.1872 \text{ x } 5}{1.63}$$

$$f(2) = \frac{y_2 P^{tot}}{P_2^{vap}(T)}$$

$$= \frac{0.8128 \text{ x } 5}{8.57}$$

$$f(1) + f(2) = 1.04$$

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 แสดงองค์ประกอบของสารละลายน้ำหมักจำลองในสายป้อน

	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)				
	บิวทานอล	อาซีโตน	เอทานอล	กรดอาซิติก	กรดบิวทิริก
ความเข้มข้นของบิวทานอล 10 กรัมต่อลิตร	10	6	0.25	0.5	0.2
ความเข้มข้นของบิวทานอล 20 กรัมต่อลิตร	20	12	0.5	1	0.4
ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร	40	24	1	2	0.8
ความเข้มข้นของบิวทานอล 80 กรัมต่อลิตร	80	48	2	4	1.6
ความเข้มข้นของบิวทานอล 100 กรัมต่อลิตร	100	60	2.5	5	2

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าน้ำหนักของสารทางด้านเพอร์มิเอตที่ได้จากการทดลองที่อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของบิวทานอล (กรัมต่อลิตร)				
	10	20	40	80	100
40	0.3217	0.5286	0.5991	0.7034	0.8871
50	0.3644	0.5460	0.6537	0.8061	0.8606
60	0.3541	0.7025	0.6875	1.5118	2.5641
70	0.4774	0.5080	0.6263	1.8747	4.5719

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าเพอร์มิเอตชันฟลักซ์ (กรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง) ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของบิวทานอล (กรัมต่อลิตร)				
	10	20	40	80	100
40	13.8825	22.4344	25.4265	29.8532	37.6496
50	15.4656	23.1729	27.7438	34.2119	36.5249
60	15.0284	29.8150	30.9142	64.1626	108.8235
70	20.2614	21.5601	26.5809	79.5646	194.0370

ตารางที่ ค.4 แสดงค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอตที่ได้จากการทดลองที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	40	50	60	70
บิวทานอล	0.3342	0.2607	0.2595	0.2546
อาซีโตน	0.2226	0.1866	0.1729	0.1228
เอทานอล	0.0057	0.0045	0.0034	0.0029
กรดอาซีติก	0.3895	0.3273	0.1399	0.1211
กรดบิวทิริก	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
น้ำ	0.0481	0.2209	0.4242	0.4986

ตารางที่ ค.5 แสดงค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอตที่ได้จากการทดลองที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	40	50	60	70
บิวทานอล	0.3206	0.3399	0.2875	0.2426
อาซีโตน	0.2742	0.2034	0.2529	0.1733

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอทานอล	0.0035	0.0030	0.0020	0.0023
กรดอาซีติก	0.0478	0.0802	0.0345	0.0214
กรดบิวทิริก	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
น้ำ	0.3539	0.3736	0.4231	0.5605

ตารางที่ ค.6 แสดงค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอตที่ได้จากการทดลองที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	40	50	60	70
บิวทานอล	0.4861	0.3759	0.3431	0.3903
อาซีโตน	0.3419	0.2863	0.2167	0.1804
เอทานอล	0.0033	0.0029	0.0023	0.0029
กรดอาซีติก	0.0357	0.0249	0.0146	0.0211
กรดบิวทิริก	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
น้ำ	0.1330	0.3100	0.4233	0.4053

ตารางที่ ค.7 แสดงค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอตที่ได้จากการทดลองที่ความเข้มข้น 80 กรัมต่อลิตร อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	40	50	60	70
บิวทานอล	0.3266	0.3219	0.3589	0.3724
อาซีโตน	0.3805	0.3611	0.3325	0.3506
เอทานอล	0.0035	0.0036	0.0033	0.0032
กรดอาซีติก	0.0278	0.0000	0.0080	0.0059
กรดบิวทิริก	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
น้ำ	0.2615	0.3134	0.2973	0.2678

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.8 แสดงค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารต่างๆ ในสายเพอร์มิเอตที่ได้จากการทดลองที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	40	50	60	70
บิวทานอล	0.3315	0.3462	0.3018	0.3293
อาซีโตน	0.3177	0.3755	0.2537	0.2259
เอทานอล	0.0032	0.0040	0.0027	0.0022
กรดอาซีติก	0.0109	0.0056	0.0000	0.0000
กรดบิวทิริก	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
น้ำ	0.3367	0.2687	0.4418	0.4426

ตารางที่ ค.9 แสดงค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ของสารต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของบิวทานอล 10 กรัมต่อลิตร ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ฟลักซ์ของบิวทานอล	ฟลักซ์ของอาซีโตน	ฟลักซ์ของเอทานอล	ฟลักซ์ของกรดอาซิติก	ฟลักซ์ของกรดบิวทิริก
40	4.6390	3.0897	0.0791	5.4075	0
50	4.0316	2.8858	0.0700	5.0622	0
60	3.8997	2.5984	0.0517	2.1030	0
70	5.1576	2.4880	0.0592	2.4540	0

ตารางที่ ค.10 แสดงค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ของสารต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของบิวทานอล 20 กรัมต่อลิตร ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ฟลักซ์ของบิวทานอล	ฟลักซ์ของอาซีโตน	ฟลักซ์ของเอทานอล	ฟลักซ์ของกรดอาซิติก	ฟลักซ์ของกรดบิวทิริก
40	7.1927	6.1524	0.0780	1.0721	0
50	7.8764	4.7139	0.0686	1.8574	0

60	8.5707	7.5411	0.0601	1.0298	0
70	5.2298	3.7370	0.0487	0.4610	0

ตารางที่ ค.11 แสดงค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ของสารต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ฟลักซ์ของบิวทานอล	ฟลักซ์ของอาซีโตน	ฟลักซ์ของเอทานอล	ฟลักซ์ของกรดอาซิติก	ฟลักซ์ของกรดบิวทิริก
40	12.3592	8.6929	0.0850	0.9069	0
50	10.4286	7.9437	0.0796	0.6914	0
60	10.0102	6.3242	0.0677	0.4259	0
70	10.3734	4.7949	0.0776	0.5610	0

ตารางที่ ค.12 แสดงค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ของสารต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของบิวทานอล 80 กรัมต่อลิตร ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ฟลักซ์ของบิวทานอล	ฟลักซ์ของอาซีโตน	ฟลักซ์ของเอทานอล	ฟลักซ์ของกรดอาซิติก	ฟลักซ์ของกรดบิวทิริก
40	9.7504	11.3604	0.1038	0.8313	0
50	11.0112	12.3536	0.1238	0	0
60	23.0288	21.3343	0.2102	0.5121	0
70	29.6324	27.8991	0.2562	0.4710	0

ตารางที่ ค.13 แสดงค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ของสารต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของบิวทานอล 100 กรัมต่อลิตร ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ฟลักซ์ของบิวทานอล	ฟลักซ์ของอาซีโตน	ฟลักซ์ของเอทานอล	ฟลักซ์ของกรดอาซิติก	ฟลักซ์ของกรดบิวทิริก
40	12.4827	11.9603	0.1207	0.4092	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

50	12.6463	13.7156	0.1460	0.2046	0
60	32.8458	27.6131	0.2891	0	0
70	63.8889	43.8416	0.4206	0	0

ตารางที่ ค.14 แสดงค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 10 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	675.8644	644.4780	304.2423
50	524.3837	572.2618	265.6340
60	506.3259	505.4013	192.2029
70	664.6590	449.5866	217.0245

ตารางที่ ค.15 แสดงค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 20 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	492.0988	669.8479	132.7647
50	561.5005	464.0326	114.3080
60	559.5758	801.2494	90.5370
70	316.7656	350.6211	76.0372

ตารางที่ ค.16 แสดงค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล

40	551.7318	511.7212	59.7298
50	373.2823	424.8955	51.9726
60	336.5297	299.1670	38.5965
70	374.9297	207.4314	49.8990

ตารางที่ ค.17 แสดงค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 80 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	136.6625	333.8628	22.1044
50	152.5155	349.2637	27.7849
60	348.9350	569.7223	41.0702
70	463.4409	772.5363	48.6708

ตารางที่ ค.18 แสดงค่าการเลือกของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 100 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	130.4087	236.9661	-36.1119
50	137.5672	307.5526	21.9355
60	295.7814	446.2408	2.1891
70	663.1493	693.2394	-25.9540

ตารางที่ ค.19 แสดงค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 10 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	675.8644	644.4780	304.2423
50	524.3837	572.2618	265.6340
60	506.3259	505.4013	192.2029
70	664.6590	449.5866	217.0245

ตารางที่ ค.20 แสดงค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 20 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	492.0988	669.8479	132.7647
50	561.5005	464.0326	114.3080
60	559.5758	801.2494	90.5370
70	316.7656	350.6211	76.0372

ตารางที่ ค.21 แสดงค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	551.7318	511.7212	59.7298
50	373.2823	424.8955	51.9726
60	336.5297	299.1670	38.5965
70	374.9297	207.4314	49.8990

ตารางที่ ค.22 แสดงค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 80 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	136.6625	333.8628	22.1044
50	152.5155	349.2637	27.7849
60	348.9350	569.7223	41.0702
70	463.4409	772.5363	48.6708

ตารางที่ ค.23 แสดงค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 100 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 4.85 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
40	130.4087	236.9661	-36.1119
50	137.5672	307.5526	21.9355
60	295.7814	446.2408	2.1891
70	663.1493	693.2394	-25.9540

ตารางที่ ค.24 แสดงค่าน้ำหนักของสารทางด้านเพอร์มิเอต ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

	อัตราป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)			
	1.86	4.85	7.46	10.98
น้ำหนักด้านเพอร์มิเอต (กรัม)	0.7524	0.5991	0.694	0.5711

ตารางที่ ค.25 แสดงค่าความเข้มข้นสารทางด้านเพอร์มิเอต (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

	อัตราป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)			
	1.86	4.85	7.46	10.98
บิวทานอล	33.4025	48.6073	36.4188	35.0461
อาซีโตน	30.3045	34.1883	27.0572	28.4934
เอทานอล	0.2802	0.3342	0.2610	0.2641
กรดอาซีติก	0.5867	3.5667	1.1499	1.2436
กรดบิวทิริก	0	0	0	0

ตารางที่ ค.26 แสดงค่าเพอร์มิเอตซันฟลักซ์ของสารต่างๆ ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

เพอร์มิเอชันฟลักซ์ (กรัมต่อลิตร-ชั่วโมง)	อัตราป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)			
	1.86	4.85	7.46	10.98
บิวทานอล	10.6663	12.3592	10.7269	8.4945
อาซีโตน	9.6771	8.6929	7.9695	6.9063
เอทานอล	0.0895	0.0850	0.0769	0.0640
กรดอาซีติก	0.1873	0.9069	0.3387	0.3014
กรดบิวทิริก	0	0	0	0
น้ำ	11.3126	3.3826	10.3423	8.4719

ตารางที่ ค.27 แสดงค่า Re ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อัตราป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	ค่า Re
1.86	49.83
4.85	130.36

7.46	200.42
10.98	294.99

ตารางที่ ค.28 แสดงค่า Superficial velocity ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อัตราป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	Superficial velocity (m/min)
1.86	0.9873
4.85	2.5743
7.46	3.9596
10.98	5.8280

ตารางที่ ค.29 แสดงค่าการเลือก ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อัตราป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	ค่าการเลือก ของบิวทานอล	ค่าการเลือก ของอาซีโตน	ค่าการเลือก ของเอทานอล
1.86	12.0373	17.6813	2.8065
4.85	22.6991	21.1255	3.3491
7.46	13.5183	14.8371	2.5717
10.98	12.9492	16.2036	2.6446

ตารางที่ ค.30 แสดงค่า PSI ของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์ เวลาในการไหลวน 3 ชั่วโมง

อัตราป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	ค่า PSI ของบิวทานอล	ค่า PSI ของอาซีโตน	ค่า PSI ของเอทานอล
1.86	352.4532	532.6804	57.6860
4.85	551.7318	511.7212	59.7298

7.46	368.7168	407.5609	46.2929
10.98	289.6279	368.5072	39.8620

ตารางที่ ค.31 แสดงค่าน้ำหนักของสารทางด้านเพอร์มิเอต ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อลิตร อัตราป้อน 1.86 ลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์

	เวลาในการไหลวน (ชั่วโมง)		
	3	6	9
น้ำหนักด้านเพอร์มิเอต (กรัม)	0.7524	0.4336	0.7302

ตารางที่ ค.32 แสดงค่าการนำกลับของบิวทานอล อาซีโตน และเอทานอล ที่อัตราการป้อน 1.86 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของบิวทานอล 40 กรัมต่อ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันเพอร์มิเอต 5 ทอร์

ค่าการนำกลับ (เปอร์เซ็นต์)	เวลาในการไหลวน (ชั่วโมง)		
	3	6	9
บิวทานอล	0.6283	0.9943	1.6390
อาซีโตน	0.9500	1.6129	2.4233
เอทานอล	0.2108	0.4700	0.5100

ตารางที่ ค.33 แสดงค่าความดันไอของบิวทานอล และน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดันไอของบิวทานอล (มิลลิเมตรปรอท)	ความดันไอน้ำ (มิลลิเมตรปรอท)
-10	0.24	2.11
-9	0.27	2.28
-8	0.3	2.47
-7	0.34	2.67
-6	0.38	2.89

-5	0.42	3.12
-4	0.46	3.37
-3	0.51	3.63
-2	0.57	3.91
-1	0.63	4.22
0	0.7	4.54
1	0.77	4.88
2	0.85	5.25
3	0.94	4.86
4	1.03	6.05
5	1.13	6.5
6	1.24	6.97
7	1.36	7.47
8	1.49	8
9	1.63	8.57
10	1.79	9.17

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพีรนิติ สมบัติไพรวัน เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน ค.ศ. 1985 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนหอวัง นนทบุรี เมื่อปี ค.ศ.2003 หลังจากนั้น ได้ศึกษาปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หลังจากสำเร็จการศึกษา (เกียรตินิยมอันดับสอง) จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี ค.ศ.2007 ได้ศึกษาต่อปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี (วิศวกรรมชีวเคมี) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสำเร็จการศึกษาในปี ค.ศ. 2010

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย