

การแยกอะซิโตนไทรล์ออกจากสารละลายเจือจาง
โดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน



นางสาว พนิดา ปรารัตน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3715-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**SEPARATION OF ACETONITRILE FROM DILUTED SOLUTION
BY PERVAPORATION PROCESS**

Miss. Panida Prarat



**สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Environmental Science (Inter-department)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3715-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกอะซิโตนในไตรลีสออกจากสารละลายเจือจางโดยกระบวนการ เพอร์แวกพอเรชัน
โดย	นางสาว พนิดา ปรารัตน์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ ไชยิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชนน ลีพัฒนาไพบูรณ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พนิดา ปราวรัตน์ : การแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากสารละลายเจือจางโดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน (SEPARATION OF ACETONITRILE FROM DILUTED SOLUTION BY PERVAPORATION PROCESS) อ.ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม, 110 หน้า. ISBN 974-17-3715-7

ได้นำกระบวนการเพอร์เวปอเรชันมาใช้ในการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากสารละลายเจือจางโดยใช้เยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารป้อนในช่วงร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร ความดันด้านเพอมีเอทในช่วง 10-40 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิของสารป้อนในช่วง 25-50 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อนในช่วง 6-20 มิลลิลิตรต่อนาที และหาความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ในเพอมีเอทและสารป้อนโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารป้อน จะทำให้ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นขณะที่ค่าฟลักซ์ของน้ำลดลง ส่วนการลดความดันด้านเพอมีเอทและการเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนจะทำให้ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์และค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้น สำหรับการเลือกผ่านนั้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนจะทำให้ค่าการเลือกผ่านลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารป้อนหรือการลดความดันด้านเพอมีเอทจะทำให้ค่าการเลือกผ่านเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากสารละลายเจือจางด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน คือ ที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิของสารป้อน 40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปอเรชันในการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC พบว่า สมรรถนะในการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากตัวอย่างน้ำทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพในการบำบัดและการคืนกลับเท่ากับร้อยละ 33.46 และ 33.60 ตามลำดับ

สหสาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4489090720 : MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : PERVAPORATION / POLYTETRAFLUORO ETHYLENE / ACETONITRILE

PANIDA PRARAT : SEPARATION OF ACETONITRILE FROM DILUTED SOLUTION BY PERVAPORATION PROCESS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. AMORN PETSOM, Ph.D., 110 pp. ISBN 974-17-3715-7

Pervaporation process was examined as a possible technique for separation of acetonitrile from diluted solution by using polytetrafluoro ethylene membrane. The experiments were performed using the feed concentration (5 to 20 vol%), permeate pressure (10 to 40 mmHg), feed temperature (25 to 50 °C) and feed flow rate (6 to 20 ml/min). The concentration of acetonitrile in the permeate and feed solution were determined by gas chromatography.

The results showed that organic flux increased, while water flux decreased with increasing the feed concentration and feed temperature. The organic and water fluxes increased with increasing feed flow rate but increased with decreasing permeate pressure. For the selection factor, it increased with increasing feed temperature, feed flow rate and decreasing permeate pressure but decreased with increasing feed concentration. The optimum conditions of pervaporation process for separation of acetonitrile from diluted solution were obtained at the feed concentration of 5 vol%, permeate pressure of 10 mmHg, feed temperature of 40 °C and feed flow rate of 20 ml/min.

The comparison of pervaporation process performance indicated that the separation of acetonitrile from HPLC wastewater did not differ from acetonitrile-water mixtures. In addition, wastewater treatment and recovery efficiency were 33.46 % and 33.60 % ,respectively.

Inter-department..... <u>Environmental Science</u>	Student's signature.....
Field of study <u>Environmental Science</u>	Advisor's signature.....
Academic year..... <u>2003</u>	Coadvisor's signature.....-

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการวิจัย ตลอดจนแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย อีกทั้งสละเวลาช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชนันท์ ลีพิพัฒน์ไพบูลย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช ที่กรุณาตรวจทาน ให้คำแนะนำและคำปรึกษาด้านเทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง Gas Chromatography และให้ความช่วยเหลือในทุกเรื่องเสมอมา

ขอขอบพระคุณสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสารเคมีและสถานที่ในการทำการทดลอง และขอขอบพระคุณทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ช่วยให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ให้โอกาส และให้ความอุปการะทางด้านทุนการศึกษาและกำลังใจตลอดมา ตลอดจนญาติพี่น้องและเพื่อนๆ ที่ช่วยดูแลด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ท
รายการสัญลักษณ์.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความเป็นมาของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน.....	5
2.2 คำจำกัดความ.....	7
2.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในอุตสาหกรรม.....	8
2.4 กลไกการถ่ายเทมวลของสารผ่านเยื่อแผ่น.....	11
2.5 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน.....	17
2.6 การประเมินสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน.....	18
2.7 ชนิดของเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน.....	20
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน.....	21
2.9 ประเภทของโมดูลในกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน.....	23
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 เคมีภัณฑ์.....	33
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง.....	36
3.3.1 การเริ่มต้นเดินระบบเพอร์เวปพอเรชั่น.....	36
3.3.2 การตรวจวัดระหว่างการเดินระบบเพอร์เวปพอเรชั่น.....	36
3.3.3 ภายหลังจากเดินระบบเพอร์เวปพอเรชั่น.....	36
3.3.4 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการ เพอร์เวปพอเรชั่น.....	37
3.3.4.1 ผลของความเข้มข้นของสารป้อน.....	37
3.3.4.2 ผลของความดันด้านเพอมีเอท.....	37
3.3.4.3 ผลของอุณหภูมิของสารป้อน.....	37
3.3.4.4 ผลของอัตราการไหลของสารป้อน.....	38
3.3.6 เปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชั่นในการแยก อะซิโตไนไตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนไตรล์ และน้ำเสียจาก เครื่อง HPLC.....	38
3.3.3 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของอะซิโตไนไตรล์.....	38
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลของความเข้มข้นของสารป้อน.....	40
4.2 ผลของความดันด้านเพอมีเอท.....	45
4.3 ผลของอุณหภูมิของสารป้อน.....	50
4.4 ผลของอัตราการไหลของสารป้อน.....	55
4.5 เปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชั่นในการแยกอะซิโตไนไตรล์ ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนไตรล์ และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC.....	60
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
รายการอ้างอิง.....	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก : การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์.....	73
ภาคผนวก ข : การคำนวณหาค่าความเข้มข้น ค่าฟลักซ์ และค่าการเลือกผ่าน.....	75
ภาคผนวก ค : ข้อมูลการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ง : Detection limit และความเที่ยงของการวิเคราะห์ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....	93
ภาคผนวก จ : สถิติวิเคราะห์.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	110



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	บริษัทที่ใช้กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันในระดับอุตสาหกรรม.....	7
2.2	เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคต่างๆ.....	9
2.3	การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายในระดับอุตสาหกรรม.....	9
4.1	ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิโตนในไทรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน.....	61
4.2	ประสิทธิภาพในการคืนกลับของอะซิโตนในไทรล์.....	62
ค.1	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 5 vol%.....	79
ค.2	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 10 vol%.....	79
ค.3	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 15 vol%.....	80
ค.4	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 20 vol%.....	80
ค.5	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 20 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 5 vol%.....	80
ค.6	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 30 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 5 vol%.....	81
ค.7	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 40 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 5 vol%.....	81
ค.8	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 20 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 10 vol%.....	81
ค.9	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 30 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 10 vol%.....	82
ค.10	ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 40 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 10 vol%.....	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ค.37 ผลการแยกน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่อุณหภูมิ 40 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 5 vol%.....	91
ค.38 ผลการแยกน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่อุณหภูมิ 40 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 10 vol%.....	91
ค.39 ผลการแยกน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่อุณหภูมิ 40 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 15 vol%.....	92
ค.40 ผลการแยกน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่อุณหภูมิ 40 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg และความเข้มข้นสารป้อน 20 vol%.....	92
ง.1 แสดงความเข้มข้นของอะซิโตนไนโตรล์เพื่อใช้คำนวณค่า %RSD.....	94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	กระบวนการทางอุตสาหกรรมสำหรับการแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลายเจือจาง.....	2
2.1	สิทธิบัตรของประเทศสหรัฐอเมริกาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเพอร์เวปพอร์เรชัน ตั้งแต่ปี 1960-ปัจจุบัน.....	6
2.2	แสดงกลไกของกระบวนการเพอร์เวปพอร์เรชัน.....	8
2.3	กระบวนการแยก Methanol/methyl t-butyl ether.....	10
2.4	การแยกสารหอมระเหยด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอร์เรชัน.....	11
2.5	แสดงกลไก Solution-diffusion.....	12
2.6	การเกิด CP ในกระบวนการเพอร์เวปพอร์เรชัน.....	17
2.7	แสดงสูตรโครงสร้างของพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน.....	20
2.8	แสดงโมดูลแบบแผ่นและกรอบ.....	24
2.9	แสดงโมดูลแบบท่อ.....	24
2.10	แสดงโมดูลแบบท่อม้วน.....	25
2.11	แสดงโมดูลแบบเส้นใยกลวง.....	25
3.1	แสดงโมดูลของกระบวนการเพอร์เวปพอร์เรชัน.....	34
3.2	แผนภาพแสดงกระบวนการเพอร์เวปพอร์เรชัน.....	34
3.3	แสดงกระบวนการเพอร์เวปพอร์เรชันในงานวิจัยนี้.....	35
3.4	เยื่อแผ่น PTFE และแผ่นรองรับ PP.....	35
4.1.1	ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์ในเพอมีเอท ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	42
4.1.2	ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวม ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของ สารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	42
4.1.3	ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของอะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ สารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1.4 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	43
4.1.5 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าการเลือกผ่านที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	44
4.1.6 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่า PSI ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	44
4.2.1 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรลีนเพอมีเอท ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	47
4.2.2 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าฟลักซ์รวม ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	47
4.2.3 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าฟลักซ์ของอะซิโตไนโตรลีน ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	48
4.2.4 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	48
4.2.5 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าการเลือกผ่าน ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	49
4.2.6 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่า PSI ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3.1 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรลีในเพอมีเอท ที่อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	52
4.3.2 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวม ที่อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	52
4.3.3 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของอะซิโตไนโตรลี ที่อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	53
4.3.4 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ที่อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	53
4.3.5 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าการเลือกผ่าน ที่อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	54
4.3.6 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่า PSI ที่อัตราการไหล 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	54
4.4.1 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรลีในเพอมีเอท ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	56
4.4.2 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวม ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	57
4.4.3 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของอะซิโตไนโตรลี ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4.4 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	58
4.4.5 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าการเลือกผ่าน ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	58
4.4.6 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่า PSI ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	59
4.5.1 แสดงค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไตรลีนเพอมีเอทของการแยกอะซิโตนในไตรลีนออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	63
4.5.2 แสดงค่าฟลักซ์รวมของการแยกอะซิโตนในไตรลีนออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	63
4.5.3 แสดงค่าฟลักซ์ของอะซิโตนในไตรลีนของการแยกอะซิโตนในไตรลีนออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	64
4.5.4 แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำของการแยกอะซิโตนในไตรลีนออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5.5 แสดงค่าการเลือกผ่านของการแยกอะซิโตไนไทรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	65
4.5.6 แสดงค่า PSI ของการแยกอะซิโตไนไทรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหล 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ.....	65
ก.1 แสดงกราฟมาตรฐานของอะซิโตไนไทรล์.....	74
ก.2 แสดงสภาวะคงตัว (Steady state) ของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน.....	74

รายการสัญลักษณ์

A	:	พื้นที่ของเยื่อแผ่น (m^2)
A_i	:	สัมประสิทธิ์พลาสติกไซซิ่ง (Plasticizing coefficient) แสดงผลของการพองตัวของเยื่อแผ่น
A_p	:	Pre-exponential factor
a	:	ความชันของกราฟมาตรฐาน
a_i	:	แอกทิวิตี (Activity) ของสาร i
b	:	จุดตัดแกน Y ของกราฟมาตรฐาน
C_{if}	:	ความเข้มข้นของสาร i ในสารป้อน
C_{im}	:	ความเข้มข้นของสาร i ในเยื่อแผ่น
c_i	:	ความเข้มข้นของสาร i
C_{if}	:	ความเข้มข้นของสาร i ด้านสารป้อน (vol%)
C_{ip}	:	ความเข้มข้นของสาร i ด้านเพอมีเอท (vol%)
C_{jf}	:	ความเข้มข้นของสาร j ด้านสารป้อน (vol%)
C_{jp}	:	ความเข้มข้นของสาร j ด้านเพอมีเอท (vol%)
C_{wf}	:	ความเข้มข้นของน้ำด้านสารป้อน (vol%)
C_{wp}	:	ความเข้มข้นของน้ำด้านเพอมีเอท (vol%)
D_i	:	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i (m^2/s)
D_{io}	:	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i เมื่อเยื่อแผ่นไม่มีการพองตัว (m^2/s)
Ed	:	พลังงานกระตุ้นของการแพร่
E_p	:	พลังงานกระตุ้นปรากฏของการซึมผ่าน
i	:	องค์ประกอบของสารป้อนที่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีกว่า
J	:	ค่าฟลักซ์รวม ($kg/m^2\ hr$)
J_i	:	ฟลักซ์ของสาร i ($mol/m^2\ s$)
J_j	:	ฟลักซ์ของสารประกอบ j ($mol/m^2\ s$)
j	:	องค์ประกอบของสารป้อนที่ผ่านเยื่อแผ่นได้น้อยกว่า
LOD	:	Limit of Detection
LOQ	:	Limit of Quantitative
L_i	:	สัมประสิทธิ์ (Phenomenological coefficient)
n	:	noise

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

PSI	:	Pervaporation separation index ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ hr}$)
p_i	:	ความดันย่อยของสาร i (Pa)
p_i^{sat}	:	ความดันไออิ่มตัวของสาร
Δp_i	:	ค่าความแตกต่างระหว่างความดันย่อยด้านสารป้อนกับความดันย่อยด้านเพอมีเอท
Q_i	:	ค่า Permeability ของสาร i ($\text{mol m}^2/\text{Pa s}$)
R	:	ค่าคงที่ของก๊าซ ($\text{Pa m}^3/\text{K mol}$)
RSD	:	ร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
S	:	สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient) ของสาร i
SD	:	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
S_i	:	สัมประสิทธิ์การละลายของสาร i ($\text{mol}/\text{m}^3 \text{ Pa}$)
s	:	signal
T	:	อุณหภูมิ (K)
t	:	เวลา (hr)
t_m	:	ความหนาของเยื่อแผ่น (m)
W_p	:	น้ำหนักของเพอมีเอท (kg)
W_{ip}	:	น้ำหนักของสาร i ในเพอมีเอท (kg)
X_i	:	สัดส่วนโมลของสารประกอบ i บริเวณที่ห่างออกไปในสารป้อน
$X_{i,M}$:	สัดส่วนโมลของสารประกอบ i บนผิวเยื่อแผ่น
x	:	ค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรล์ (vol%)
\bar{x}	:	ค่าเฉลี่ย
Y_i	:	สัดส่วนโมลของสารประกอบ i ด้านเพอมีเอท
y	:	Ratio peak area
z	:	ระยะทางการแพร่ในเยื่อแผ่น (m)
δ	:	ความหนาของชั้นขอบเขตความเข้มข้น (m)
α_{ij}	:	ค่าการแยก
γ_i	:	activity coefficient ของสาร i
μ_i	:	ศักย์ภาพเคมี (Chemical potential) ของสาร i
μ_i°	:	ศักย์ภาพเคมีของสาร i ที่ความเข้มข้นอ้างอิง

บทที่ 1

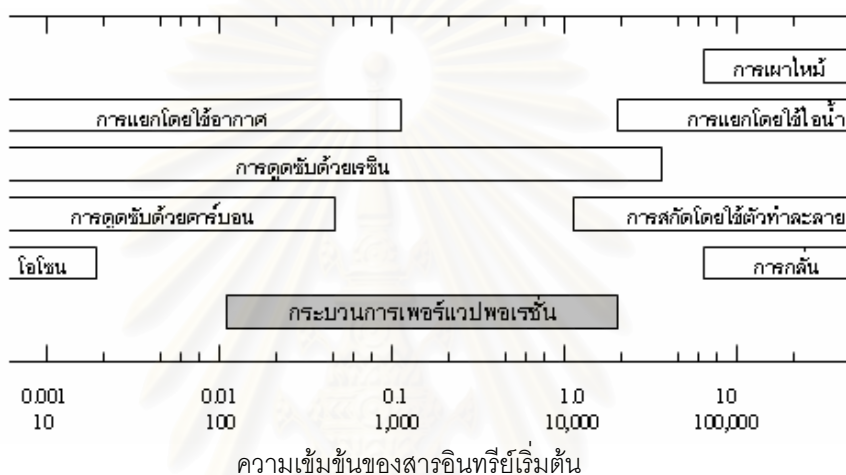
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ถือได้ว่าเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง (Advance instruments) เช่น เครื่อง HPLC (High performance liquid chromatography) เนื่องจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์หลายชนิด โดยจะขึ้นกับประเภทของสารที่ทำการวิเคราะห์ แต่องค์ประกอบหลักที่สำคัญก็คือตัวทำละลาย เช่น อะซิโตไนโตรล (Acetonitrile) หรือเมทานอล (Methanol) ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์เข้าสู่คอลัมน์ของเครื่อง แต่เนื่องจากอะซิโตไนโตรลจะรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ ประกอบกับยังไม่มีวิธีการแยกที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตไนโตรลออกจากน้ำได้ จึงทำให้การแยกอะซิโตไนโตรลออกจากน้ำเสียนั้นเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนด้วยอะซิโตไนโตรลถูกกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี ย่อมจะก่อให้เกิดปัญหาตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้น การพัฒนาการแยกอะซิโตไนโตรลที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดีขึ้นหรือนำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

จากการค้นคว้าวิจัยวิธีการแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลายนั้น ปัจจุบันมีด้วยกันหลายกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมสำหรับการแยกสารอินทรีย์ที่มีปริมาณแตกต่างกัน [1] เช่น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) และการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนและแสงอุลตราไวโอเลต (Ozone and ultraviolet oxidation) จะเป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับการแยกสารอินทรีย์ที่มีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สำหรับการแยกสารอินทรีย์ที่มีปริมาณมากกว่า จะนิยมใช้สกัดโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent extraction) หรือการกลั่น (Distillation) เป็นต้น แต่กระบวนการกลั่นก็จะไม่มีประสิทธิภาพพอ หากสารอินทรีย์ในสารละลายนั้นเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) ที่มีความไวต่อความร้อน และไม่มีความคุ้มทุนหากมีสารอินทรีย์เจือจางอยู่ในสารละลายในปริมาณที่น้อยเกินไป

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีการพัฒนากระบวนการแยกที่มีศักยภาพในการแยกสารอินทรีย์เจือจางออกจากน้ำที่มีต้นทุนและการใช้พลังงานต่ำ นั่นก็คือกระบวนการเพอร์แวก-พอเรชัน (Pervaporation process) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการใช้เยื่อแผ่น (Membrane) และกำลังได้รับความสนใจมากในขณะนี้ เนื่องจากอุปกรณ์ของกระบวนการมีขนาดเล็ก หลักการทำงานไม่ซับซ้อน ไม่ถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และที่สำคัญยังเป็นกระบวนการที่ประหยัดพลังงาน [2,3,4,5] เพราะใช้พลังงานในกระบวนการแยกต่ำกว่ากระบวนการอื่นๆ หลายกระบวนการ



รูปที่ 1.1 กระบวนการทางอุตสาหกรรมสำหรับการแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลาย [6]

การค้นคว้าวิจัยในช่วงแรกของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน จะเป็นการแยกน้ำออกจากตัวทำละลายโดยใช้เยื่อแผ่นแบบชอบน้ำ (Hydrophilic membrane) เช่น การแยกเอทานอล ไอโซโพรพานอล อะซิโตน เป็นต้น และได้ถูกนำมาใช้เพื่อประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง [7] สำหรับการแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำยังไม่ได้รับความสนใจมากนัก แต่ในปัจจุบันการนำกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันมาใช้ในการแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ โดยใช้เยื่อแผ่นแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic membrane) กำลังได้รับความสนใจมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากในด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันร่วมในการบำบัดน้ำเสีย หรือการนำสารอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ (Recovery) ส่วนด้านเทคโนโลยีชีวภาพใช้ในการแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำหมัก (Fermentation broths) รวมทั้งด้านเทคโนโลยีการอาหารก็ใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในการแยกสารหอมระเหย (Aroma compounds) เพื่อนำมาปรุงแต่งในอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น [7, 8]

จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การศึกษาการแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำโดยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน จะเป็นการศึกษาสมรรถนะในการแยกสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ และผลของตัวแปรที่มีต่อสมรรถนะในการแยกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแต่ละงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรเพียงบางประเด็นเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง งานวิจัยที่เกี่ยวกับแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียเพื่อนำสารกลับมาใช้ใหม่หรือเพื่อการบำบัดน้ำเสียนั้นมีน้อยมาก จากเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้เกิดเป็นแนวทางศึกษาและเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันมาใช้แยกสารอินทรีย์เจือจางออกจากน้ำ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียและนำสารอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของสารป้อน ความดันด้านเพอมีเอท คุณสมบัติของสารป้อน และอัตราการไหลของสารป้อน ที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในการแยกอะซิโตไนไตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนไตรล์

2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในการแยกอะซิโตไนไตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนไตรล์ และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยสร้างโมเดลของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน
2. ศึกษาสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoro ethylene, PTFE) ชนิดแผ่นเรียบ โดยมีพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นตัวรองรับ ในการแยกอะซิโตไนไตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนไตรล์และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC

3. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

3.1 ความเข้มข้นของสารป้อนในช่วงร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร

3.2 ความดันด้านเพอมีเททในช่วง 10-40 มิลลิเมตรปรอท

3.3 อุณหภูมิของสารป้อนในช่วง 25-50 องศาเซลเซียส

3.4 อัตราการไหลของสารป้อนในช่วง 6-20 มิลลิลิตรต่ออนาที

4. เปรียบเทียบสมรรถนะการแยกอะซิโตไนไทรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนไทรล์ และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC

5. หาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตไนไทรล์ออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันในการแยกอะซิโตไนไทรล์ออกจากสารละลายเจือจาง

2. เป็นทางเลือกหนึ่งในการนำกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน มาประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสียหรือแยกอะซิโตไนไทรล์ในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

3. เป็นแนวทางในการนำกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันมาใช้ในการแยกสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้เยื่อแผ่นในกระบวนการแยกได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการผลิตเยื่อแผ่นได้มีการพัฒนาเยื่อแผ่นให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในแต่ละอุตสาหกรรม ซึ่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่หลายประเภทได้ใช้กระบวนการเยื่อแผ่นแทนที่กระบวนการแยกที่มีอยู่เดิม เช่น กระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน ซึ่งได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้ในกระบวนการแยกน้ำออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เอทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันนั้นสามารถแยกน้ำออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี และเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ประหยัดพลังงาน มีประสิทธิภาพและไม่มีความซับซ้อนของเครื่องมือ จึงทำให้กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันนี้ ถูกนำมาใช้แทนกระบวนการกลั่นซึ่งเป็นวิธีการแยกเดิมที่สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า

2.1 ความเป็นมาของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

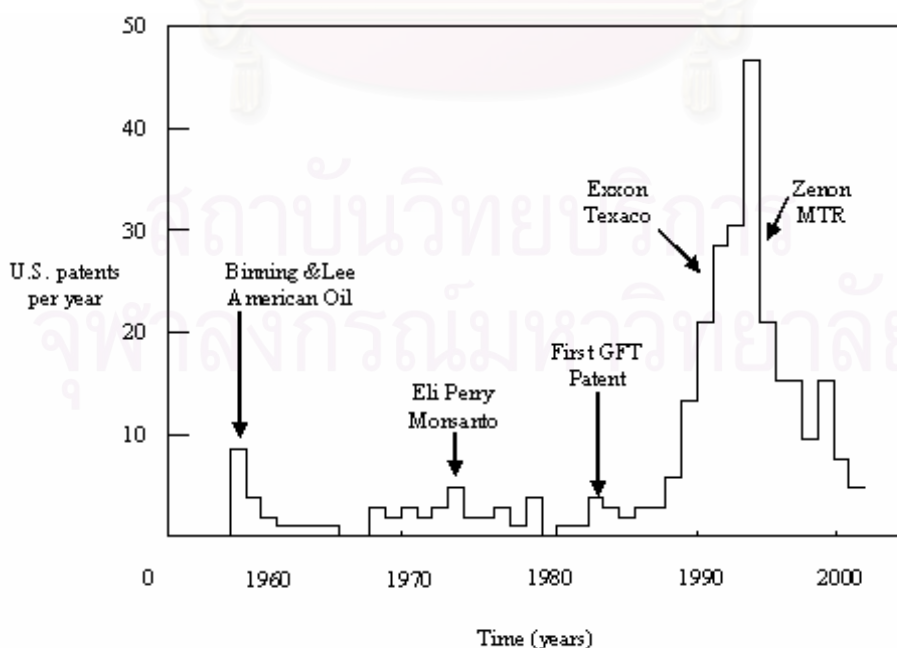
การพัฒนากระบวนการเพอร์เวปพอเรชันตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนั้นสามารถดูได้จากสิทธิบัตรของประเทศสหรัฐอเมริกาที่เกี่ยวข้องในแต่ละปี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เริ่มจากในปี 1960 จะเห็นได้ว่าปริมาณของสิทธิบัตรนั้นยังมีปริมาณน้อยมาก ซึ่งการศึกษากระบวนการเพอร์เวปพอเรชันได้เริ่มต้นอย่างเป็นทางการเป็นระบบโดย Heisler, Binning และ James จากบริษัท American Oil Company (Amoco) ได้ทำการวิจัยแยกน้ำออกจากไอโซโพรพานอลกับเอทานอลจากส่วนบนสุดของหอกลั่น ซึ่งในขณะนั้นยังได้ผลไม่ค่อยดีมากนัก เนื่องจากเทคโนโลยีการใช้เยื่อแผ่นยังไม่ได้มีการพัฒนาเท่าที่ควร จึงทำให้เกิดความสนใจในการพัฒนากระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นประเภทอื่นๆ เช่น รีเวิร์สออสโมซิส และ อัลตราฟิลเตรชัน เป็นต้น

จากวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานในปี 1970 ทำให้กระบวนการแยกที่มีศักยภาพสูงและประหยัดพลังงานกลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง จึงส่งผลให้กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในแถบยุโรปพบว่ากระบวนการเพอร์เวปพอเรชันสามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ จึงทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อแผ่นเพื่อนำมาใช้กับทั้งกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน รีเวิร์สออสโมซิส และ ก๊าซเพอเมมเมชัน เนื่องจากเหตุผลทางด้านพลังงาน

ในปี 1980 บริษัท GFT ในเยอรมันตะวันตกใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในการแยกน้ำออกจากเอทานอลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล และในอุตสาหกรรมน้ำตาลของประเทศบราซิลและฟิลิปปินส์ได้ใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันร่วมในการผลิต โดยเอทานอลที่ได้จากหมักจะมีความเข้มข้นเท่ากับ 5-7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อผ่านกระบวนการกลั่นจะได้เอทานอลเพิ่มขึ้นเป็น 80-85 เปอร์เซ็นต์ และด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันจะสามารถให้เอทานอลได้สูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์

ในปี 1990 กลุ่มบริษัท Exxon ได้ทำการพัฒนาเยื่อแผ่นเพื่อนำมาใช้ในการแยกของผสมระหว่างอะโรมาติกและอะริฟาติกที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน โดยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันสามารถให้ค่าการแยกสูงถึง 10 ในการแยกโทลูอีนและเอ็น-ออกเทน จึงทำให้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันนี้ถูกพัฒนาต่อไปเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงกลางถึงปลายทศวรรษ งานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นศึกษาความสามารถในการแยกสารอินทรีย์ของเยื่อแผ่นต่างๆ เพื่อเป้าหมายหลักได้แก่ การนำสารอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต และการแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียในกระบวนการผลิต

ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนากระบวนการเพอร์แวกพอเรชันได้เป็นไปอย่างต่อเนื่องและแพร่หลายไปทั่วโลก การใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในระดับอุตสาหกรรมนั้นเป็นไปอย่างกว้างขวางภายใต้การนำของบริษัท GFT ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงรายชื่อของ 7 บริษัทที่ใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในระดับอุตสาหกรรม



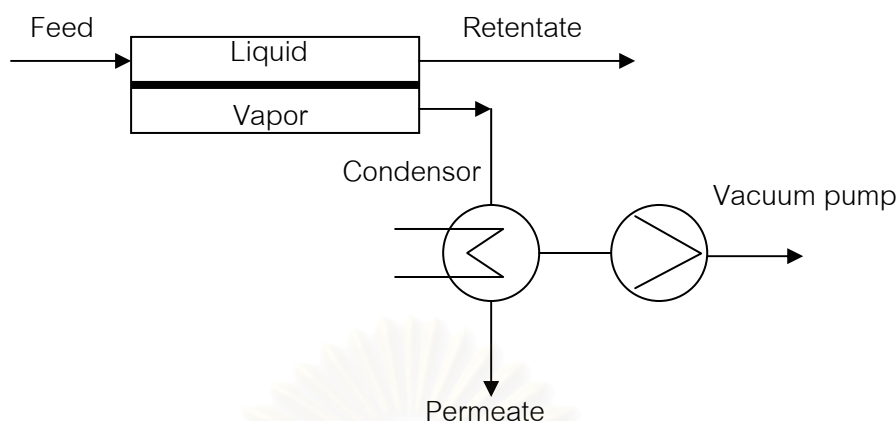
รูปที่ 2.1 สิทธิบัตรของ USA ที่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน ตั้งแต่ปี 1960-ปัจจุบัน [9]

ตารางที่ 2.1 บริษัทที่ใช้กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันในระดับอุตสาหกรรม [10]

Organization	Primary application	Module configuration	Membrane material
GFT	Dehydration of liquid organics	Plate and frame	Poly(vinyl alcohol) composites
MRT	Organic recovery from wastewaters	Spiral wound	Silicone rubber
Lurgi	Dehydration of liquid organics	Plate and frame	Poly(vinyl alcohol) composites
	Dehydration of vapors	Plate and frame	Poly(vinyl alcohol) composites
Tokuyama Soda	Dehydration of isopropanal	Hollow-fiber	Chitosan
Kalsep	Dehydration of liquid organics	Tubular	Ion exchange composites
Hoechst Celanese	MeOH/MTBE	Spiral wound	Cellulose acetates
Mitsui	Dehydration of liquid organics	Plate and frame	Poly(vinyl alcohol) composites

2.2 คำจำกัดความ

“Pervaporation” (PV) มาจากคำว่า “Permeation” กับ “Evaporation” ซึ่งหมายถึงการส่งผ่านและการระเหยตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันจึงเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบหนึ่งๆ ในสารละลายผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous membrane) โดยมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสาร ซึ่งสารละลายด้านสารป้อนจะอยู่ในรูปของของเหลวและองค์ประกอบที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ที่เรียกว่า “เพอมีเอท” จะอยู่ในรูปของไอ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการให้ความร้อนแก่สารละลายป้อนพร้อมกับลดความดันด้านเพอมีเอทโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ทำให้ความดันย่อยของสารด้านเพอมีเอทต่ำกว่าความดันไอของสาร ณ อุณหภูมินั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงกลไกของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

2.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันในอุตสาหกรรม

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการผลิตเยื่อแผ่นได้ส่งผลให้กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันได้รับการพัฒนาจนกลายเป็นอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท ได้แก่

2.3.1 การแยกน้ำออกจากตัวทำละลาย (Dehydration of organic solvent)

เป็นการทำให้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ซึ่งนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมของผสมประเภทอะซิโโทรป เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายแอลกอฮอล์เพื่อผลิตแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ แต่เดิมกระบวนการแยกจะใช้วิธีการกลั่น ซึ่งใช้พลังงานในการแยกสูงประกอบกับจะต้องมีการเติมสารที่ทำให้สมดุลเปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากแอลกอฮอล์และน้ำมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกัน โดยสารที่ใช้เติมก็คือ เบนซิน แต่เบนซินมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จึงได้มีการนำกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันมาใช้ในการแยกน้ำออกจากตัวทำละลาย เนื่องจากพลังงานที่ใช้ต่ำกว่ากระบวนการกลั่น เพราะการกลั่นจะต้องทำให้สารป้อนทั้งหมดกลายเป็นไอ แต่ในกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันจะมีเฉพาะส่วนของเพอมีเอทเท่านั้นที่กลายเป็นไอ และการติดตั้งอุปกรณ์ก็ใช้พื้นที่น้อยกว่าหอกกลั่น รวมทั้งไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งตัวอย่างการเปรียบเทียบ ค่าใช้จ่ายในแต่ละเทคนิคของการแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอลกอฮอล์จาก 99.4 เปอร์เซ็นต์ เป็น 99.9 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคต่างๆ [11]

Utility	Techniques		
	Pervaporation (\$/ton)	Entrainer distillation (\$/ton)	Molecular sieve adsorption (\$/ton)
1. Vapor	12.80	120.00	80.00
2. Electricity	17.60	8.00	5.20
3. Cooling water	4.00	15.00	10.00
4. Entrainer	-	9.60	-
5. Replacement of membranes and molecular sieve	30.60	-	50.00
Total costs	64.00	152.60	145.20

นอกจากนี้กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันยังถูกนำมาใช้กับการแยกตัวทำละลายชนิดอื่นๆ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายในระดับอุตสาหกรรม

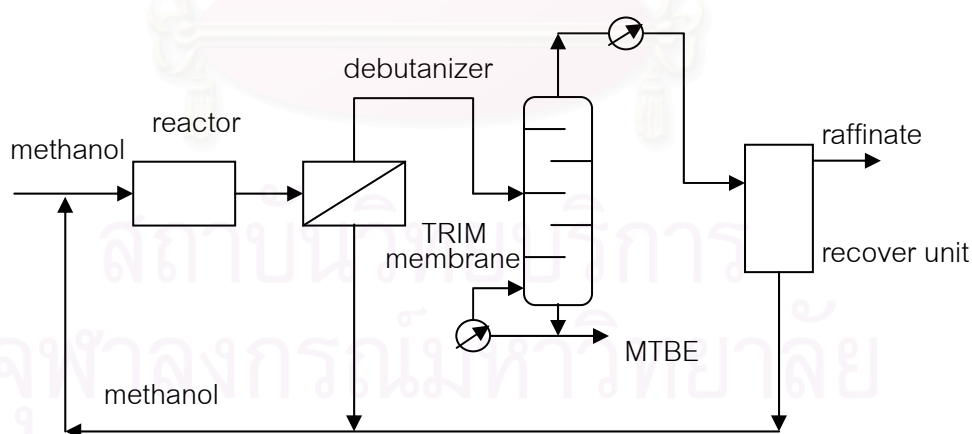
Solvent	Water content	
	Feed(%)	Product (ppm.)
1-Butanol	8.4	135
n-Butanol	5.4	800
t-Butanol	10.4	581
THF	0.4	220
Xylene	0.1	140
Methanol	7.1	1,650
Methanol/IPA	0.21	300
Carpolactam	10.3	671
Ethanol/IPA	0.6	610
Ethanol/Methanol	2.9	780
Ethanol/Benzene	14.1	320

ตารางที่ 2.3 การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายในระดับอุตสาหกรรม (ต่อ)

Allyl alcohol	4.85	620
Trichelene	0.01	8
MEK	3.8	220
Methyl Chloride	0.2	140
Ethyl Chloride	0.22	10
Chloroethane	0.0617	12

2.3.2 การแยกสารอินทรีย์ผสม (Organics/Organic separation)

การแยกสารอินทรีย์ผสมนั้น เยื่อแผ่นที่จะสามารถนำมาใช้ในการแยกสารอินทรีย์ผสมได้จะต้องมีความเจาะจงในการเลือกผ่านสารใดสารหนึ่งเป็นอย่างมาก (High selectivity) และจะต้องมีการออกแบบระบบเป็นอย่างดีเพื่อให้มีความเหมาะสมกับสารที่ต้องการจะแยก โดยตัวอย่างของสารอินทรีย์ผสมที่ใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในการแยกสาร ได้แก่ Methanol/methyl t-butyl ether ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในการแยกสารจำพวกอะโรมาติก-อัลแคน อะโรมาติก-แนพทีน เป็นต้น

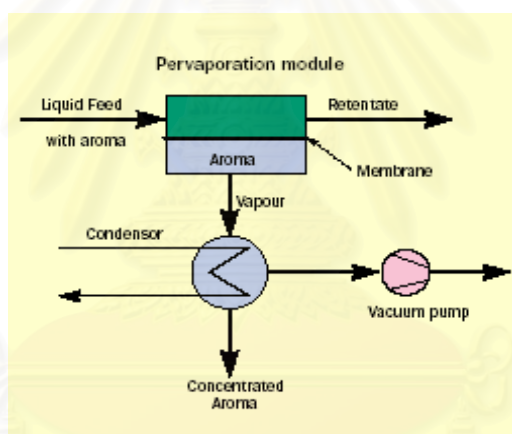


รูปที่ 2.3 กระบวนการแยก Methanol/methyl t-butyl ether [12]

2.3.3 การแยกตัวทำละลายออกจากน้ำ

กระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่นมักนำมาใช้ในการแยกตัวทำละลายอินทรีย์ออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังสามารถนำตัวทำละลายนั้นกลับมาใช้ได้ อีก เช่น การแยกสารละลายน้ำกับแอลกอฮอล์โมเลกุลต่ำๆ เช่น เมทานอล เอทานอล และโพรพานอล หรือไดคลอโรอีเทน เป็นต้น

นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรได้ประยุกต์ใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่น ในการแยกสารหอมระเหยจากผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากการระเหยจะทำให้สารที่ให้กลิ่นระเหยไปหมด ดังนั้นจึงควรสกัดสารหอมระเหยก่อนแล้วค่อยทำการเติมกลับภายหลังการแปรรูป ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งกระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่นจะสามารถสกัดสารหอมระเหยได้เป็นอย่างดี เช่น การสกัดสารหอมระเหยในแอปเปิล [13]

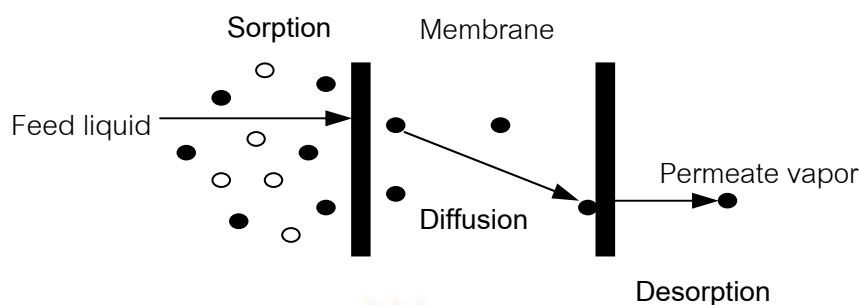


รูปที่ 2.4 การแยกสารหอมระเหยด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่น

2.4 กลไกการถ่ายเทมวลของสารผ่านเยื่อแผ่น

กลไกพื้นฐานของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่น คือ การถ่ายเทมวลของสารหนึ่งๆผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุน ซึ่งแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายกลไกนี้ก็คือ แบบจำลองการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion model) ซึ่งกล่าวว่าการผ่านเยื่อแผ่นของสารหนึ่งๆ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 2.5

1. การละลายหรือการดูดซับของสารเข้าสู่เยื่อแผ่น (Sorption)
2. การแพร่ของสารผ่านเยื่อแผ่น (Diffusion)
3. การปล่อยออก (Desorption) หรือการระเหยของสารในรูปของไอทางด้านเพอมีเอท



รูปที่ 2.5 แสดงกลไก Solution-diffusion [14]

1. การละลายหรือการดูดซับของสารเข้าสู่เยื่อแผ่น (Sorption)

ในกระบวนการเพอร์เมปพรेशन การดูดซับและการแพร่ถือว่าป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อการแยกและเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกลไกการถ่ายเทมวล ซึ่งการดูดซับโดยเยื่อแผ่นเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิด Interaction ระหว่างสารที่ต้องการแยกกับเยื่อแผ่น ส่งผลให้สารเคลื่อนที่เข้าสู่เยื่อแผ่น ซึ่ง Interaction ดังกล่าวอาจขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ แรงกระทำระหว่างโมเลกุล ผลจากความเกะกะหรือบดบัง (Steric effect) และค่าแอกทิวิตี (Activity) ของสารที่ต้องการจะแยก เป็นต้น

การดูดซับของสารเข้าสู่เยื่อแผ่นสามารถแสดงได้ด้วยสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient) [15] กล่าวคือ ที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นด้านสารป้อน ของเหลวในเยื่อแผ่นจะสมดุลกับของเหลวในสารป้อน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารในเยื่อแผ่นและในสารป้อนที่สัมผัสกับเยื่อแผ่นแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$S = \frac{C_{im}}{C_{if}} \quad (2.1)$$

เมื่อ S = สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient) ของสาร i
 C_{im} = ความเข้มข้นของสาร i ในเยื่อแผ่น
 C_{if} = ความเข้มข้นของสาร i ในสารป้อน

สัมประสิทธิ์การกระจายขึ้นอยู่กับแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารกับโมเลกุลของเยื่อแผ่น ซึ่งสารใดที่มีแรงกระทำกับพอลิเมอร์ของเยื่อแผ่นสูงกว่าก็จะถูกดูดซับได้ดีกว่า

ค่าแอกทิวิตีของสารที่ต้องการแยกในสารป้อนมีผลต่อการดูดซับโดยเยื่อแผ่นเช่นเดียวกัน [16] ค่าแอกทิวิตีของสารจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความดันย่อยกับความดันไออิ่มตัวของสารชนิดเดียว ซึ่งจากกฎของ Raoult สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอกทิวิตีกับความดันย่อยได้ดังสมการที่ 2.2

$$a_i = \frac{p_i}{p_i^{sat}} \quad (2.2)$$

เมื่อ a_i = แอกทิวิตี (Activity) ของสาร i
 p_i = ความดันย่อยของสาร i (Pa)
 p_i^{sat} = ความดันไออิ่มตัวของสาร i

กล่าวคือ เมื่อความดันไอของสารเพิ่มขึ้นค่าแอกทิวิตีของสารจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 เมื่อความดันย่อยมีค่าเท่ากับความดันไออิ่มตัวของสารชนิดเดียวกัน ซึ่งสารที่มีค่าแอกทิวิตีสูงจะถูกดูดซับโดยเยื่อแผ่นได้ดีกว่าสารที่มีค่าแอกทิวิตีต่ำ เนื่องจากสารที่มีค่าแอกทิวิตีสูงโมเลกุลของสารจะมีพลังงานจลน์สูง ซึ่งช่วยเพิ่มความว่องไวในการเกิด interaction

2. การแพร่ของสารผ่านเยื่อแผ่น (Diffusion)

การแพร่ของสารผ่านเยื่อแผ่นสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคส์ (Fick law) ดังนี้

$$J_i = -L_i \frac{d\mu_i}{dz} \quad (2.3)$$

เมื่อ i คือสารที่ผ่านเยื่อแผ่นได้
 J_i = ฟลักซ์ของสาร i (mol/m²s)
 L_i = สัมประสิทธิ์ (Phenomenological coefficient)
 μ_i = ศักยภาพเคมี (Chemical potential) ของสาร i
 z = ระยะทางการแพร่ในเยื่อแผ่น (m)

และศักย์ภาพเคมีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$\mu_i = \mu_i^o + RT \ln a_i \quad (2.4)$$

เมื่อ μ_i^o = ศักย์ภาพเคมีของสาร i ที่ความเข้มข้นเจือจาง
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ ($\text{Pa m}^3/\text{K mol}$)
 T = อุณหภูมิ (K)

แทนค่า 2.2 และ 2.4 ในสมการ 2.3 จะได้

$$J_i = \frac{L_i RT}{p_i^{sat}} \frac{dp_i}{dz} \quad (2.5)$$

สำหรับค่า $\frac{L_i RT}{p_i^{sat}} \frac{dp_i}{dz}$ เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการซึมผ่านเยื่อแผ่น โดยทั่วไป จะเขียนอยู่รูปของค่า Permeability, (Q) ดังสมการที่ 2.6

$$J_i = \frac{Q_i \Delta p_i}{t_m} \quad (2.6)$$

เมื่อ Δp_i = ค่าความแตกต่างระหว่างความดันย่อยด้านสารป้อนกับ
 ความดันย่อยด้านเพอมีเอท
 Q_i = ค่า Permeability ของสาร i ($\text{mol m/m}^2 \text{ Pa s}$)
 t_m = ความหนาของเยื่อแผ่น (m)

สมการ 2.6 คือสมการพื้นฐานสำหรับกระบวนการเยื่อแผ่นโดยเฉพาะสำหรับระบบที่มีสารอยู่ในสภาวะก๊าซ และค่าความสามารถในการซึมผ่านของสาร i (Q_i) ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i ผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับของสาร i บนเยื่อแผ่น [17, 18] แสดงได้ดังสมการ 2.7

$$Q_i = f^n [D_i(c_i), S_i(c_i)] \quad (2.7)$$

เมื่อ	D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i (m^2/s)
	S_i	=	สัมประสิทธิ์การละลายของสาร i ($mol/m^3 Pa$)
	c_i	=	ความเข้มข้นของสาร i

สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ซึ่งนิยมเขียนสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_i กับ c_i ในรูปของสมการ Exponential ดังนี้

$$D_i = D_{i0} \exp(A_i c_i) \quad (2.8)$$

เมื่อ	D_{i0}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i เมื่อเยื่อแผ่นไม่มีการพองตัว (m^2/s)
	A_i	=	สัมประสิทธิ์พลาสติกไซซิง (Plasticizing coefficient) แสดงผลของการพองตัวของเยื่อแผ่น

สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังนี้

$$D_i = D_{i0} \exp(-E_d / RT) \quad (2.9)$$

เมื่อ	E_d	=	พลังงานกระตุ้นของการแพร่
-------	-------	---	--------------------------

ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน มีผลทำให้เกิดการเลือกผ่านเยื่อแผ่นได้ สารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้เร็วกว่าสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารผ่านเยื่อแผ่นนี้อาจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลของสาร โดยทั่วไปสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือมีรูปร่างเล็กกว่าจะแพร่ได้เร็วกว่า [19]

3. การระเหยของสารในรูปของไอทางด้านเพอมีเอท (Desorption)

เมื่อโมเลกุลของสารที่ต้องการแยกแพร่ผ่านเยื่อแผ่นจนถึงผิวของเยื่อแผ่นด้านเพอมีเอทจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอเนื่องจากการลดความดันทางด้านเพอมีเอทลง เพื่อลดจุดเดือดของสารให้ต่ำลงทำให้สารกลายเป็นไอได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเร็วมากเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่นๆ การถ่ายเทสารข้ามผิวระหว่างเฟสสามารถเขียนในรูปของความดันย่อยด้วยกฎของราอูลท์ (Raoult law) ได้ดังสมการที่ 2.10

$$p_i = p_i^{sat} \gamma_i c_{im} \quad (2.10)$$

เมื่อ γ_i = activity coefficient ของสาร i

ลักษณะเด่นประการหนึ่งของการแยกด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันคือ การพองตัวของเยื่อแผ่น (Swelling) โดยบริเวณผิวสัมผัสกับสารป้อนจะเกิดการพองตัวมากที่สุดและค่อยๆ ลดลงตามความหนาของเยื่อแผ่น จนกระทั่งไม่มีการพองตัวเลยที่ผิวสัมผัสด้านเพอมีเอทเนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ การพองตัวของเยื่อแผ่นเกิดขึ้นในขั้นตอนของการละลายหรือการดูดซับของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน เนื่องจากเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารกับเยื่อแผ่นจนทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป

การเกิดแรงกระทำหรือ Interaction ระหว่างโมเลกุลของสารกับเยื่อแผ่นที่ทำให้คุณสมบัติของเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงไป เรียกว่า Plasticizing effect โดยปกติแล้วการเกิด Plasticizing effect หรือการพองตัวของเยื่อแผ่นจะมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในเยื่อแผ่นสูงขึ้น เนื่องจากการพองตัวของเยื่อแผ่นทำให้มีช่องว่างในการแพร่มากขึ้น เยื่อแผ่นจะอึดตัวไปด้วยสารที่เป็นของเหลว เพราะการแพร่ของสารผ่านของเหลวจะเร็วกว่าการผ่านของแข็ง (เยื่อแผ่นพอลิเมอร์) ดังนั้น การที่เยื่อแผ่นเกิดการพองตัวจะมีผลทำให้การแพร่ของสารในเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงไปด้วย

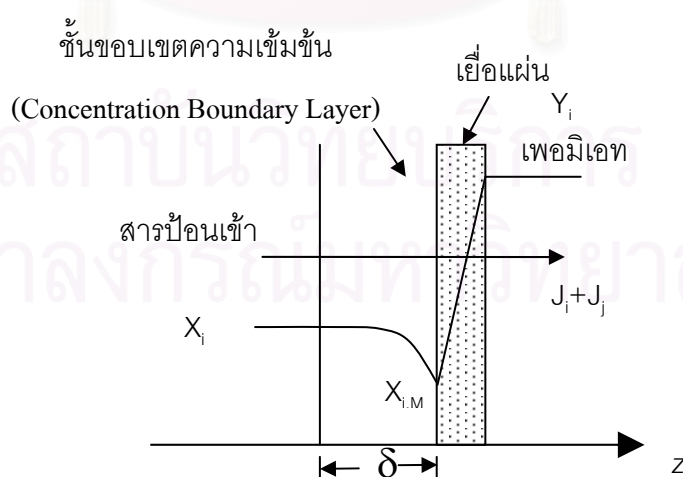
ในกระบวนการ PV ของเหลวผสม 2 องค์ประกอบ องค์ประกอบ j ที่เพิ่มเข้ามาย่อมจะมีผลกระทบต่อทั้งค่าการดูดซับและการแพร่ขององค์ประกอบ i ในแง่ของการดูดซับมักจะทำให้การละลายขององค์ประกอบ i ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบ j จะไปบดบังและแย่งพื้นที่ในการดูดซับขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่น ส่วนในแง่ของการแพร่จะเกิดผล 2 ทาง คือ

1. Plasticizing effect จะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i เพิ่มขึ้น ถ้าองค์ประกอบ j เป็นสารที่ทำให้เยื่อแผ่นพองตัว ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2. Coupling effects ซึ่งหมายถึงการเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุล i และ j ในเยื่อแผ่น โดยอาจเป็นเหตุผลทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของ i เพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ทั้งนี้การเกิด Coupling จะทำให้โมเลกุลใหญ่ขึ้น โมเลกุลที่เกิด Coupling จึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้ช้าลง แต่ในเยื่อแผ่นที่มีการพองตัวสูงจะมีช่องว่างใหญ่พอที่โมเลกุลที่เกิด Coupling แพร่ผ่านได้ กรณีเช่นนี้จะทำให้การแพร่โมเลกุล i เพิ่มขึ้น (แม้ว่าแพร่ได้ช้าลง แต่การแพร่จะแพร่ทั้งโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลที่เกิด Coupling)

2.5 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration polarization, CP)

สำหรับกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเป็นการสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้เกิดเป็นชั้นขอบเขตความเข้มข้น (Concentration boundary layer) ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันจะทำให้ความเข้มข้นของสารที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดี (สาร i) ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นมีความเข้มข้นต่ำกว่าบริเวณที่ห่างออกไป (Bulk solution) ทำให้สมรรถนะของกระบวนการแยกลดลง เนื่องจากเยื่อแผ่นดูดซับสาร i ได้น้อยลง และการคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันของสารจะเกิดขึ้นได้มากน้อยแตกต่างกัน พิจารณาได้จากสารที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้น้อยจะมีชั้นขอบเขตความเข้มข้นกว้างกว่าสารที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้มาก



รูปที่ 2.6 การเกิด CP ในกระบวนการเพอร์เมปอเรชัน [20]

- เมื่อ $X_{i,M}, X_i$ = สัดส่วนโมลของสารประกอบ i บนผิวเยื่อแผ่น และบริเวณที่ห่างออกไปในสารป้อนตามลำดับ
- Y_i = สัดส่วนโมลของสารประกอบ i ด้านเพอมีเอท
- δ = ความหนาของชั้นขอบเขตความเข้มข้น (m)
- z = ระยะทางในทิศทางการแพร่ (m)
- J_i = ฟลักซ์ของสารประกอบ i ($\text{mol/m}^2\text{s}$)
- J_j = ฟลักซ์ของสารประกอบ j ($\text{mol/m}^2\text{s}$)

จากงานวิจัยบางงานรายงานว่า การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันไม่น่ามีผลต่อการแยกด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน เช่น งานวิจัยของ Pasume และคณะ [20] ซึ่งศึกษาการแยกของผสมไตรคลอโรเอทีดีน-น้ำด้วยเยื่อแผ่นซิลิโคนรับเบอร์ด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน แต่จากการศึกษาการแยกของผสมพีนอลกับน้ำโดยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน โดย Feng และ Huang [2] พบว่า การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันไม่น่ามีผลต่อกระบวนการแยกแต่อย่างใด เนื่องจากความต้านทานที่เกิดจากชั้นขอบเขตความเข้มข้นมีค่าน้อยมาก

2.6 การประเมินสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน

การประเมินสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน สามารถประเมินได้จากค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่าน ซึ่งจะแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

2.6.1 ฟลักซ์รวม (Total flux)

ค่าฟลักซ์รวมจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของสารที่ผ่านเยื่อแผ่นได้ ต่อพื้นที่ของเยื่อแผ่นต่อเวลา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.11

$$J = \frac{W_p}{(A * t)} \quad (2.11)$$

- เมื่อ J = ค่าฟลักซ์รวม ($\text{kg/m}^2 \text{hr}$)
- W_p = น้ำหนักของเพอมีเอท (kg)
- A = พื้นที่ของเยื่อแผ่น (m^2)
- t = เวลา (hr)

2.6.2 การเลือกผ่าน (Selectivity)

ความสามารถในการการเลือกผ่านของกระบวนการเพอร์แวกพอร์เรชันสามารถพิจารณาได้จากค่าการเลือกผ่าน (Selection factor, α) ซึ่งค่าการแยกคำนวณได้จากส่วนประกอบของสารด้านสารป้อนและสารด้านเพอมีเอท ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.12

$$(\alpha_{ij}) = \frac{(c_{ip} / c_{jp})}{(c_{if} / c_{jf})} \quad (2.12)$$

เมื่อ	i	=	องค์ประกอบของสารป้อนที่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีกว่า
	j	=	องค์ประกอบของสารป้อนที่ผ่านเยื่อแผ่นได้น้อยกว่า
	α_{ij}	=	ค่าการเลือกผ่าน
	c_{ip}	=	ความเข้มข้นของสาร i ด้านเพอมีเอท (vol%)
	c_{jp}	=	ความเข้มข้นของสาร j ด้านเพอมีเอท (vol%)
	c_{if}	=	ความเข้มข้นของสาร i ด้านสารป้อน (vol%)
	c_{jf}	=	ความเข้มข้นของสาร j ด้านสารป้อน (vol%)

จากสมการที่ 2.11 สำหรับสารละลายเจือจาง (น้ำ-สาร i) อาจเขียนได้เป็น

$$(\alpha_{iw}) = \frac{(c_{ip} / c_{wp})}{(c_{if} / c_{wf})} \quad (2.13)$$

เมื่อ	c_{wp}	=	ความเข้มข้นของน้ำด้านเพอมีเอท (vol%)
	c_{wf}	=	ความเข้มข้นของน้ำด้านสารป้อน (vol%)

ประสิทธิภาพในการแยกสารโดยเยื่อแผ่นนั้นสามารถดูได้จากค่าการเลือกผ่าน หากค่าการเลือกผ่านมีค่ามากกว่าหนึ่ง ($\alpha_{ij} > 1$) แสดงว่า เยื่อแผ่นที่ใช้มีประสิทธิภาพในการแยกสารได้ดี เนื่องจากความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทมีค่าสูงกว่าทางด้านสารป้อน ในทางกลับกัน หากค่าการเลือกผ่านมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ($\alpha_{ij} < 1$) แสดงว่าความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทมีค่าน้อยกว่าด้านสารป้อน แต่ถ้าค่าการเลือกผ่านมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\alpha_{ij} = 1$) แสดงว่าเยื่อแผ่นนั้นไม่มีประสิทธิภาพในการแยกสารได้เลย

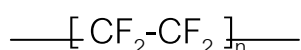
โดยทั่วไปค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านจะแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อค่าใดค่าหนึ่งมีค่าสูง อีกค่าหนึ่งจะมีค่าลดลง ทำให้การประเมินสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันทำได้ยาก ดังนั้น จึงได้มีการกำหนดดัชนีการแยกขึ้นมาค่าหนึ่ง เพื่อให้สามารถประเมินสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2.14

$$PSI = J * (\alpha_{ij} - 1) \quad (2.14)$$

เมื่อ $PSI =$ Pervaporation separation index (kg/ m² hr)

2.7 ชนิดของเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

ชนิดของเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ เยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำ (Hydrophillic membrane) เยื่อแผ่นชนิดนี้ผลิตมาจากพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายแก้ว นิยมใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายอินทรีย์ เช่น เยื่อแผ่นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) โดยที่เยื่อแผ่นชนิดนี้จะเลือกดูดซับและแพร่ผ่านน้ำไปสู่อีกด้านของเยื่อแผ่นมากกว่าสารอื่น ส่วนเยื่อแผ่นอีกหนึ่งชนิดคือเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic membrane) เยื่อแผ่นชนิดนี้ผลิตมาจากพอลิเมอร์พวกลายที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น บิวทาไดอีนรับเบอร์ (Butadiene rubber) สไตรีน บิวทาไดอีน รับเบอร์ (Styrene butadiene rubber) โดยเยื่อแผ่นชนิดนี้เลือกดูดซับและแพร่ผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ ทำให้สามารถแยกสารอินทรีย์ออกจากของสารละลายได้ เช่น เยื่อแผ่นยางซิลิโคน เยื่อแผ่นพอลิไดเมทิล ซิล็อกเซน (Polydimethyl siloxane, PDMS) เป็นต้น นอกจากนี้ก็ยังมีเยื่อแผ่นอีกชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลายได้ นั่นก็คือ เยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน หรือเทฟลอน (Teflon) เนื่องจากมีค่าแรงตึงผิวต่ำ (ประมาณ 18 dyne/cm) จึงทำให้มีพฤติกรรมยอมให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีกว่าโมเลกุลของน้ำ (น้ำมีค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 73 dyne/cm) มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและมีความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายต่างๆ ซึ่งเยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีนมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงสูตรโครงสร้างของพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการแยกด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน มิได้มีเพียงชนิดของเยื่อแผ่นเท่านั้น แต่ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอีกดังต่อไปนี้

2.8.1 ความเข้มข้นของสารป้อน

ความเข้มข้นของสารป้อนในที่นี้หมายถึง ความเข้มข้นของสาร i ที่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีกว่าสารอื่นๆ โดยค่าความเข้มข้นจะสัมพันธ์กับค่าเพอเมอทิฟลักซ์ กล่าวคือ จากแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ความเข้มข้นจะมีผลโดยตรงต่อการละลายหรือดูดซับที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นด้านสารป้อน เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อน จะส่งผลให้เยื่อแผ่นดูดซับโมเลกุลของสารได้มาก เป็นผลให้แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวลของระบบเพอร์เวปพอเรชันมีค่ามากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอเมอทิฟลักซ์เพิ่มขึ้น [21] นอกจากนี้แล้ว การเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนจะทำให้ค่าแอสคิวิตีของสารเพิ่มขึ้นด้วย และทำให้เกิด Plasticizing effect ได้มากขึ้น ซึ่งจะมีผลให้เยื่อแผ่นเกิดการพองตัว

2.8.2 ความดันด้านเพอเมอทิฟ

ในกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันมีการลดความดันด้านเพอเมอทิฟจนต่ำกว่าความดันไอของสารที่ผ่านเยื่อแผ่น (ณ อุณหภูมินั้นๆ) ทำให้สารที่ผ่านเยื่อแผ่นสามารถกลายเป็นไอได้ง่าย ความดันด้านเพอเมอทิฟมีผลต่อค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านดังนี้คือ เมื่อความดันด้านเพอเมอทิฟลดลงจะทำให้ค่าฟลักซ์ของสารมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความดันไอสมมูลด้านสารป้อนกับด้านเพอเมอทิฟมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้กับระบบ [22] สำหรับค่าการแยกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันด้านเพอเมอทิฟลดลง เนื่องจากเมื่อลดความดันด้านเพอเมอทิฟ สารที่ต้องการจะแยกจะผ่านเยื่อแผ่นได้ดีขึ้น เป็นผลให้ความเข้มข้นของสารด้านเพอเมอทิฟสูงขึ้น ค่าการเลือกผ่านจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

2.8.3 อุณหภูมิ

ในที่นี้หมายถึง อุณหภูมิของสารป้อน เนื่องจากการกลายเป็นไอของสารที่ผ่านเยื่อแผ่นทางด้านเพอเมอทิฟต้องใช้ความร้อนในการระเหย ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงมีการให้ความร้อนแก่สารป้อน ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อทุกขั้นตอนการถ่ายเทมวลในกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

โดยช่วยเพิ่มการดูดซับและสัมประสิทธิ์การแพร่ ทำให้เยื่อแผ่นดูดซับสารที่ต้องการแยกได้มากขึ้น รวมทั้งสามารถแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้เร็วขึ้นด้วย เมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นก็มีผลทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับอุณหภูมิได้ในรูปแบบอาร์เรเนียสได้ดังนี้

$$J = A_p \exp(E_p / RT) \quad (2.15)$$

เมื่อ A_p = Pre-exponential factor
 E_p = พลังงานกระตุ้นปรากฏของการซึมผ่าน (เป็นผลรวมของพลังงานกระตุ้นปรากฏของการดูดซับและแพร่)

จากรูปแบบของอาร์เรเนียส พบว่า ฟลักซ์รวมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการแยกจะขึ้นกับพลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านของสาร กล่าวคือ ถ้าสารที่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีมีพลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าการเลือกผ่านลดลง

2.8.4 ความหนาของเยื่อแผ่น

โดยทั่วไปเยื่อแผ่นที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันจะมีโครงสร้างของรูพรุนที่ไม่แน่นอน (Amorphous) ซึ่งหมายถึง รูพรุนที่มีอยู่ในเยื่อแผ่นนั้นไม่ถึงกันตลอดความหนาของเยื่อแผ่น หรือที่เรียกว่าเยื่อแผ่นแบบไม่มีรูพรุน (Non-porous membrane) ดังนั้น กลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นจึงเป็นไปในลักษณะของการแพร่สาร ซึ่งในการแพร่ของสารจะขึ้นกับระยะทาง (ความหนา) ที่สารแพร่ผ่าน ด้วยเหตุนี้เองเมื่อเยื่อแผ่นหนาขึ้น ค่าฟลักซ์ของสารจึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อเยื่อแผ่นหนาขึ้นการแพร่ของสารจะยากขึ้น หรือ มีความต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นสูงขึ้นนั่นเอง

สำหรับค่าการเลือกผ่านจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเยื่อแผ่นหนาขึ้นจะทำให้สารที่ผ่านเยื่อแผ่นได้น้อยกว่าแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้ยากยิ่งขึ้น ขณะที่สารที่ต้องการจะแยกยังคงผ่านเยื่อแผ่นได้ดี เป็นผลให้ปริมาณของสารที่ผ่านเยื่อแผ่นได้น้อยกว่าในเพอเมอเทลดลง

2.8.5 อัตราการไหล

ในที่นี้หมายถึง อัตราการไหลของสารป้อน ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน อัตราการไหลจะมีผลต่อการถ่ายเทมวลและการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน กล่าวคือ หากอัตราการไหลของสารป้อนมีค่ามากจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นขอบเขตของเหลวให้มากขึ้น ผลที่ตามมาคือสามารถลดการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันได้ เนื่องจากจะลดการสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ตรงบริเวณผิวสัมผัสเยื่อแผ่น-สารป้อน

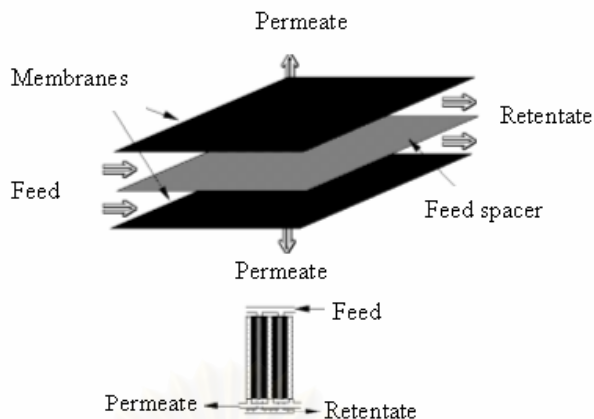
2.9 ประเภทของโมดูลในกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน

เยื่อแผ่นที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้งานในกระบวนการแยกอาจมีรูปร่างแตกต่างกัน เช่น เป็นเยื่อแผ่นเรียบ หรือเป็นท่อ เป็นต้น ซึ่งในการใช้งานจะต้องมีการประกอบหน่วยอุปกรณ์เพื่อใช้บรรจุเยื่อแผ่นให้มีพื้นที่เยื่อแผ่นตามต้องการ โดยหน่วยอุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า โมดูล (Module) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ แบบแผ่นและกรอบ แบบท่อ แบบท่อม้วน และแบบเส้นใยกลวง ซึ่งหลักในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงการใช้งาน คือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น และมีความกะทัดรัด

2.9.1 โมดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module)

โมดูลแบบแผ่นและกรอบถือได้ว่าเป็นโมดูลแบบแรกที่ใช้ในกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถขึ้นรูปแบบแผ่นเรียบได้ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งโมดูลแบบแผ่นและกรอบคือ โมดูลที่ประกอบด้วยเยื่อแผ่นที่ถูกประกบด้วยแผ่นกั้น (Spacer) ซึ่งสารป้อนจะไหลผ่านทางผิวหน้าของเยื่อแผ่น โดยมีอุปกรณ์อื่นประกอบเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของรีเทนเนทเพอมีเอท

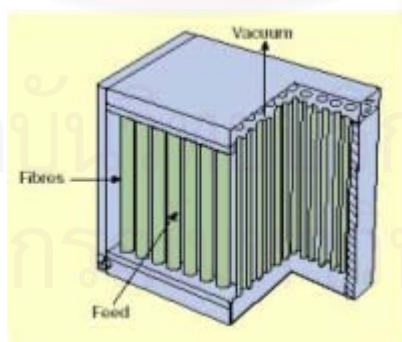
โมดูลชนิดนี้สามารถทำความสะอาดและเปลี่ยนเยื่อแผ่นได้สะดวก สามารถควบคุมการเกิดชั้นขอบเขตของเหลวได้ง่าย การถ่ายเทความร้อนจากสารป้อนไปยังเยื่อแผ่นดี แต่พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดูลค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและดูแลรักษาสูง



รูปที่ 2.8 แสดงโมดูลแบบแผ่นและกรวย

2.9.2 โมดูลแบบท่อ (Tubular module)

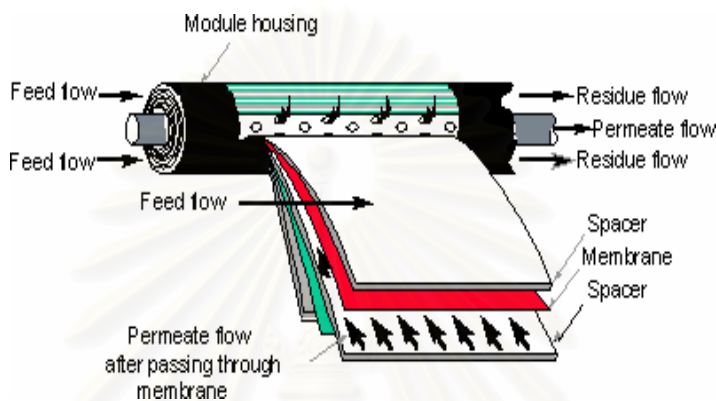
ประกอบด้วยเยื่อแผ่นแบบท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะชั้นรองรับที่แข็งแรง (Housing) ซึ่งอาจจะมีเพียงท่อเดียวหรือหลายท่อบรรจุอยู่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับพื้นที่เยื่อที่ต้องการ โดยสารป้อนจะไหลเข้าในส่วนด้านในท่อและเพอเมอที่ซึ่งไหลผ่านเยื่อแผ่นจะถูกเก็บมารวมกัน ดังรูปที่ 2.9 โมดูลชนิดนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการลงทุนสูง เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดูลต่ำมาก แต่มีข้อดีคือหลีกเลี่ยงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันได้ง่ายโดยใช้อัตราการไหลของสารป้อนที่เหมาะสม การเกิด fouling ต่ำและทำความสะอาดได้ง่าย



รูปที่ 2.9 แสดงโมดูลแบบท่อ

2.9.3 โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral-wound module)

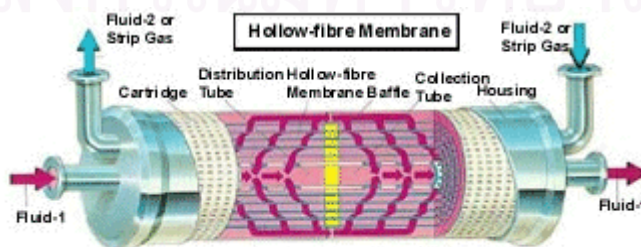
เป็นโมดูลที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมเยื่อแผ่นด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส เป็นการนำเยื่อแผ่นแบบเรียบและแผ่นกั้นมาวางซ้อนกันแล้วม้วนรอบแกน บรรจุภายในภาชนะทรงกระบอก พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดูลค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงโมดูลแบบท่อม้วน

2.9.4 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow-fiber module)

ภายในบรรจุด้วยเส้นใยที่มีขนาดเล็กมาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร และมีความแข็งแรงสูง ถูกมัดรวมกันและงอเป็นรูปเกือกม้าบรรจุอยู่ในท่อทรงกระบอก โมดูลแบบเส้นใยกลวงมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรโมดูลสูงมาก นิยมใช้กับกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันที่ใช้ปั๊มสุญญากาศดึงเพอเมตออกจากโมดูล ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงโมดูลแบบเส้นใยกลวง

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำ ในการแยกสารอินทรีย์อินทรีย์เจือจาง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ศึกษา กลไกของการแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ เช่น การแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านเยื่อแผ่น การดูดซับ ของสารอินทรีย์ผ่านเยื่อแผ่น เป็นต้น กลุ่มที่ 2 ศึกษาแบบจำลองของกระบวนการเพอร์เวป พอเรชัน เพื่อใช้ในการทำนายผลและอธิบายกลไกได้อย่างถูกต้อง และกลุ่มที่ 3 คือ ศึกษาการ ผลิตเยื่อแผ่น Hydrophobic

Watson และ Payne [23] ศึกษาการแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำด้วยกระบวนการ เพอร์เวปพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่นซิลิโคน และพิจารณาผลของความดันด้านเพอมีเอทรวมถึงผล ของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าการแยกเป็นหลัก จากผลการทดลองพบว่า สารอินทรีย์ที่ มีการละลายน้ำต่ำและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นที่สูง จะทำให้แยกสารอินทรีย์ได้ง่าย ส่วนเยื่อแผ่นที่มีความหนามากจะให้ค่าการแยกที่สูงแต่จะให้ค่าฟลักซ์ที่ต่ำ ดังนั้น การแยก สารละลายอินทรีย์ด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันจึงเหมาะสมกับสารอินทรีย์ที่มีการละลายน้ำ ต่ำเป็นปัจจัยหลัก โดยอาจดูรวมถึงตัวแปรอื่นที่มีผลต่อค่าการละลายน้ำด้วย คือ ผลของ อุณหภูมิ ส่วนปัจจัยที่สำคัญรองลงมา ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านเยื่อแผ่น และความหนาของเยื่อแผ่น

Boddeker และ Bengtson [24] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกฟีนอลออกจากน้ำด้วย กระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นชนิดเยื่อแผ่นพอลิเอทเธอร์บิล็อกเอไมด์ ที่มี ความหนา 3-115 ไมโครเมตร ใช้โมดูลที่มีทิศทางการไหลตั้งฉากกับเยื่อแผ่น โดยมีพื้นที่เยื่อแผ่น 100 ตารางเซนติเมตร ความดันด้านเพอมีเอท 0.5-10 มิลลิบาร์ อัตราการไหลสารป้อน 2 ลิตร ต่อนาที ความเข้มข้นของฟีนอล 31-994 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของสารป้อน สรุปได้ว่า ค่าการแยก ของสารลดลงเมื่อความดันด้านเพอมีเอทเพิ่มขึ้น ส่วนฟลักซ์ของสารอินทรีย์ค่อนข้างคงที่เมื่อใช้ เยื่อแผ่นหนาขึ้นขณะที่ค่าฟลักซ์ของน้ำลดลง และเมื่อความเข้มข้นในสารป้อนเพิ่มขึ้น พบว่าค่า ฟลักซ์ของสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นแต่ค่าการแยกจะลดลง

ชมพูนุท พิภพลาภอนันต์ [25] ศึกษาผลของตัวแปรอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารป้อน และความดันด้านเพอมีเอท ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกบิวทานอลออกจากของผสม น้ำ-บิวทานอล โดยใช้เยื่อแผ่นที่ทำจากท่ออย่างซิลิโคน ความเข้มข้นของบิวทานอลร้อยละ 0.5-

4.38 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 35-60 องศาเซลเซียส และความดันด้านเพอมีเอท 20-50 มิลลิเมตรปรอท พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนจะทำให้ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าฟลักซ์ของน้ำค่อนข้างคงที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนจะทำให้ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์และค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้น แต่สำหรับค่าการแยกพบว่า ความเข้มข้นของสารป้อนและอุณหภูมิของสารป้อนไม่มีผลต่อค่าการแยก ส่วนการลดความดันด้านเพอมีเอทจะทำให้ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ ค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกเพิ่มขึ้น

จรรยาลักษณ์ อติชาติพงศ์กุล และรุ่งโรจน์ สุขเกิดกิจพิบูลย์ [26] ศึกษาผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารป้อนที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการแยกสารละลายเอทานอลด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน ที่ความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 5 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิของสารป้อน 27.5 – 40 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 6-30 โดยน้ำหนักพบว่า ค่าความเข้มข้นของเอทานอลในเพอมีเอทและค่าฟลักซ์รวมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าการแยกกลับมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารป้อน โดยที่ความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักให้ค่าฟลักซ์รวมเพิ่มขึ้นจาก 710.65 – 1155.65 kg/m²hr แต่ค่าการแยกลดลงจาก 3.88-2.77 ในช่วงอุณหภูมิ 27.5-40 องศาเซลเซียส

Liu และคณะ [27] ทดลองแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน สารที่ใช้ได้แก่ เมทานอล อะซิโตนและกรดอะซิติก โดยใช้เยื่อแผ่นซิลิกาไลท์ซีโอไลท์ (Silicalite zeolite) ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิของสารป้อนคงที่ 32 องศาเซลเซียส และความดันด้านเพอมีเอท 4-20 มิลลิบาร์ พบว่า สารละลายเมทานอลและอะซิโตนจะมีค่าฟลักซ์รวมและฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่ค่าฟลักซ์ของน้ำจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อน และที่ความเข้มข้นต่ำของสารป้อนจะไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของเมทานอลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าการแยกของสารละลายเมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนเพิ่มขึ้น แต่ของสารละลายอะซิโตนจะให้ค่าการแยกในทางกลับกัน สำหรับการแยกสารละลายกรดอะซิติก พบว่า ทั้งค่าฟลักซ์รวมและค่าการแยกจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารป้อน และให้ค่าการแยกน้อยกว่า 1 ในทุกระดับความเข้มข้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เยื่อแผ่นซิลิกาไลท์ซีโอไลท์เลือกผ่านน้ำมากกว่ากรดอะซิติก

Masuda และคณะ [28] ได้ทดลองแยกสารละลายเอทานอลด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิวันไตรเมทิลไซลิล-วัน-โพรไพน์ (Poly(1-trimethylsilyl-1-propyne), PTMSP) ความหนาเยื่อแผ่น 30 ไมโครเมตร ความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 0.1 มิลลิเมตรปรอท

และอุณหภูมิของสารป้อน 10-50 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารป้อน จะทำให้ความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทเพิ่มขึ้นแต่ค่าการแยกลดลง แต่เมื่อลดความดันด้านเพอมีเอทจะทำให้ค่าการแยกมีค่าค่อนข้างคงที่ และสำหรับการแยกสารละลายอะซิโตนอะซิโตไนโตรล์และกรดอะซิติก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-95 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของสารป้อนคงที่ 30 องศาเซลเซียส และความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 0.1 มิลลิเมตรปรอท พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อน ความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทของสารละลายอะซิโตน อะซิโตไนโตรล์และกรดอะซิติก มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับค่าการแยกนั้นสารละลายอะซิโตนและอะซิโตไนโตรล์มีค่าลดลง แต่สารละลายกรดอะซิติกกลับมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นต่ำของสารป้อนมีผลต่อ ค่าการแยกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของอะซิโตไนโตรล์จะให้ค่าการแยกสูงสุด

Bandini และคณะ [29] ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารป้อน อุณหภูมิของสารป้อน อัตราการไหลของสารป้อน และความดันด้านเพอมีเอท ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ออกจากน้ำ ได้แก่ อะซิโตน เอทานอล ไอโซโพรพานอล เอทิลอะซิเตต เมทิลอะซิเตต และเมทิล-เทอเชียรี-บิวทิล-อีเทอร์ โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน ความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 2-10 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของสารป้อน 25-35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารป้อน 0.05-3 ลิตรต่อนาที และความดันด้านเพอมีเอท 10-70 มิลลิบาร์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนและลดความดันด้านเพอมีเอท จะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์และค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของสารในเพอมีเอทกลับมีค่าลดลง ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อน จะทำให้ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ฟลักซ์ของน้ำและความเข้มข้นของสารในเพอมีเอทเพิ่มขึ้น และสำหรับการเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อน พบว่า ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์และค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้นต่ำของสารป้อน

Nguyen และ Nobe [30] ทดลองแยกสารอินทรีย์เจือจางของไดคลอโรมีเทน คลอโรฟอร์ม โบรโมอีเทน อะซิโตน และเอทานอลออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นแบบท่อที่ผลิตจากซิลิโคน เซลลูโลสอะซิเตต และเยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน พื้นที่เยื่อแผ่น 9.6, 2 และ 5.5 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นตัวพาเพอมีเอทผ่านเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ที่ใช้วัดความเข้มข้นของสาร จากการศึกษาพบว่า ค่า ฟลักซ์ของสารอินทรีย์แปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารป้อน แต่ความเข้มข้นของสารป้อนไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ จึงส่งผลให้ฟลักซ์ของน้ำมีค่าค่อนข้างคงที่ สำหรับกรณีสารละลาย

อินทรีย์ผสมพบว่าสารอินทรีย์แต่ละตัวไม่มีผลต่อฟลักซ์ของสารอินทรีย์อื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบผลการแยกด้วยเยื่อแผ่นทั้ง 3 ชนิด พบว่าเยื่อแผ่นซิลิโคนให้ค่าการแยกสูงสุด รองลงมาคือเยื่อแผ่นเยื่อแผ่นพอลิเอทเธนระฟลูออโรเอทิลีน และเยื่อแผ่นเซลลูโลสอะซิเตต ตามลำดับ

Blume, Wijmans และ Baker [21] ได้ทดลองแยกสารอินทรีย์เจือจางออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดพอลิไดเมทิลไซลิกเซน และเยื่อแผ่นเชิงประกอบพอลิโอฟีน (Polyolefin composite membrane) ซึ่งเป็นโมดูลแบบท่อม้วน (Spiral-wound) พื้นที่เยื่อแผ่น 0.1-0.3 ตารางเมตร อัตราการป้อนสาร 0.2-1.5 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ความดันด้านเพอมีเอท 0.4-4.5 มิลลิเมตรปรอท พบว่า ชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำสามารถแบ่งตามค่าการแยกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารมีขั้ว คือ เอทานอล ไอโซโพรพานอล เมทานอล และนอร์มอล-โพรพานอล จะมีค่าการแยกอยู่ในช่วง 5-10 สำหรับสารไม่มีขั้ว คือ อะซิโตน เอทิลอะซิเตต คลอโรฟอร์ม และ 1,1,2-ไตรคลอโรอีเทน จะมีค่าการแยกที่สูงกว่าสารมีขั้วคือ 50-400 ส่วนผลของความดันด้านเพอมีเอทนั้นสำหรับสารละลายเอทานอล พบว่าความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทจะเพิ่มขึ้นตามความดัน ส่วนสารละลายเอทิลอะซิเตตนั้นความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทจะมีค่าลดลงเมื่อความดันด้านเพอมีเอทเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าจะมีแต่ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เท่านั้นที่ลดลงตามระยะเวลา ส่วนฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าค่อนข้างคงที่ และฟลักซ์รวมจะเริ่มคงที่เมื่อทดลองเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงขึ้นไป

Boddeker, Bengtson และ Pingel [31] ศึกษาการแยกสารจำพวกไอโซเมอร์ของบิวทานอลออกจากน้ำ โดยพิจารณาผลของโมเลกุลที่คล้ายกันที่มีต่อการแยกด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิอีเทอร์บิล็อกเอไมด์ พอลิไดเมทิลไซลิกเซน (Polydimethyl siloxane, PDMS) และพอลิยูรีเทน (Polyurethane, PUR) พื้นที่เยื่อแผ่น 100 ตารางเซนติเมตร ความหนาของเยื่อแผ่น 50 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิสารป้อน 50 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่า สารไอโซเมอร์ของบิวทานอลที่มีค่าความดันไอสูงหรือจุดเดือดต่ำจะให้ค่าการแยกที่ต่ำ และความสามารถในการแยกสารจำพวกไอโซเมอร์ของบิวทานอลของเยื่อแผ่นทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าการแยกพบว่า เยื่อแผ่นพอลิไดเมทิลไซลิกเซนให้ค่าการแยกสูงสุด รองลงมาคือ เยื่อแผ่นพอลิอีเทอร์บิล็อกเอไมด์ และเยื่อแผ่นพอลิยูรีเทน ตามลำดับ

โอบี กกก้าแห่ง [32] ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวก-พอเรชันในการแยกสารละลายอะซิโตนและเอทิลอะซิเตต โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิอีเทอร์บิล็อกเอไมด์ และพอลิไดเมทิลไซลลอกเซน ที่ความดันด้านเพอมีเอท 2-15 มิลลิเมตรปรอท อัตราการไหลสารป้อน 91-239 มิลลิตรต่อนาที อุณหภูมิสารป้อน 30-50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายอะซิโตนเท่ากับร้อยละ 0.1-0.5 โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารละลายเอทิลอะซิเตตร้อยละ 0.01-0.05 โดยปริมาตร พบว่า การลดความดันด้านเพอมีเอท การเพิ่มอัตราการไหลสารป้อนและอุณหภูมิของสารป้อน จะทำให้ฟลักซ์ของสารอินทรีย์ ค่าฟลักซ์ของน้ำ และค่าการแยกเพิ่มขึ้น แต่สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์จะทำให้ฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่ฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกลดลง และเมื่อเปรียบเทียบผลการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นพอลิอีเทอร์บิล็อกเอไมด์ และเยื่อแผ่นพอลิไดเมทิลไซลลอกเซน โดยเปรียบเทียบค่าเพอเมบิลิตี (Permeability, Q) พบว่า เยื่อแผ่นพอลิอีเทอร์บิล็อกเอไมด์ให้ค่า Q ของสารอินทรีย์และน้ำทั้งในการแยกสารละลายอะซิโตนและเอทิลอะซิเตต มีค่าต่ำกว่าค่า Q ที่ได้จากการแยกด้วยเยื่อแผ่นพอลิไดเมทิลไซลลอกเซน

Slater [33] ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการแยกเอทิลอะซิเตตออกจากสารละลายเจือจางโดยใช้เยื่อแผ่นเชิงประกอบซิลิโคน เยื่อแผ่นเชิงประกอบซิลิโคนที่เติมด้วยซีโอไลต์ และเยื่อแผ่นแบบไม่สมมาตร (Asymmetric membrane) ชนิดพอลิวันไตรเมทิลไซลลิวัน-โพรไพน์ ที่ความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 1-8 โดยปริมาตร อุณหภูมิสารป้อน 23-70 องศาเซลเซียส และความดันด้านเพอมีเอท 1-100 มิลลิเมตรปรอท พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนทำให้ค่าฟลักซ์รวมและความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนแม้ว่าจะทำให้ทำให้ค่าฟลักซ์รวมเพิ่มขึ้นแต่ความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทกลับมีค่าลดลง และสำหรับการเพิ่มความดันด้านเพอมีเอทนั้น พบว่า ค่าความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทและค่าฟลักซ์รวมจะมีค่าลดลงเมื่อความดันด้านเพอมีเอทเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการแยกด้วยเยื่อแผ่น 3 ชนิด พบว่า เยื่อแผ่นเชิงประกอบที่เติมด้วยซีโอไลต์ให้ค่าความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทสูงสุด แต่ให้ค่าฟลักซ์ต่ำสุด ในกรณีกลับกันเยื่อแผ่นแบบไม่สมมาตร PTMSP จะให้ค่าความเข้มข้นของสารด้านเพอมีเอทต่ำสุดและค่าฟลักซ์สูงสุด

Lamer และคณะ [19] ศึกษาผลกระทบของการดูดซับและการแพร่ของสารอินทรีย์ ได้แก่ เอทิลอะซิเตต เอทิลบิวทานโนเอท เอทิลเอกซานโนเอท เอทิลไอโซบิวทิลเอท และ 1-ออกเทน-3-อล โดยใช้เยื่อแผ่นซิลิโคนหนา 130 ไมโครเมตร ที่มีพื้นที่เยื่อแผ่น 39.60 ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิสารป้อน 25 องศาเซลเซียส พบว่า สารอินทรีย์จำพวกเอสเทอร์ที่มีจำนวนโมเลกุล

คาร์บอนสูง และมีโครงสร้างคล้ายกันจะถูกดูดซับบนซิลิโคนได้มาก แตกต่างกับน้ำที่ถูกดูดซับได้เล็กน้อย สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะแปรผกผันกับปริมาตรเชิงโมลของเอสเทอร์ จากผลการทดลองค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์จะแปรผันตามการดูดซับ เพราะถ้ามีการดูดซับมากจะช่วยเพิ่มความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving force) ระหว่างผิวเยื่อแผ่นให้สูงขึ้น ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีผลน้อยกว่าและไม่สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าให้เห็นเด่นชัดได้

Psaume, Aptel และ Aurelle [20] ศึกษาผลของคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, CP) ในการแยกไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene, TCE) เจือจางออกจากน้ำด้วยเยื่อแผ่นซิลิโคนแบบเส้นใยกลวง ที่ความเข้มข้นของสารป้อน 50-250 ไมโครกรัมต่อลิตร ความดันด้านเพอมีเอท 3 มิลลิเมตรปรอท และอุณหภูมิของสารป้อน 20 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาความเร็วของสารป้อนในช่วงเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds Number, Re) 1-60 (ความเร็วของสารป้อน 0.6-20 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่าค่าฟลักซ์ของ TCE จะแปรผันตามความเข้มข้นของสารป้อนค่า Re แต่ค่าฟลักซ์ของ TCE จะขึ้นกับ Re ไม่มากนัก อีกทั้งความเข้มข้นของสารป้อนไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ

Ji, Sikdar และ Hwang [22] ได้นำแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance in Series Model) จากพื้นฐานการถ่ายเทมวลเพื่อใช้วิเคราะห์การแยกสารผสมอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิอีเทอร์บิล็อกเอไมด์ พอลิไดเมทิลไซลิลอกเซน และพอลิยูรีเทน และเยื่อแผ่น Silicone polycarbonate copolymer (SPC) โดยใช้สาร 3 ชนิดได้แก่ โทลูอีน เมทิลีนคลอไรด์ และ 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน ผสมน้ำที่ละชนิดทั้งสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่าการแยกสารละลายอินทรีย์ผสมหลายชนิด สารอินทรีย์แต่ละตัวจะไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ตัวอื่นๆ ที่ผสมอยู่รวมกันและรวมถึงค่าฟลักซ์ของน้ำด้วย และสำหรับค่าความต้านทานของชั้นขอบเขตด้านเพอมีเอท (เฟสไอ) สามารถตัดทิ้งได้เมื่อความดันด้านเพอมีเอทมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

Nagase และคณะ [34] ได้พัฒนาเยื่อแผ่นพอลิวันไตรเมทิลซิลิล-วัน-โพรไพน์ ให้มีคุณสมบัติในการแยกเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มหมู่ฟลูออโรอัลคิล (Fluoroalkyl group) เพื่อแยกเอทานอลออกจากน้ำ พบว่า เยื่อแผ่นพอลิวันไตรเมทิลซิลิล-วัน-โพรไพน์ ที่มีการเติมหมู่ฟลูออโรอัลคิลจะทำให้มีค่าการแยกเพิ่มขึ้น และที่ร้อยละ 2 โดยโมลของ 1-fluoroalkyldimethylsilyl-1-propyne (FADSP) ให้ค่าการแยกสูงสุดและจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวน

โมลของ FADSP เพิ่มขึ้น และสำหรับการแยกเตตระไฮโดรฟูแรน ไอโซโพรพานอล อะซิโตน อะซิโตนไทรล์ และไดออกเซน ออกจากน้ำที่ความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่า ความเข้มข้นของสารต้านเพอมีเอทของเตตระไฮโดรฟูแรน อะซิโตน และอะซิโตนไทรล์ให้ค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก

Hennepe และคณะ [35] ศึกษาการแยกสารอินทรีย์เจือจางของเมทานอล เอทานอล และโพรพานอล ด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน โดยใช้เยื่อแผ่นซีลิโคนที่มีการเติมซิลิกาไลต์ ที่ความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 5.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของสารป้อน 22.5 องศาเซลเซียส พบว่า เยื่อแผ่นซีลิโคนที่มีการเติมซิลิกาไลต์จะทำให้ค่าฟลักซ์รวมและค่าการแยกเพิ่มขึ้น มากกว่าเยื่อแผ่นซีลิโคนที่ไม่มีการเติมซิลิกาไลต์ และที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของซิลิกาไลต์จะให้ค่าฟลักซ์และค่าการแยกสูงสุด โดยแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะให้ค่าการแยกสูงกว่า แอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ค่าฟลักซ์กลับมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนจะทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เคมีภัณฑ์

3.1.1 อะซิโตนไทรล (Analytical grade) ของบริษัท Merck

3.1.2 โพรพิโอโนไทรล (Analytical grade) ของบริษัท Merck

3.1.3 เมทานอล (Analytical grade) ของบริษัท Merck

3.1.4 เยื่อแผ่นพอลิเอเตตระฟลูออโรเอทิลีนชนิดแผ่นเรียบ (ชนิด WTP) ของบริษัท Whatman ซึ่งมีขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร ความหนา 130 ไมโครเมตร ความพรุน 72 เปอร์เซ็นต์

3.1.5 แผ่นรองรับพอลิโพรพิลีน (Polypropylene)

3.1.6 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ปั๊มไหลวน (Circulating pump) ใช้ในการป้อนสารเข้าระบบ เป็นปั๊มโมเดล QSY ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลในช่วง 0.2-92.2 มิลลิลิตรต่อนาที ของบริษัท Fluid Metering

3.2.2 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ใช้ในการลดความดันด้านเพอมีเอทให้มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เป็นปั๊มสุญญากาศชนิดหมุน (Oil rotary) โมเดล E2M8 ซึ่งสามารถทำสุญญากาศได้ถึง 5×10^{-3} มิลลิเมตรปรอท ของบริษัท Edwards

3.2.3 เกจความดันสุญญากาศ (Vacuum gauge) ช่วงความดัน 0-760 มิลลิเมตรปรอท

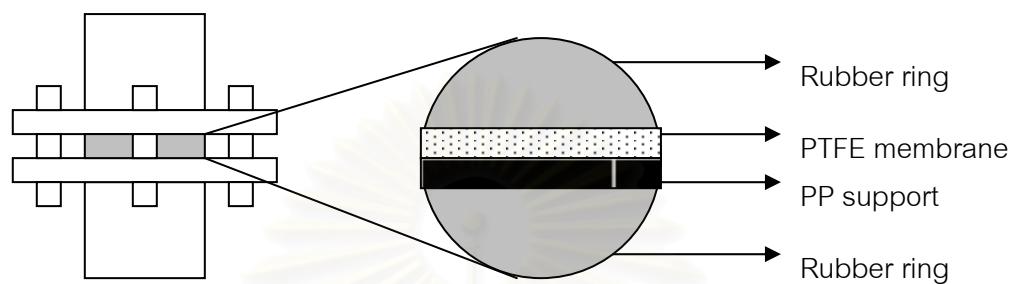
3.2.4 ถังควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ช่วงอุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิสารป้อนให้คงที่

3.2.5 ขวดบรรจุสารป้อน (Feed vessel) ขนาด 250 มิลลิลิตร

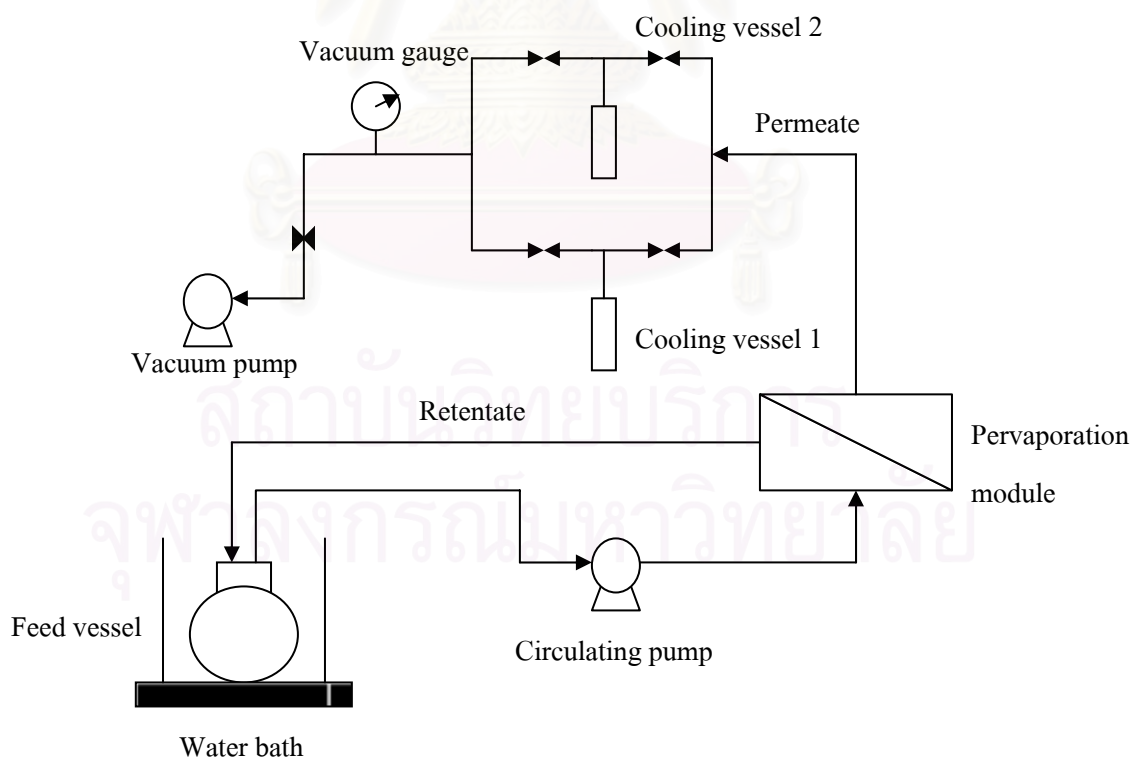
3.2.6 ชุดควบแน่น (Cooling vessel) เป็นส่วนที่ทำการควบแน่นไอของสารที่เป็นเพอมีเอท โดยให้ไอไหลเข้าสู่ส่วนกักสาร ซึ่งส่วนกักสารนี้จะจุ่มอยู่ในภาชนะเก็บความเย็นซึ่งภายในบรรจุอะซิโตน-น้ำแข็งแห้ง (อุณหภูมิ -78 องศาเซลเซียส) เพื่อให้เพอมีเอทกลั่นตัวเป็นของเหลว

3.2.7 โมดูล (Module) ใช้สำหรับบรรจุเยื่อแผ่นทำจาก Stainless steel มีลักษณะเป็นงาน Stainless 2 อันประกบกัน สามารถบรรจุเยื่อแผ่นพอลิเอเตตระฟลูออโรเอทิลีนรูปร่างกลมที่มีพื้นที่ใช้

งาน 11.34 ตารางเซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ซึ่งมีพอลิโพรพิลีนเป็นแผ่นรองรับ โดยเยื่อแผ่นจะถูกประกบด้วยวงแหวนยางเพื่อป้องกันการรั่วซึม ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงโมดูลกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน



รูปที่ 3.3 แสดงกระบวนการเพอร์เมอรัชันในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.4 เยื่อแผ่น PTFE และแผ่นรองรับ PP

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเริ่มต้นเดินระบบเพอร์แวกพอเรชัน

เตรียมสารละลายอะซิโตนไทรโอทิลีนให้มีความเข้มข้นที่ต้องการ (ร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร) แล้วเทใส่ขวดบรรจุสารป้อน จากนั้นให้ความร้อนแก่สารป้อนด้วยถังควบคุมอุณหภูมิ จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา (25-50 องศาเซลเซียส) เมื่ออุณหภูมิของสารป้อนคงที่แล้วให้หล่อเย็น Cooling vessel อันที่ 1 ด้วยน้ำแข็งแห้ง จากนั้นเปิดปั๊มไหลวนเพื่อป้อนสารละลายเข้าไปในโมดูลด้วยอัตราการไหลของสารป้อนที่ต้องการศึกษา (6-20 มิลลิลิตรต่อนาที) เมื่อสารป้อนเข้าสู่โมดูลแล้วจึงทำการเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อลดความดันภายในโมดูลด้านเพอมีเอท โดยปรับให้อยู่ในช่วงที่ทำการศึกษา (10-40 มิลลิเมตรปรอท) แล้วทำการเดินระบบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ดังแสดงในภาคผนวก ก

3.3.2 การตรวจวัดระหว่างการเดินระบบเพอร์แวกพอเรชัน

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว ทำการเดินระบบเพื่อเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยให้ถือเวลาที่เปิดปั๊มสุญญากาศเป็นเวลาเริ่มต้นของการวัด เมื่อครบกำหนดเวลาทำการปิดเครื่อง แล้วจึงนำตัวอย่างเพอมีเอทและสารป้อนไปชั่งน้ำหนักและทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC) จากนั้นบันทึกผลเพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านเพื่อใช้ประเมินสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันต่อไป ดังแสดงในภาคผนวก ค

3.3.3 ภายหลังการเดินระบบเพอร์แวกพอเรชัน

ทำการปิดปั๊มสุญญากาศและปั๊มไหลวน ในกรณีที่มีการให้ความร้อนแก่สารป้อน จะต้องปล่อยให้อุณหภูมิของสารป้อนลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำสารป้อนที่อยู่ภายในท่อและโมดูลออก ซึ่งจะทำให้สภาวะสุญญากาศภายในโมดูลกลับเข้าสู่ภาวะปกติ

3.3.4 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

3.3.4.1 ผลของความเข้มข้นของสารป้อน

บรรจุสารละลายอะซิโตนไทรล์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตรประมาณ 200 มิลลิลิตรลงในขวดสารป้อน เริ่มเดินระบบโดยป้อนสารผ่านโมดูลเยื่อแผ่นด้วยปั๊มไหลวนที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่ออนาที อุณหภูมิของสารป้อนคงที่ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และปรับความดันด้านเพอมีเอทไปที่ 10 มิลลิเมตรปรอท ควบคุมสภาวะดังกล่าวให้คงที่ตลอดการทดลอง และทำการเดินระบบเป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นจึงเริ่มเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะเดิม เมื่อครบกำหนดเวลานำตัวอย่างเพอมีเอทและสารป้อนที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ซึ่งแต่ละตัวอย่างการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ (Replication) 3 ครั้ง จากนั้นทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเป็นร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน

3.3.4.2 ผลของความดันด้านเพอมีเอท

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นสารละลายอะซิโตนไทรล์เริ่มต้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ ให้อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 20 มิลลิลิตรต่ออนาที และอุณหภูมิสารป้อนคงที่ 25 องศาเซลเซียส ทำการทดลองในแต่ละความเข้มข้น 3 ครั้ง โดยเปลี่ยนความดันด้านเพอมีเอทเป็น 20, 30 และ 40 มิลลิเมตรปรอท ตามลำดับ เมื่อเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะดังกล่าวแล้ว นำตัวอย่างเพอมีเอทและสารป้อนไปชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ความเข้มข้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.3.4.3 ผลของอุณหภูมิของสารป้อน

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นสารละลายอะซิโตนไทรล์เริ่มต้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ ให้อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 20 มิลลิลิตรต่ออนาที และความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 10 มิลลิเมตรปรอท ทำการทดลองในแต่ละความเข้มข้น 3 ครั้ง โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของสารป้อนเป็น 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเก็บตัวอย่างเป็น

เวลา 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะดังกล่าวแล้ว นำตัวอย่างเพอมีเอทและสารป้อนไปยังน้ำหนักและวิเคราะห์ความเข้มข้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.3.4.4 ผลของอัตราการไหลของสารป้อน

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นสารละลายอะซิโตไนโตรล์เริ่มต้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ ให้ความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 10 มิลลิเมตรปรอท และอุณหภูมิสารป้อนคงที่ 25 องศาเซลเซียส ทำการทดลองในแต่ละความเข้มข้น 2 ครั้ง โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของสารป้อนเป็น 6 และ 13 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ เมื่อเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะดังกล่าวแล้ว นำตัวอย่างเพอมีเอทและสารป้อนไปยังน้ำหนักและวิเคราะห์ความเข้มข้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.3.5 เปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันในการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC

ทำการทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์เริ่มต้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ โดยใช้สภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการแยกดีที่สุดจากการทดลองในข้อ 3.3.4.2 ถึง 3.3.4.4 จากนั้นเปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันในการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC และหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำ

3.3.6 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นอะซิโตไนโตรล์

ความเข้มข้นของสารอะซิโตไนโตรล์ในเพอมีเอทและสารป้อนจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีของบริษัท Shimadzu รุ่น GC-7AG ของประเทศญี่ปุ่น คอลัมน์ที่ใช้คือ Porapak Q ขนาด 80/100 mesh มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4 มิลลิเมตร ความยาว 2 เมตร และดีเทคเตอร์ที่ใช้คือ FID โดยมีสภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

Column temperature	=	180 °C
Injection temperature	=	220 °C
Detector temperature	=	220 °C
Carrier gas	=	ไนโตรเจน
Flow rate	=	50 ml/min

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Internal standard ในการคำนวณหาความเข้มข้นของอะซีโตไนไตรล์ในพอลิเอทและสารป้อน ดังแสดงในภาคผนวก ก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอร์เรชันในการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ความเข้มข้นของสารป้อน ความดันด้านเพอมีเอท อุณหภูมิของสารป้อน และอัตราการไหลของสารป้อน ที่มีผลต่อค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่าน รวมถึงผลของการแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC โดยการเก็บตัวอย่างสารป้อนและเพอมีเอทมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก สำหรับการคำนวณค่าความเข้มข้น ค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่าน ดังแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งจากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอร์เรชัน มีรายละเอียดของผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลของความเข้มข้นของสารป้อน

จากการทดลองที่อุณหภูมิสารป้อนคงที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ในสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ ผลของค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ในเพอมีเอท ค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่าน ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1.1 ถึง 4.1.6

จากผลการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ในเพอมีเอทจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ในสารป้อน (ดังรูป 4.1.1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำโดยกระบวนการเพอร์แวกพอร์เรชัน เยื่อแผ่น PTFE เลือกผ่านอะซิโตไนโตรล์มากกว่าน้ำ จึงทำให้ความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ในเพอมีเอทเพิ่มขึ้น

จากรูป 4.1.2 และ 4.1.3 แสดงค่าฟลักซ์รวมและค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ (ฟลักซ์ของอะซิโตไนโตรล์) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อน [20,24-30,32] เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้โมเลกุลของสารอินทรีย์สัมผัสกับผิวหน้าของเยื่อแผ่นได้มากยิ่งขึ้น ทำให้เยื่อแผ่นดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้มากขึ้น อีกทั้งการเพิ่มความ

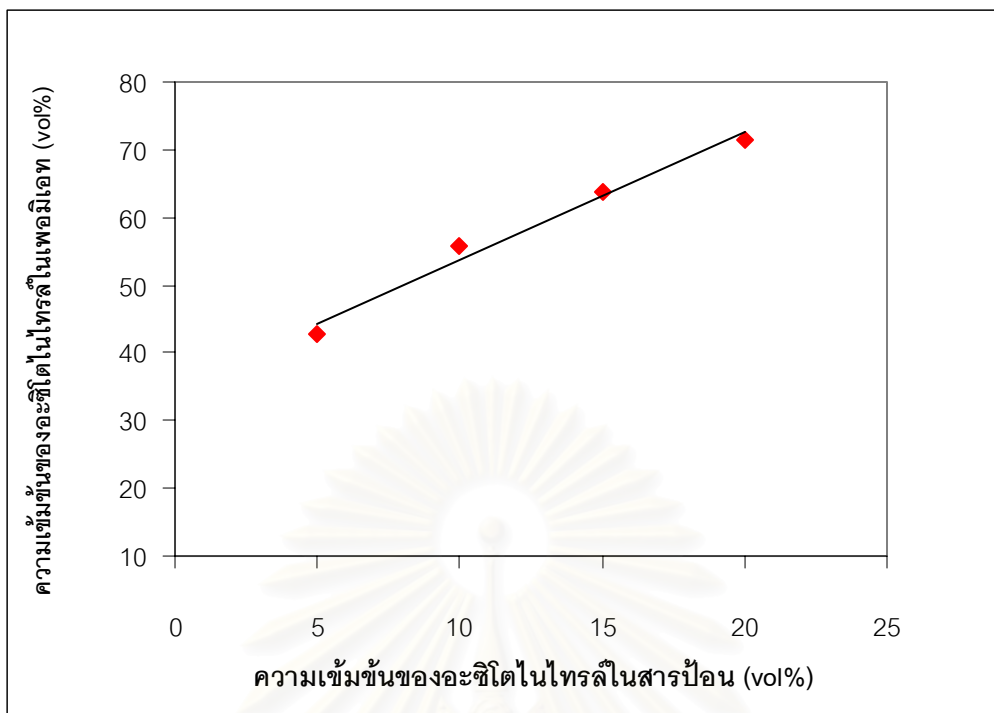
เข้มข้นของสารป้อน (c) นอกจากจะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นแล้ว ยังทำให้ค่าแอกทิวิตีของสารและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารอินทรีย์ทั้งในสารป้อนและในเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นด้วย ดังสมการที่ 2.8

$$D_i = D_{io} \exp(A_i c_i)$$

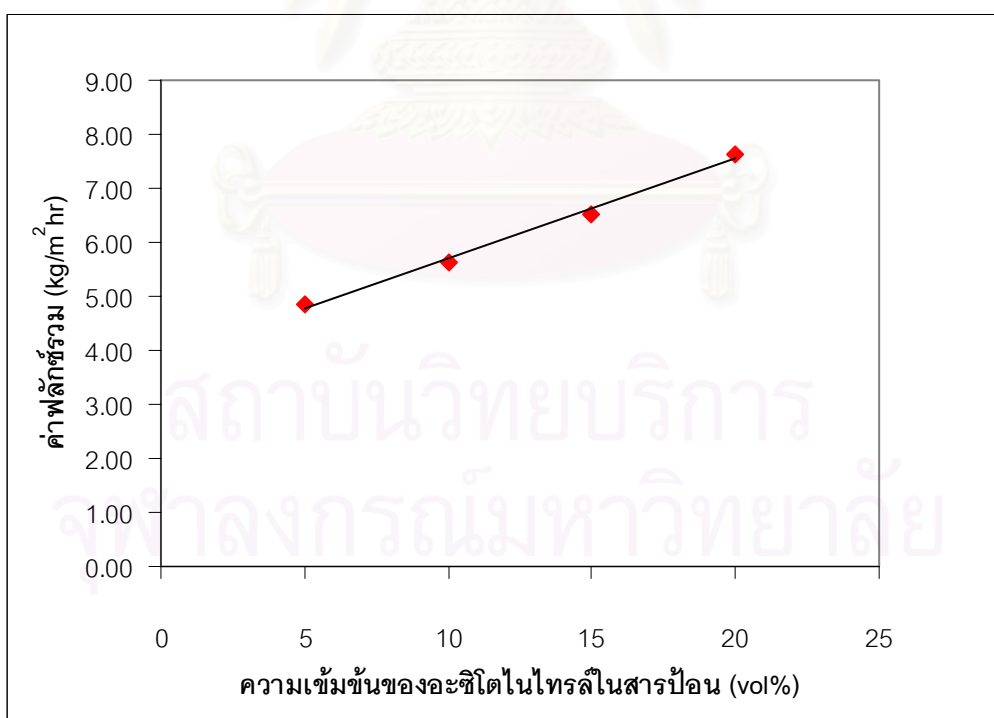
ส่วนค่าฟลักซ์ของน้ำซึ่งเป็นฟลักซ์ส่วนใหญ่กลับมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนเพิ่มขึ้น (ดังรูป 4.1.5) อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นถูกดูดซับบนเยื่อแผ่นได้มากขึ้น จึงไปคั่งโมเลกุลของน้ำทำให้น้ำแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้น้อยลง ฟลักซ์ของน้ำจึงมีค่าลดลง

สำหรับค่าการเลือกผ่านนั้นมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อน [24,28,32] (ดังรูป 4.1.5) อาจเป็นเพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนจะทำให้อัตราการดูดซับสารอินทรีย์ (ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับบนเยื่อแผ่นที่มากขึ้นต่อความเข้มข้นของสารป้อนที่เพิ่มขึ้น) มีค่าลดลง เนื่องจากเยื่อแผ่นอิ่มตัวด้วยสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เป็นผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ (ฟลักซ์ของสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นต่อความเข้มข้นของสารป้อนที่เพิ่มขึ้น) มีค่าลดลง และสำหรับค่า PSI ซึ่งเป็นค่าดัชนีการแยกด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน พบว่า มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนในลักษณะเดียวกันกับค่าการเลือกผ่าน (ดังรูป 4.1.6) โดยค่าการแยกและค่า PSI จะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นต่ำของสารป้อน (ร้อยละ 5 และ 10 โดยปริมาตร) แล้วมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความเข้มข้นสูงของสารป้อน และจากการทดสอบทางสถิติพบว่า ทั้งค่าการแยกและค่า PSI ที่ความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 15 และ 20 โดยปริมาตร ให้ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI จะให้ค่าสูงที่ความเข้มข้นต่ำของสารป้อน แต่ที่ความเข้มข้นสูงของสารป้อนจะไม่มีผลต่อค่าการเลือกผ่านและค่า PSI เพราะฉะนั้น กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันจึงเหมาะสมในการแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำที่ระดับความเข้มข้นต่ำของสารป้อน

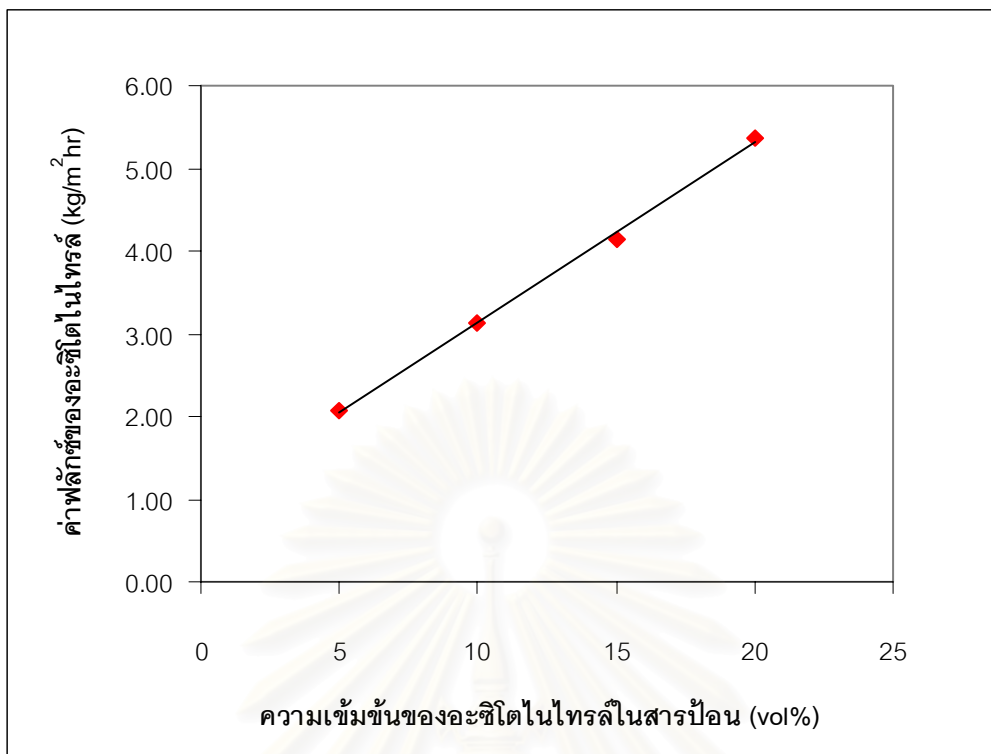
ในการทดลองนี้ที่ความเข้มข้นของสารป้อนในช่วงร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร ให้ค่าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรโอในเฟอมีเอทตั้งแต่ร้อยละ 42.83-70.45 โดยปริมาตร ค่าฟลักซ์รวมตั้งแต่ 4.87-7.63 kg/m²hr ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ตั้งแต่ 2.08-5.37 kg/m²hr ให้ค่าฟลักซ์ของน้ำ ค่าการแยกและค่า PSI ลดลงตั้งแต่ 2.78-2.25 kg/m²hr, 18.75-11.33 และ 86.44-78.82 kg/m²hr ตามลำดับ



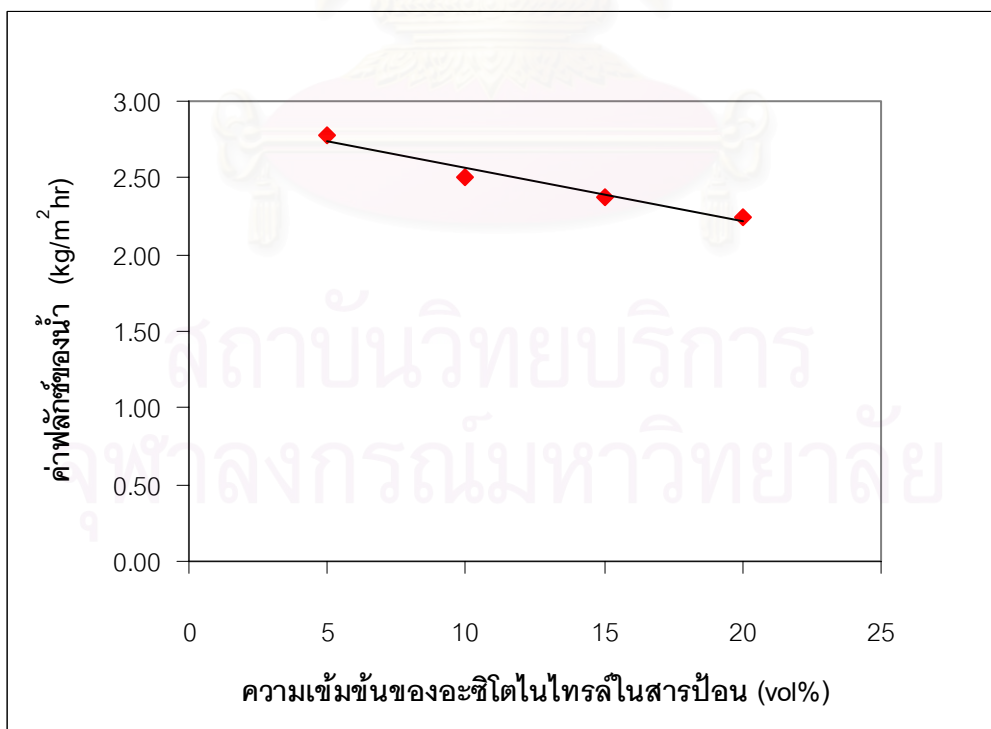
รูปที่ 4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในโพรลีนเพอมีเอท ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



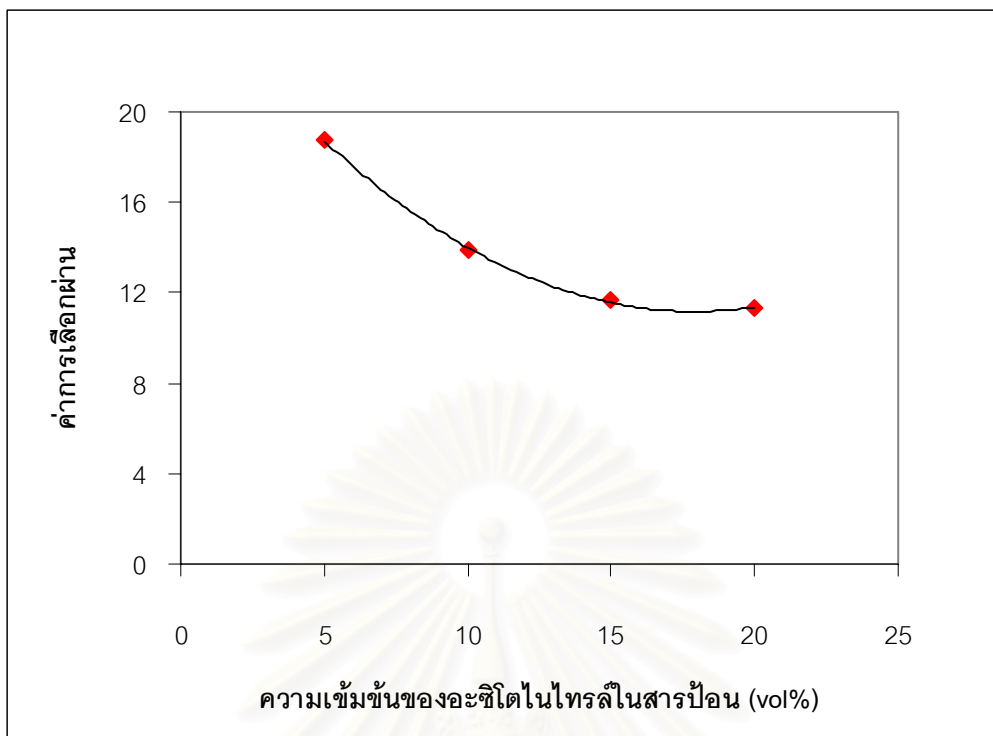
รูปที่ 4.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวม ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



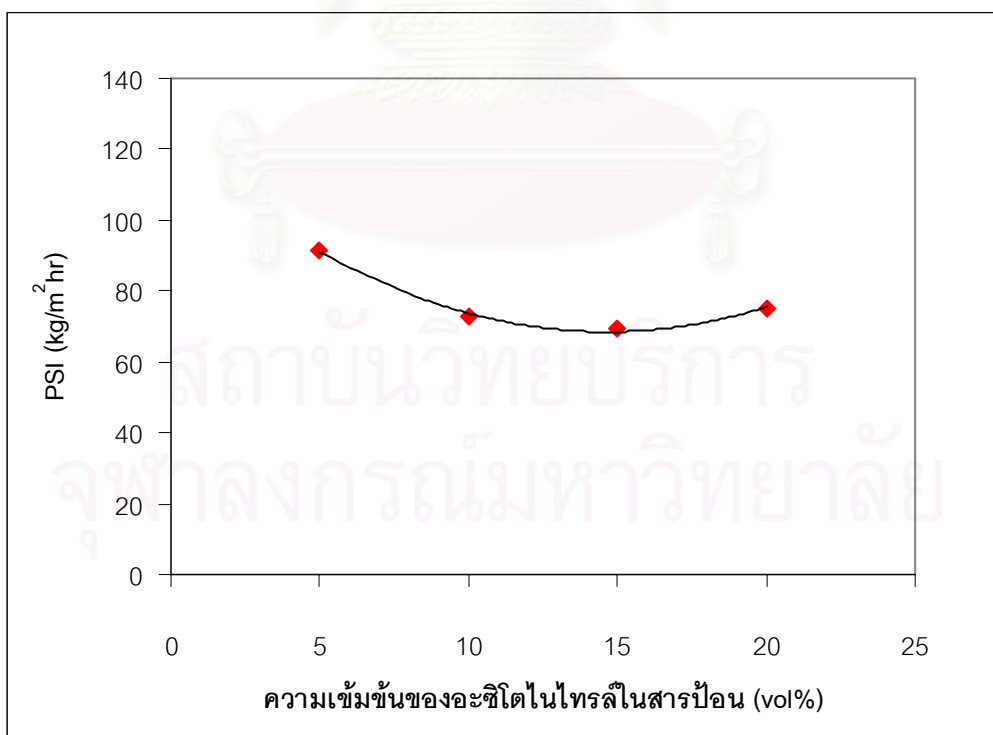
รูปที่ 4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของอะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.1.4 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.1.5 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่าการเลือกผ่าน ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ



รูปที่ 4.1.6 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อค่า PSI ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ

4.2 ผลของความดันด้านเพอมีเอท

จากการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที และความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 20, 30 และ 40 มิลลิเมตรปรอทตามลำดับ ผลของค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอท ค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ถึง 20 โดยปริมาตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.2.1 ถึง 4.2.6

จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันด้านเพอมีเอท โดยที่ความดันด้านเพอมีเอทเท่ากับ 10 มิลลิเมตรปรอท ให้ค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอทสูงสุด (ดังรูป 4.2.1)

จากรูป 4.2.2 และ 4.2.3 แสดงผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าฟลักซ์รวมและค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ จะเห็นได้ว่า เมื่อลดความดันด้านเพอมีเอทจะทำให้ค่าฟลักซ์รวมและค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น [22,25,26,32,33] เนื่องจากการลดความดันด้านเพอมีเอททำให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอทางด้านสารป้อนและความดันด้านเพอมีเอท (Δp_i) เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้กับระบบทำให้อะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอทกลายเป็นไอได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมการที่ 2.6

$$J_i = \frac{Q_i \Delta p_i}{t}$$

ส่วนค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันด้านเพอมีเอทลดลงเช่นเดียวกัน [25,32] (ดังรูป 4.2.4) ดังเช่นที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร เมื่อความดันด้านเพอมีเอทลดลงจาก 40 ถึง 10 มิลลิเมตรปรอท ให้ค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอทเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 36.40-42.83 โดยปริมาตร ค่าฟลักซ์รวม 3.77-4.87 kg/m²hr ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ 1.37-2.08 kg/m²hr และค่าฟลักซ์ของน้ำ 2.40-2.78 kg/m²hr

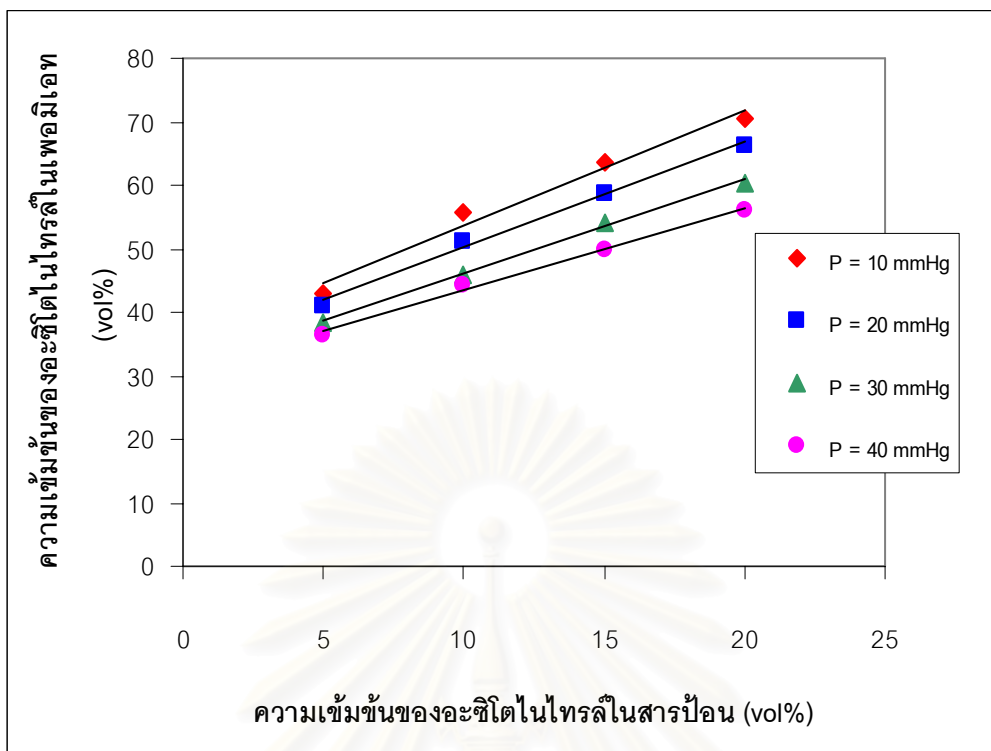
สำหรับค่าการเลือกผ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันด้านเพอมีเอท (ดังรูป 4.2.5) อาจอธิบายได้ว่า การลดความดันด้านเพอมีเอททำให้สารอินทรีย์และน้ำแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้มากขึ้น แต่อัตราส่วนของสารอินทรีย์ที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นจะมีค่ามากกว่าอัตราส่วนของน้ำที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่น ซึ่งจะเห็นได้จากค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความเข้มข้นของ

สารอินทรีย์ด้านเพอมีเอทสูงขึ้น ค่าการเลือกผ่านจึงมีค่าเพิ่มขึ้น [25,32] และจากรูปที่ 4.2.6 แสดงผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่า PSI พบว่า ค่า PSI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันด้านเพอมีเอทเช่นเดียวกันกับค่าการเลือกผ่าน โดยที่ระดับความดันด้านเพอมีเอทเท่ากับ 10 มิลลิเมตรปรอท ให้ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI สูงสุด ดังเช่นความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับ ร้อยละ 5 โดยปริมาตร และความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท ให้ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI เท่ากับ 18.75 และ 86.44 kg/m²hr ตามลำดับ และค่า PSI ที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ให้ค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า ความดันด้านเพอมีเอทมีผลต่อค่า PSI ยกเว้นที่ระดับความเข้มข้นสูงของสารป้อน

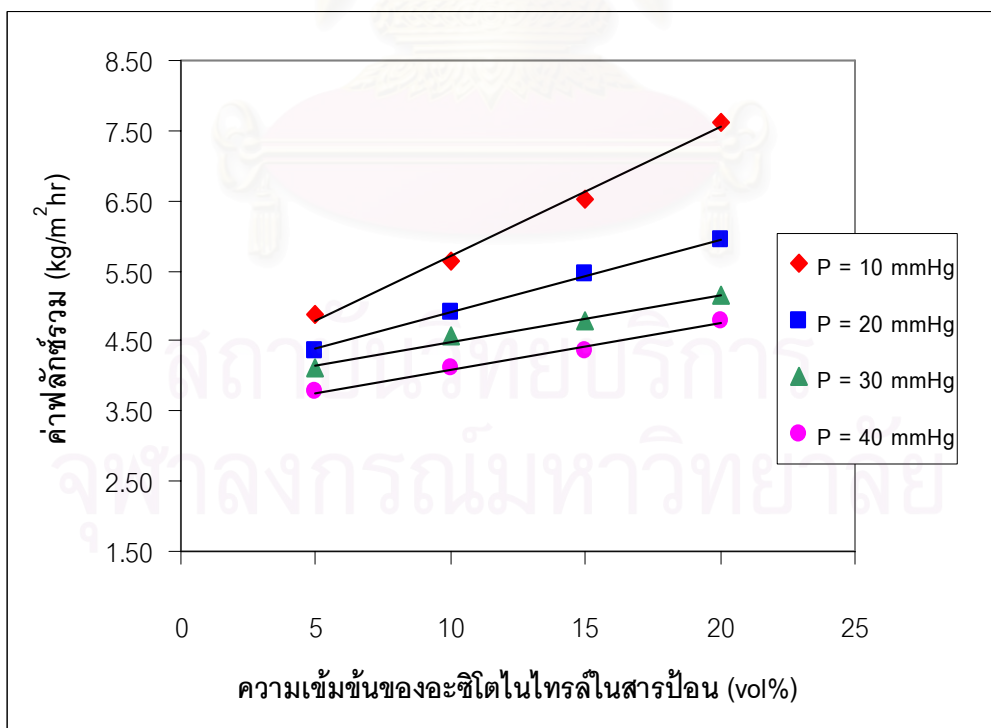
ในการทดลองนี้สภาวะที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตนไทรลออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอร์เรชัน คือ ที่ความดันด้านเพอมีเอทเท่ากับ 10 มิลลิเมตรปรอท โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้นต่ำของสารป้อน เนื่องจากสมรรถนะในการแยกมีประสิทธิภาพสูงสุด



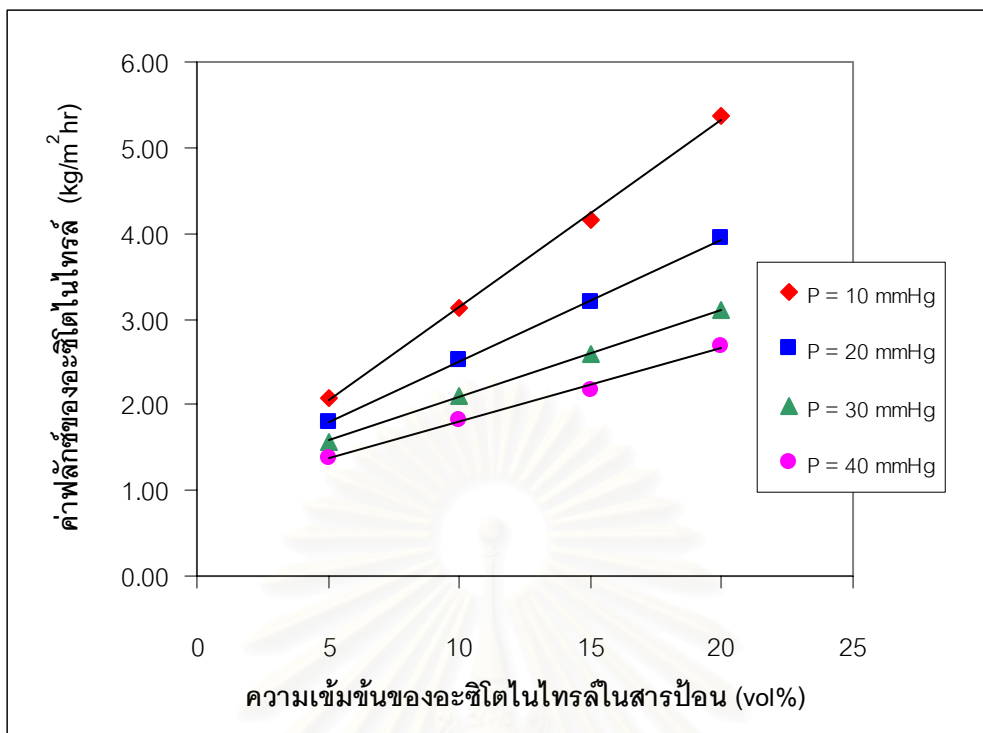
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



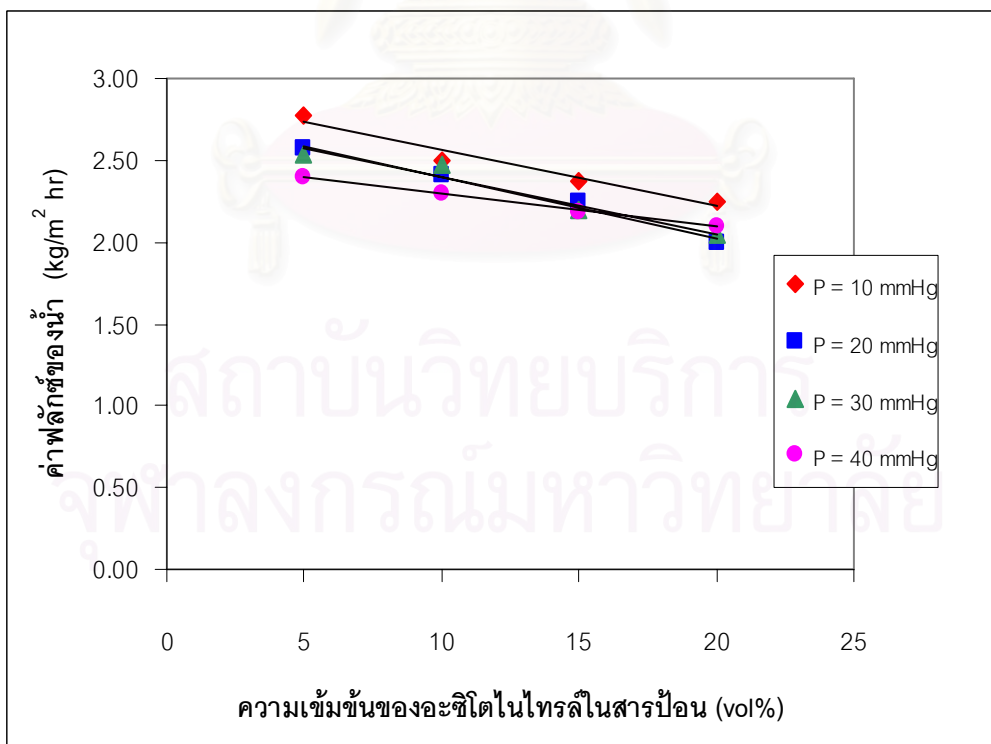
รูปที่ 4.2.1 ผลของความดันด้านเฟอมีเอทที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรลีนในเฟอมีเอท ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



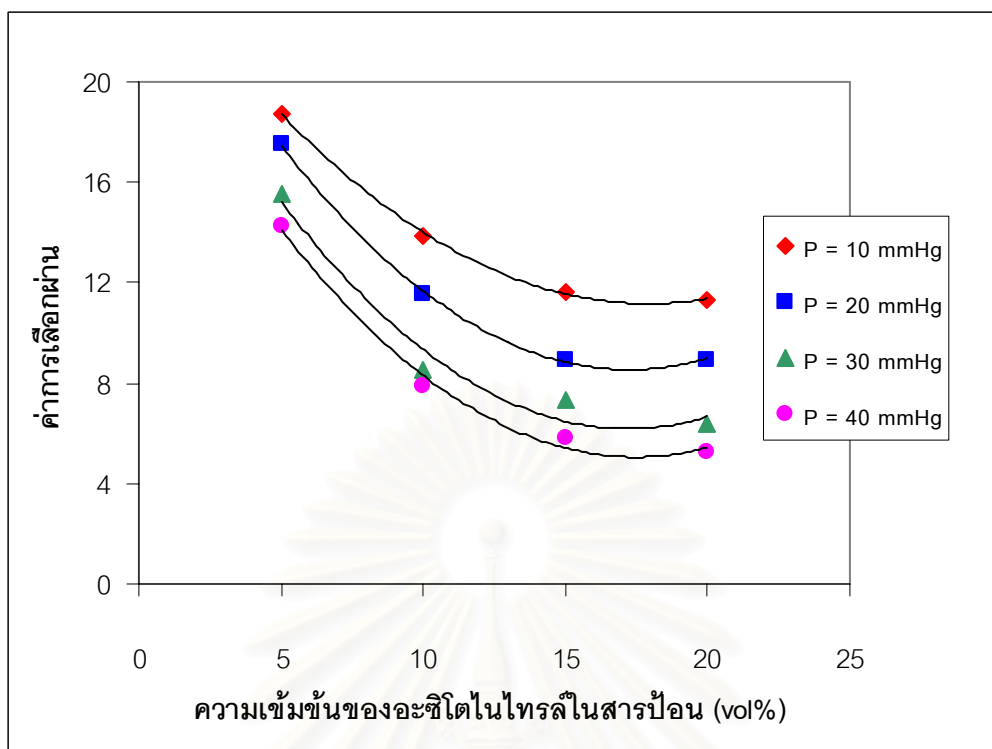
รูปที่ 4.2.2 ผลของความดันด้านเฟอมีเอทที่มีต่อค่าฟลักซ์รวม ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



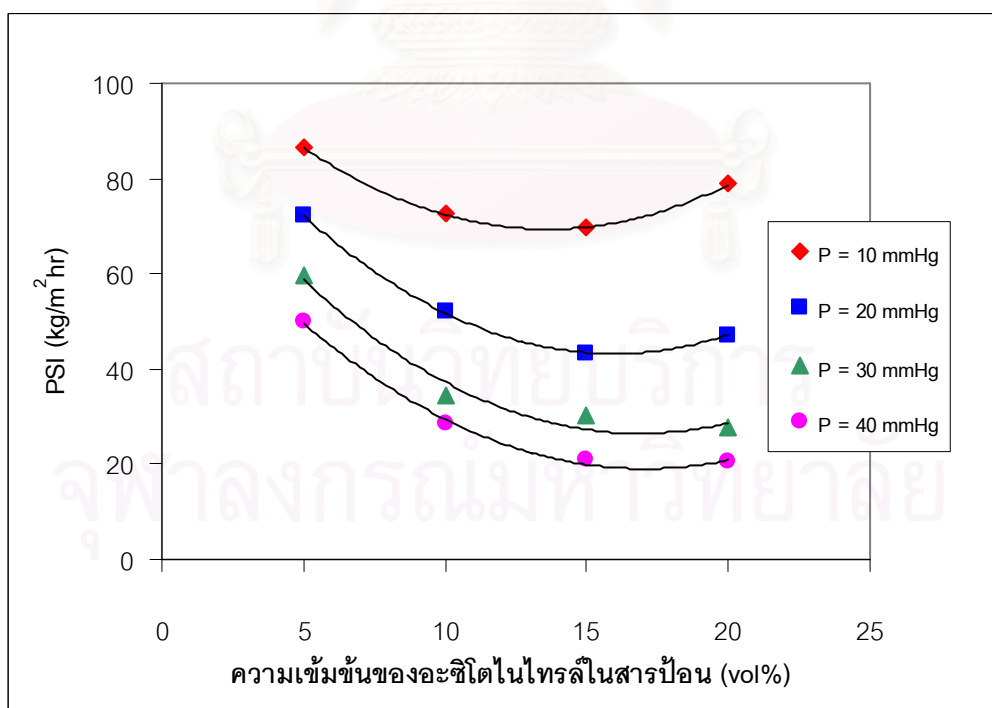
รูปที่ 4.2.3 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าฟลักซ์ของอะซิโตนในไทรล์ ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.2.4 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.2.5 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่าการเลือกผ่าน ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.2.6 ผลของความดันด้านเพอมีเอทที่มีต่อค่า PSI ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ

4.3 ผลของอุณหภูมิของสารป้อน

จากการทดลองที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 10 มิลลิเมตรปรอท และอุณหภูมิสารป้อนคงที่ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผลของค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอท ค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ถึง 20 โดยปริมาตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.3.1 ถึง 4.3.6

จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอท ค่าฟลักซ์รวม และค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อน (ดังรูป 4.3.1 ถึง 4.3.3) เนื่องจากประการแรก การเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารอินทรีย์ในน้ำ (D_i) ทั้งในสารป้อนและเยื่อแผ่น [36] ดังสมการที่ 2.9 ทำให้ค่า permeability ของสารอินทรีย์ (Q_i) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.7

$$D_i = D_{i0} \exp(-Ed / RT)$$

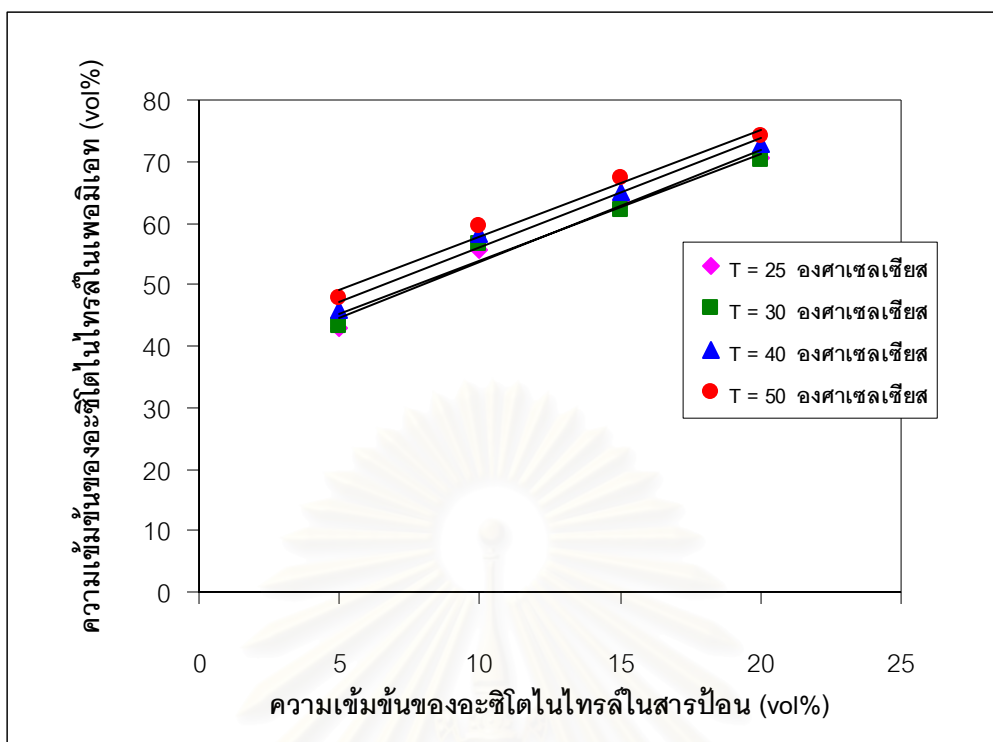
$$Q_i = f^n [D_i(c_i), S_i(c_i)]$$

ประการที่สอง การเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนมีผลทำให้ความดันไอของน้ำและสารอินทรีย์สูงขึ้น ความแตกต่างของความดันไอด้านสารป้อนกับความดันด้านเพอมีเอทจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วทั้งสองประการ จึงกล่าวได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนทำให้ค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอท ค่าฟลักซ์รวม และค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น [25,29,32,33,35,37] ดังเช่นที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร เมื่ออุณหภูมิของสารป้อนเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส ให้ค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรลีนเพอมีเอทเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42.83-47.73 โดยปริมาตร ค่าฟลักซ์รวม 4.87-5.67 kg/m²hr และค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ 2.08-2.71 kg/m²hr

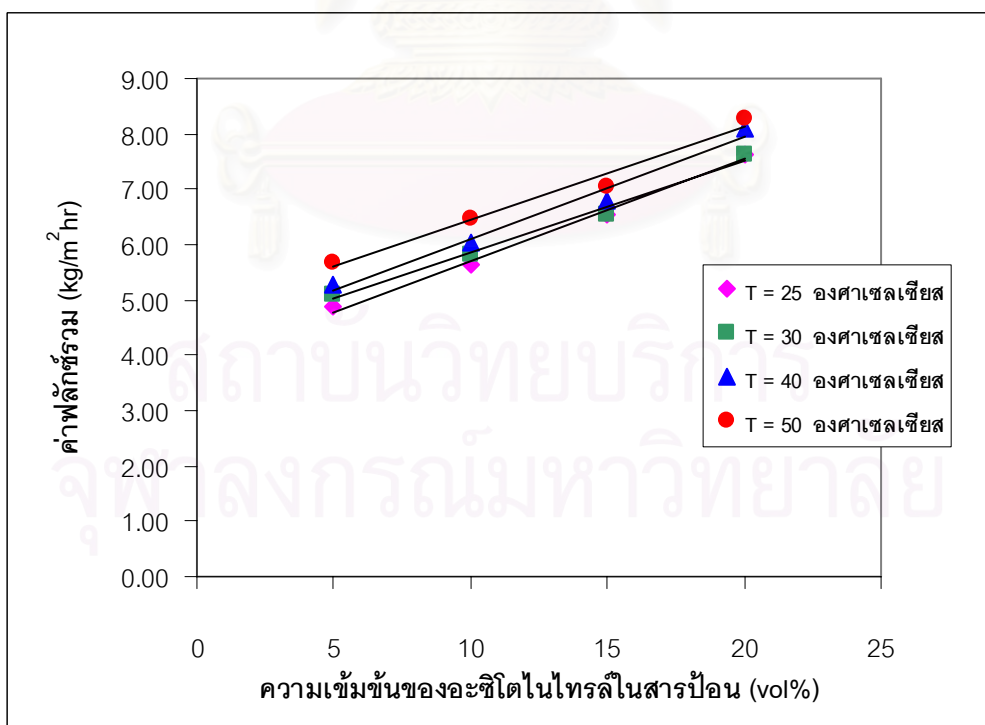
ส่วนค่าฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อน [32] ดังรูปที่ 4.3.4 ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติพบว่า ในทุกระดับอุณหภูมิของสารป้อนให้ค่าฟลักซ์ของน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า อุณหภูมิของสารป้อนไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ

จากรูปที่ 4.3.5 แสดงผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีผลต่อค่าการเลือกผ่าน พบว่า ค่าการเลือกผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อน [32] อาจเนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และทำให้ความดันไอของสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งเป็นตัวช่วยในการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้กับระบบ ดังเหตุผลเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และจากรูปที่ 4.3.6 แสดงค่า PSI พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสารป้อนเพิ่มขึ้น ค่า PSI มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติพบว่า ที่ความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ทั้งค่าการเลือกผ่านและค่า PSI มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของสารป้อนมีผลต่อค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ที่ความเข้มข้นต่ำของ สารป้อน ดังเช่นความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับร้อยละ 5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ให้ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI เท่ากับ 30.33 และ 166.30 kg/m²hr ตามลำดับ แต่ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ที่อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 40 และ 50 องศาเซลเซียส มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า สมรรถนะในการแยกอะซิโตนไทรลออกจากสารละลายของสารป้อนทั้ง 2 อุณหภูมิมีประสิทธิภาพในการแยกเหมือนกัน

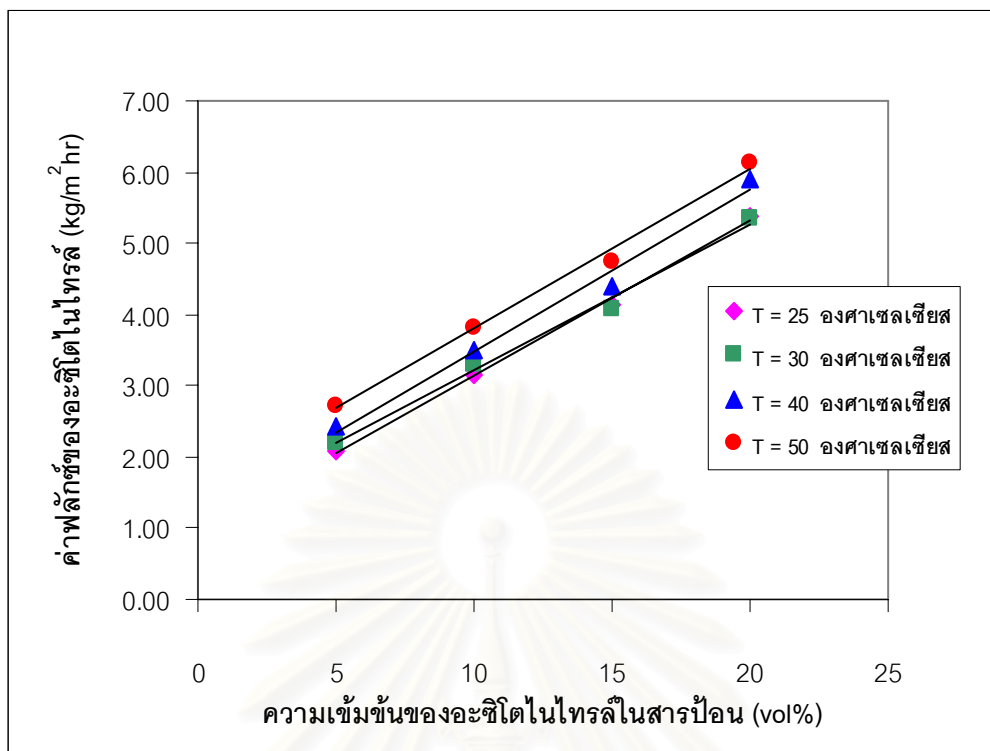
ในการทดลองนี้สภาวะที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตนไทรลออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอร์ชัน คือ ที่อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้นต่ำของสารป้อน เนื่องจากสมรรถนะในการแยกมีประสิทธิภาพสูงสุด และสาเหตุที่เลือกอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้สมรรถนะในการแยกเช่นเดียวกับที่ 50 องศาเซลเซียส แต่ใช้พลังงานในการให้ความร้อนต่ำกว่า



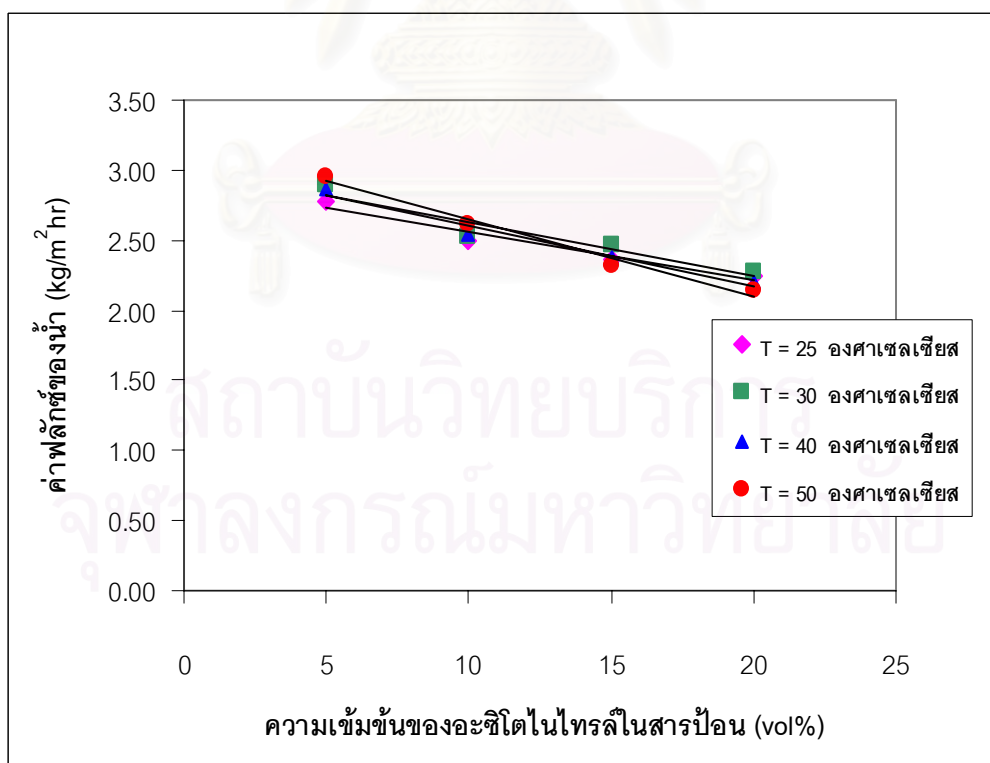
รูปที่ 4.3.1 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรอลีนเพอมีเอท ที่อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



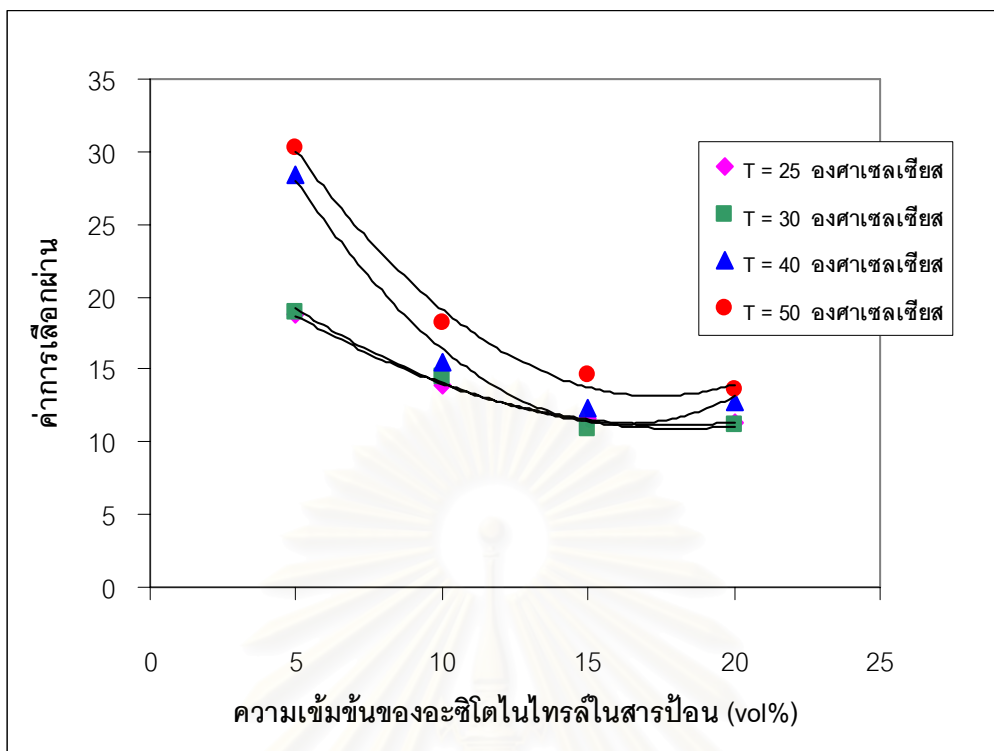
รูปที่ 4.3.2 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวม ที่อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



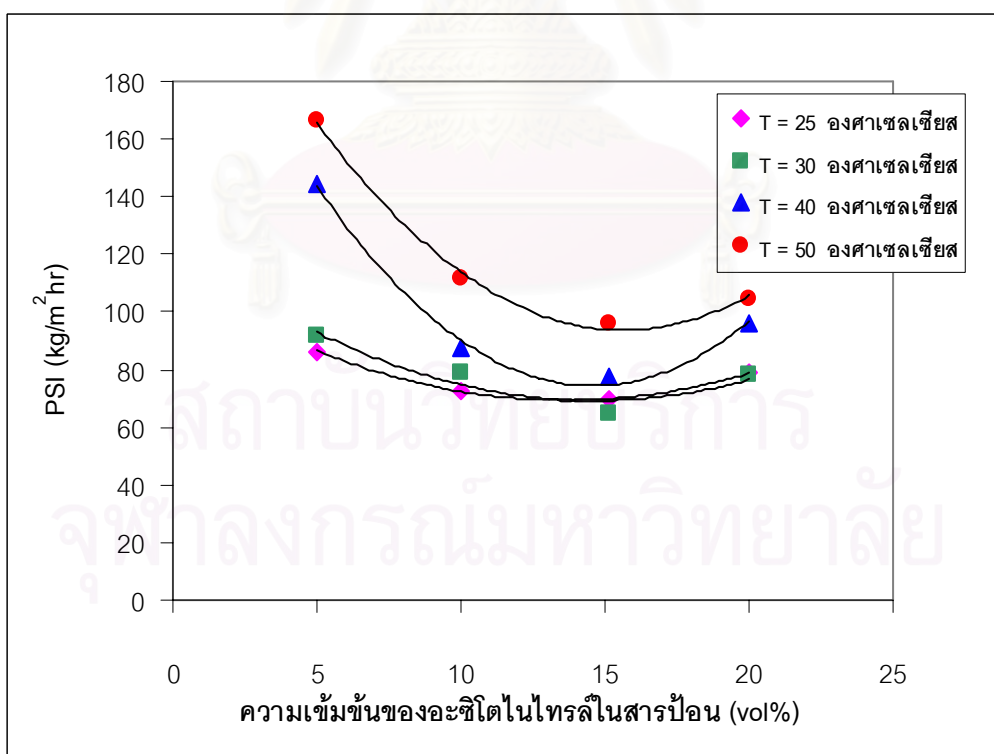
รูปที่ 4.3.3 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของอะซิโตนในไตรล์ ที่อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.3.4 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ที่อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.3.5 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่าการเลือกผ่าน ที่อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.3.6 ผลของอุณหภูมิของสารป้อนที่มีต่อค่า PSI ที่อัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ

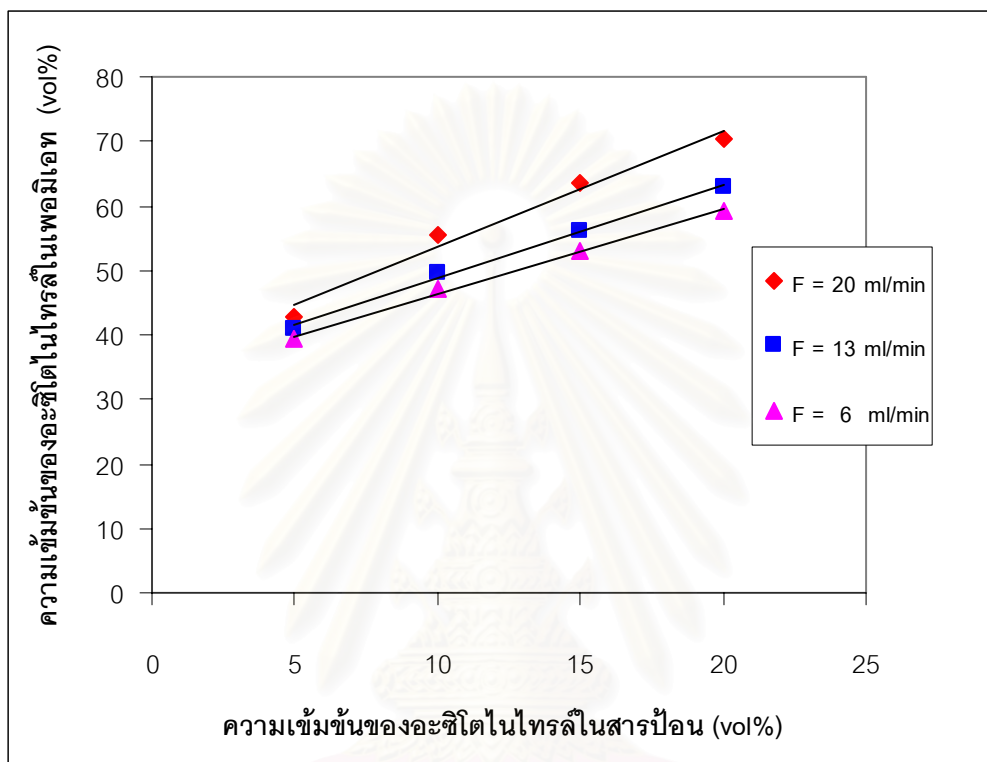
4.4 ผลของอัตราการไหลของสารป้อน

จากการทดลองที่ความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 10 มิลลิเมตรปรอท คุณหมุมิสารป้อนคงที่ 25 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 6 และ 13 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ผลของค่าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์ในเพอมีเอท ค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่าน ที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ถึง 20 โดยปริมาตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.4.1 ถึง 4.4.6

จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์ในเพอมีเอทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อน (ดังรูป 4.4.1) และสำหรับค่าฟลักซ์รวม ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ และค่าฟลักซ์ของน้ำ ก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับค่าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์ในเพอมีเอท (ดังรูป 4.4.2 ถึง 4.4.4) ซึ่งอาจอธิบายได้ว่า อัตราการไหลของสารป้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ชั้นขอบเขตของเหลวของน้ำและสารอินทรีย์บางลง รวมทั้งทำให้ผลของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (CP) น้อยลงด้วย น้ำและสารอินทรีย์จึงแพร่ผ่านชั้นขอบเขตของเหลวได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เอง จึงทำให้ค่าฟลักซ์รวม ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ และค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้น [20,26,29,32] ดังเช่นที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร เมื่ออัตราการไหลของสารป้อนเพิ่มขึ้นจาก 6 ถึง 20 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์ในเพอมีเอทเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 39.40-42.83 โดยปริมาตร ค่าฟลักซ์รวม 3.99-4.87 kg/m²hr ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ 1.57-2.08 kg/m²hr และค่าฟลักซ์ของน้ำ 2.42-2.78 kg/m²hr

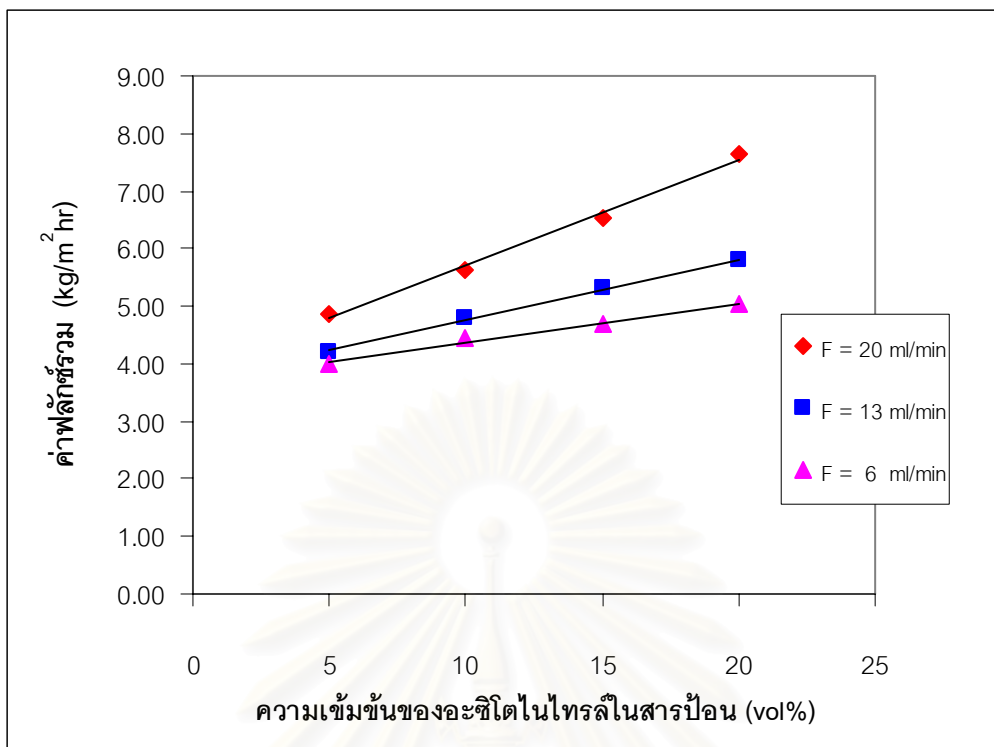
ส่วนค่าการเลือกผ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อน (ดังรูป 4.4.5) อาจอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารอินทรีย์ (ฟลักซ์ของอะซิโตนไทรล์) มีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำ (ฟลักซ์ของน้ำ) ซึ่งน่าจะเป็นเพราะว่าสารป้อนเป็นสารละลายเจือจาง ปริมาณสารอินทรีย์ในสารป้อนมีน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของน้ำ ดังนั้น เมื่อเปลี่ยนแปลงภาวะของอัตราการไหลจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ค่าการเลือกผ่านเพิ่มขึ้น [32] สำหรับค่า PSI ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนเช่นเดียวกัน (ดังรูป 4.4.6) และที่ความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 15 และ 20 โดยปริมาตร ของค่าการเลือกผ่านและที่ร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรของค่า PSI ให้ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า อัตราการไหลของสารป้อนมีผลต่อค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ที่ระดับความเข้มข้นต่ำของสารป้อน ดังเช่นความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับร้อยละ 5 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของสารป้อน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI เท่ากับ 18.75 และ 86.44 kg/m²hr ตามลำดับ

ในการทดลองนี้สภาวะที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตนไทรล์ออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน คือ ที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้นต่ำของสารป้อน เนื่องจากสมรรถนะในการแยกมีประสิทธิภาพสูงสุด

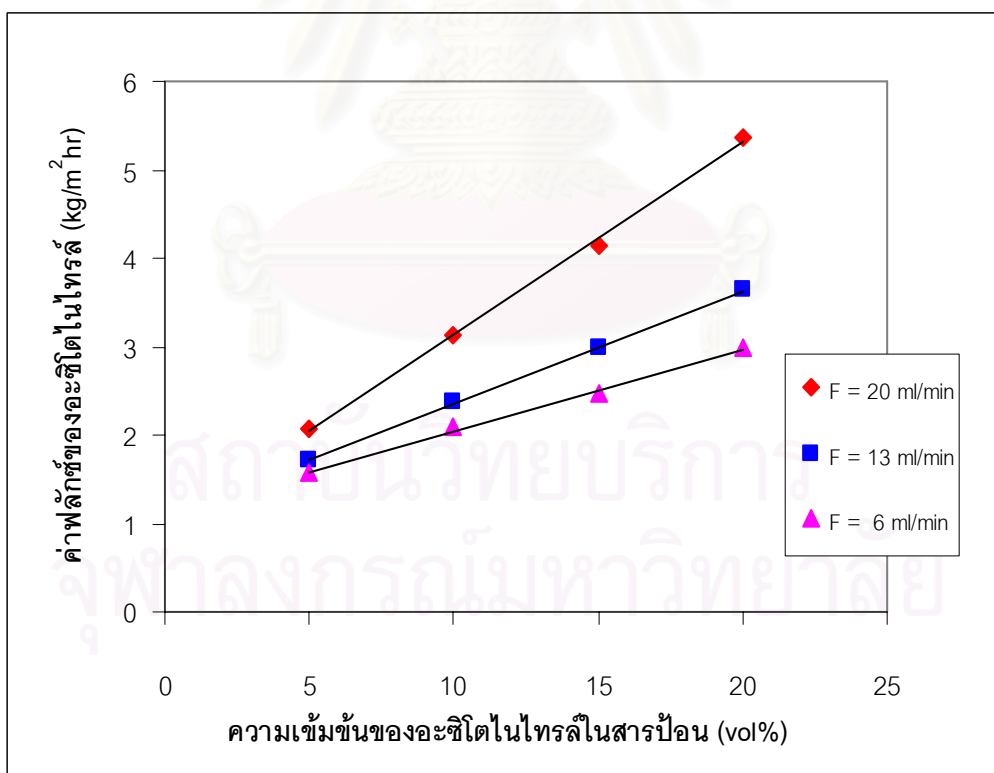


รูปที่ 4.4.1 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์ในเพอเมต ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอเมต 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ

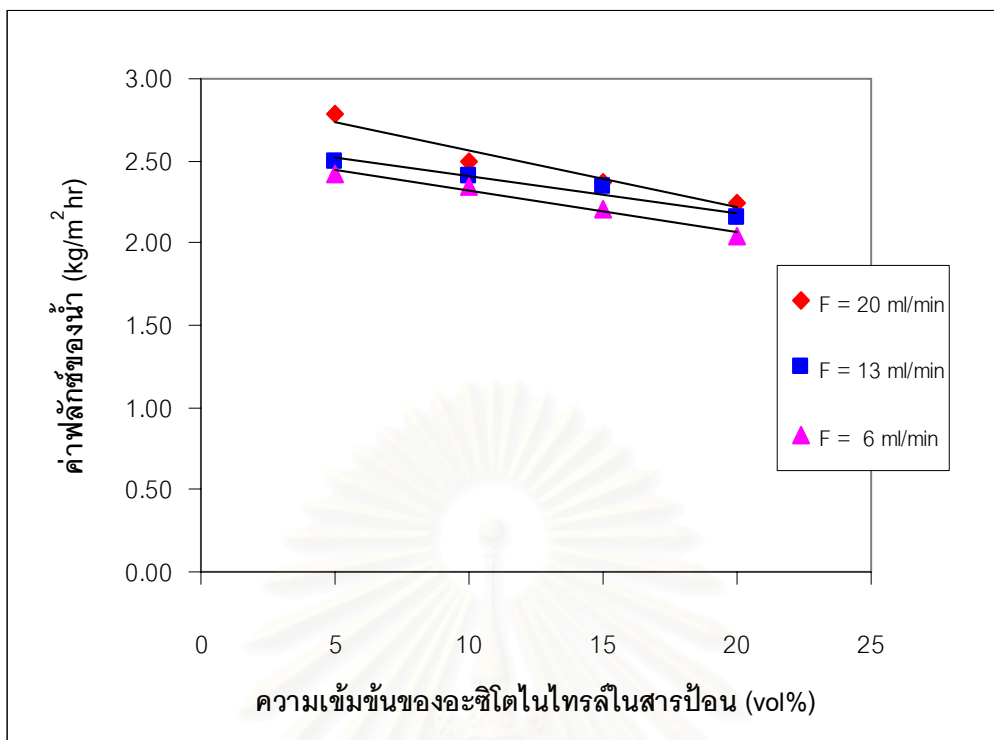
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



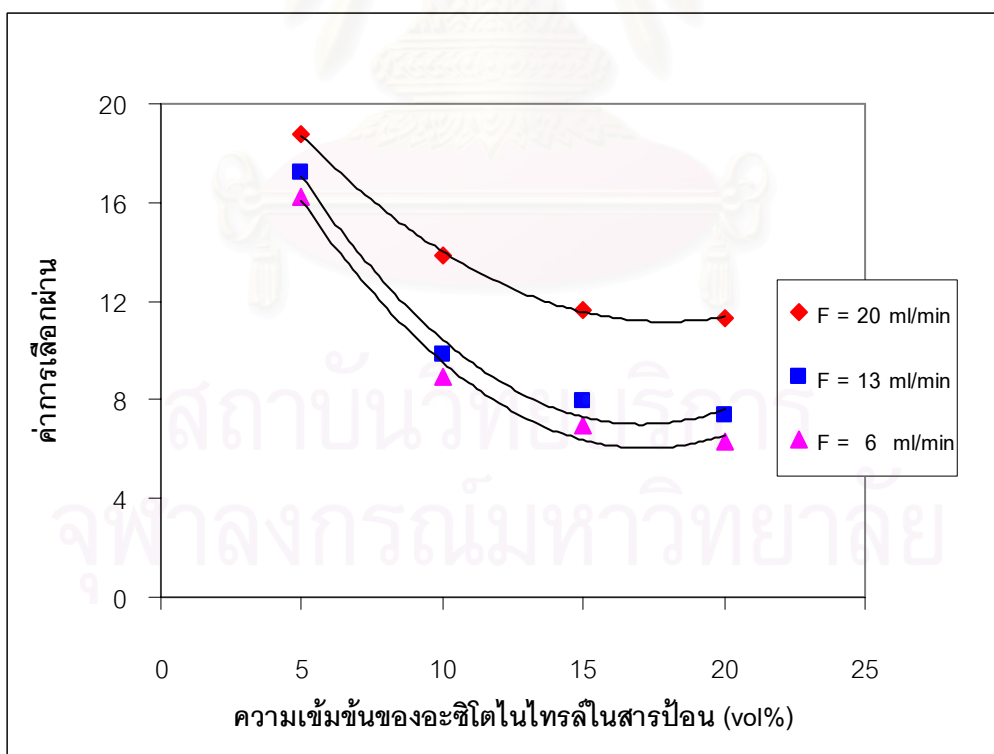
รูปที่ 4.4.2 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าพลังความร้อน ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



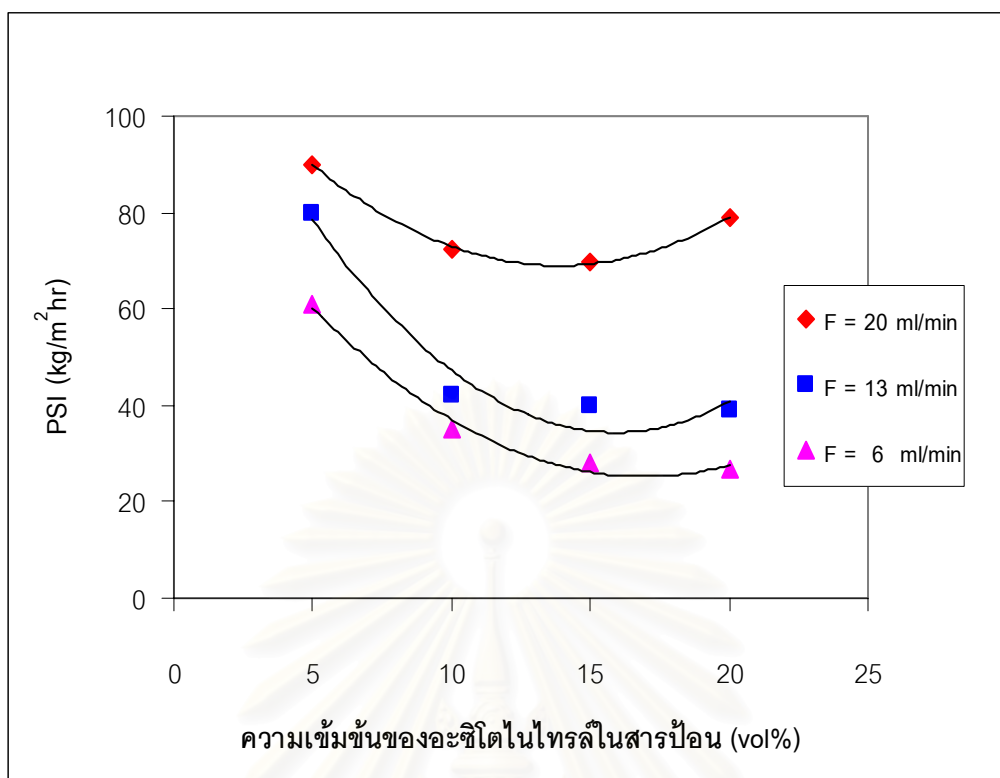
รูปที่ 4.4.3 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าพลังของอะซิโตนในไทรลีน ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.4.4 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.4.5 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่าการเลือกผ่าน ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.4.6 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนที่มีต่อค่า PSI ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °C ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5 ,10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ

4.5 เปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอร์ชันในการแยกอะซิโตไนไทรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนไทรล์ และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC

จากผลการทดลองในข้อ 4.1 ถึง 4.4 สภาวะที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตไนไทรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนไทรล์ คือ ที่ความเข้มข้นของสารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความดันด้านเพอมีเอทคงที่ 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อนคงที่ 40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 20 มิลลิลิตรต่ออนาที ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงใช้สภาวะดังกล่าวในการแยกอะซิโตไนไทรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ซึ่ง ผลของค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนไทรล์ในเพอมีเอท ค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.5.1 ถึง 4.5.6

จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของอะซิโตไนไทรล์ในเพอมีเอท ค่าฟลักซ์รวมและค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ของทั้งน้ำเสียจากเครื่อง HPLC และของผสมน้ำ-อะซิโตไนไทรล์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันตามระดับความเข้มข้นของอะซิโตไนไทรล์ในสารป้อน (ดังรูปที่ 4.5.1 ถึง 4.5.3) แต่ค่าฟลักซ์รวมและค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ของน้ำเสียจากเครื่อง HPLC มีค่าน้อยกว่าของผสมน้ำ-อะซิโตไนไทรล์เล็กน้อย อาจเนื่องมาจากในน้ำเสียจากเครื่อง HPLC มีสารอินทรีย์ชนิดอื่นเจือปนอยู่ ซึ่งอาจจะบดบังหรือกีดขวางการดูดซับโมเลกุลของอะซิโตไนไทรล์ของเยื่อแผ่นได้ ดังนั้นจึงทำให้เยื่อแผ่นดูดซับโมเลกุลของอะซิโตไนไทรล์ได้น้อยลง ส่วนค่าฟลักซ์ของน้ำในน้ำเสียจากเครื่อง HPLC และของผสมน้ำ-อะซิโตไนไทรล์ พบว่ามีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (ดังรูป 4.5.4)

สำหรับค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ของน้ำเสียจากเครื่อง HPLC และของผสมน้ำ-อะซิโตไนไทรล์ จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารป้อนเพิ่มขึ้น โดยค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ของตัวอย่างน้ำทั้งสองชนิดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นต่ำของสารป้อน แล้วลดลงอย่างช้าๆ เช่นเดียวกันในช่วงความเข้มข้นสูงของสารป้อน (ดังรูป 4.5.5 ถึง 4.5.6) และจากการทดสอบทางสถิติพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนไทรล์ในเพอมีเอท ค่าฟลักซ์รวม ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ ค่าฟลักซ์ของน้ำ ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ของน้ำเสียจากเครื่อง HPLC และของผสมน้ำ-อะซิโตไนไทรล์ พบว่า ตัวอย่างน้ำทั้งสองชนิดให้ค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะในการแยกอะซิโตไนไทรล์ออก

จากของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน ไม่แตกต่างกัน

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันในการแยก อะซิโตไนโตรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC พบว่า กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันสามารถแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำเสียได้จริง ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันมาประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจากการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่มีความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร พบว่า กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันสามารถบำบัดอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำเสียได้ร้อยละ 33.46 (ดังตารางที่ 4.1) และหากทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง คาดว่าจะสามารถบำบัดอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำเสียได้ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการบำบัดอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

Sample	Concentration of acetonitrile in HPLC wastewater (vol%)		Wastewater treatment Efficiency (%) [[1-2)/1]*100
	Feed (1)	Retentate (2)	
1	5.18	3.46	33.20
2	5.25	3.46	34.10
3	5.30	3.46	34.34
4	5.21	3.45	33.78
5	5.09	3.49	31.43
6	5.16	3.42	33.72
Mean	5.20	3.46	33.46

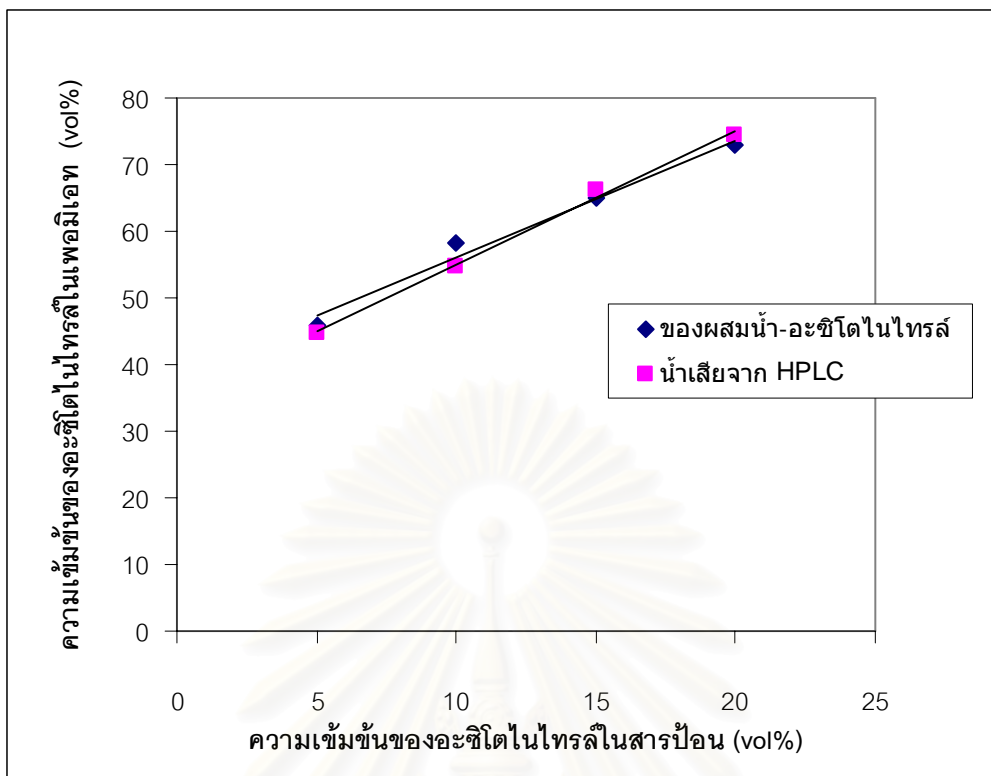
นอกจากจะสามารถประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังมีความเป็นไปได้ที่จะนำกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันมาประยุกต์ใช้เพื่อนำสารอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจากการคำนวณประสิทธิภาพในการคืนกลับ (Recovery efficiency) ของอะซิโตไนโตรล์ พบว่า การแยกอะซิโตไนโตรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่มีความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ด้วยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันให้ประสิทธิภาพในการคืนกลับร้อยละ 33.60

(ดังตารางที่ 4.2) และให้ความเข้มข้นของอะซิโตไนไทรล์ในเฟอมีเอทโดยเฉลี่ยร้อยละ 44.83 โดยปริมาตร และจากค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนไทรล์ในเฟอมีเอท ดังกล่าวจะเห็นได้ว่ายังมีน้ำเจือปนอยู่ อาจเป็นเพราะเยื่อแผ่น PTFE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเยื่อแผ่นแบบมีรูพรุน จึงทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเยื่อแผ่นลงมาได้ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของอะซิโตไนไทรล์ จึงทำให้น้ำแพร่ผ่านเยื่อแผ่นลงมาได้ง่ายกว่า ประกอบกับเยื่อแผ่น PTFE อาจจะไม่เหมาะสมได้อันเนื่องมาจากมีความทนทานต่ออะซิโตไนไทรล์ได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเยื่อแผ่นลงมาได้ และจากค่าประสิทธิภาพการคืนกลับ คาดว่าหากทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง จะสามารถดึงอะซิโตไนไทรล์ออกจากน้ำเสียได้ ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

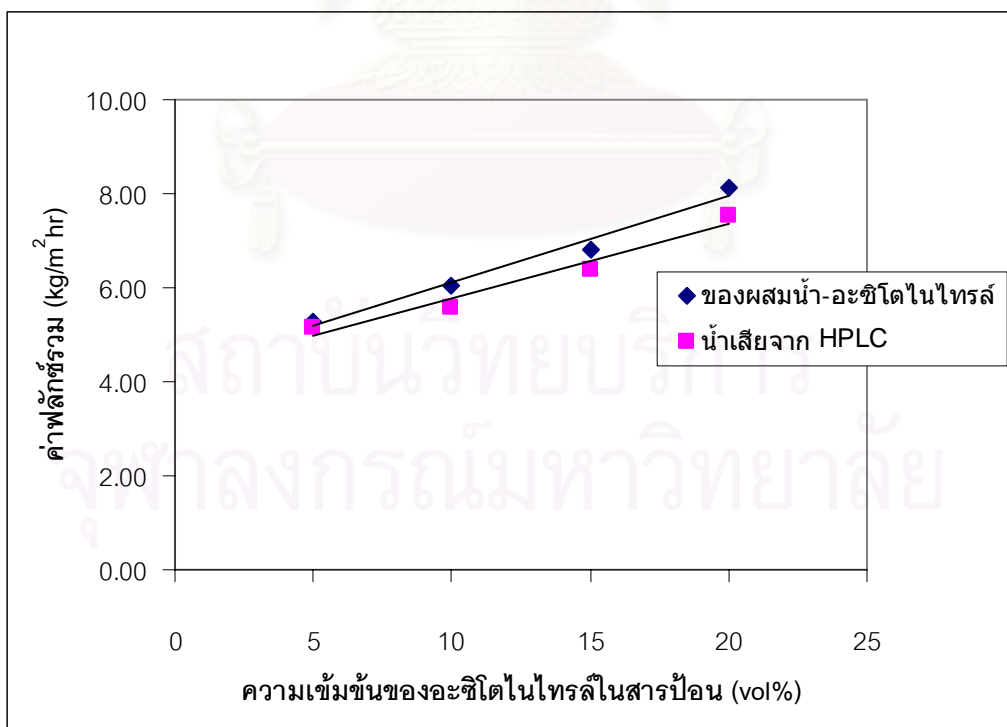
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการคืนกลับของอะซิโตไนไทรล์

Sample	Volume of acetonitrile (ml)		Concentration of acetonitrile in permeate (vol%)	Recovery Efficiency (%) (2/1)*100
	Feed (1)	Permeate (2)		
1	10	3.36	44.78	33.60
2	10	3.37	44.51	33.70
3	10	3.32	44.69	33.20
4	10	3.38	45.15	33.80
5	10	3.31	44.85	33.10
6	10	3.43	45.00	34.30
Mean	10	3.36	44.83	33.60

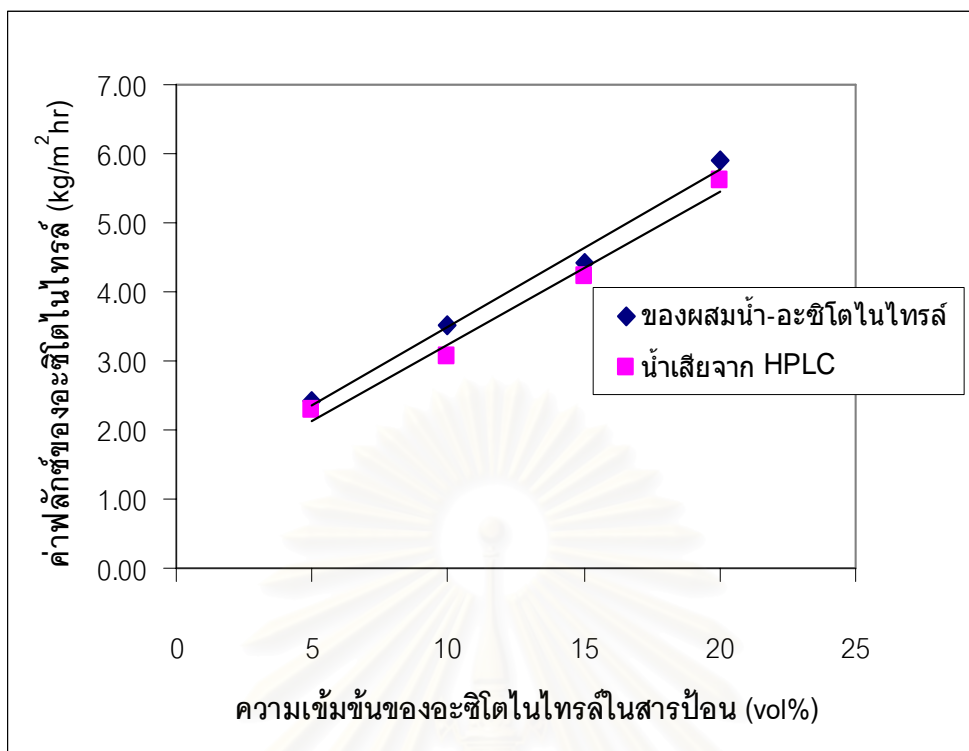
หมายเหตุ : เตรียมสารป้อนที่มีความเข้มข้นของอะซิโตไนไทรล์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ในสารละลาย 200 มิลลิลิตร



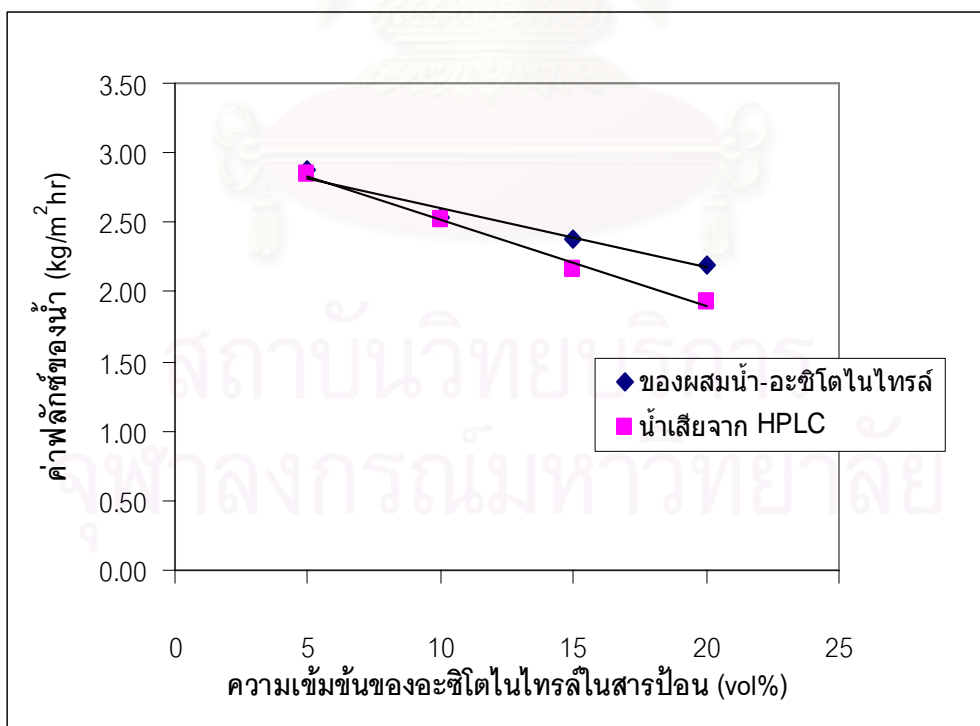
รูปที่ 4.5.1 แสดงค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรล์ในเพอเมตของการแยกอะซิโตนในไทรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอเมต 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



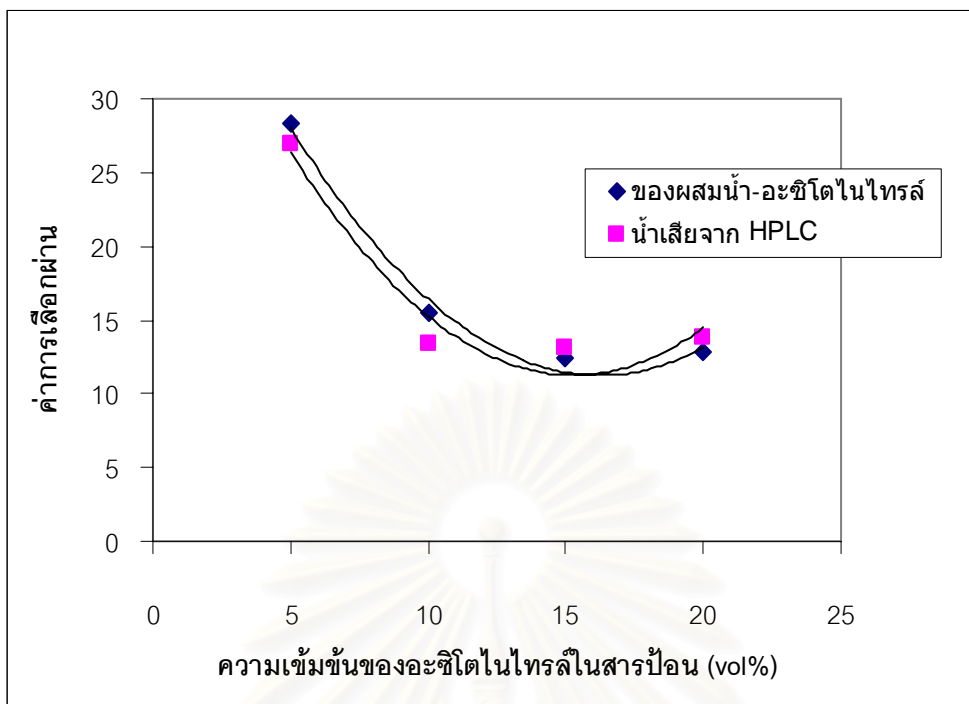
รูปที่ 4.5.2 แสดงค่าฟลักซ์รวมของการแยกอะซิโตนในไทรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอเมต 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



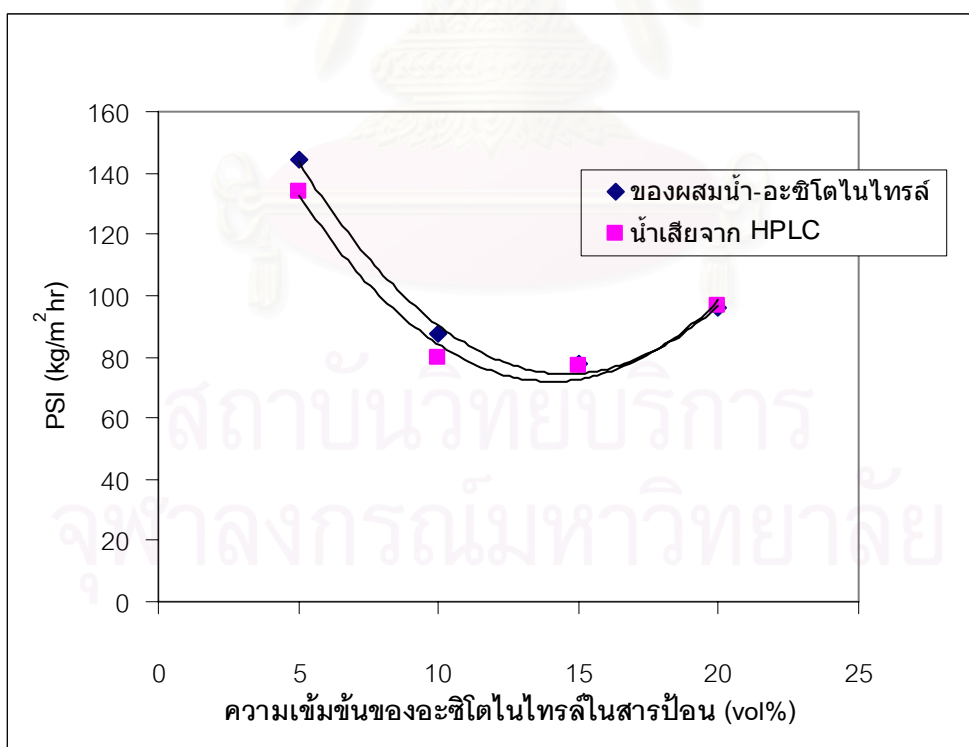
รูปที่ 4.5.3 แสดงค่าฟลักซ์ของอะซิโตนในไทรล์ของการแยกอะซิโตนในไทรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.5.4 แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำของการแยกอะซิโตนในไทรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.5.5 แสดงค่าการเลือกผ่านจากการแยกอะซิโตนในไตรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.5.6 แสดงค่า PSI จากการแยกอะซิโตนในไตรล์ออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ความดันด้านเพอมีเอท 10 mmHg อุณหภูมิสารป้อน 40 °C และอัตราการไหลสารป้อน 20 ml/min ที่ความเข้มข้นของสารป้อนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ตามลำดับ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการแยกอะซิโตนในไทรล์ออกจากสารละลายเจือจางโดยกระบวนการเพอร์แวนพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน ที่ระดับความเข้มข้นของสารป้อนในช่วงร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร ความดันด้านเพอมีเอทในช่วง 10-40 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิของสารป้อนในช่วง 25-50 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อนในช่วง 6-20 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการประเมินสมรรถนะในการแยกได้จากค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่าน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารป้อน จะทำให้ค่าฟลักซ์รวมและค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นแต่ค่าฟลักซ์ของน้ำกลับมีค่าลดลง และอุณหภูมิของสารป้อนไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ ส่วนการลดความดันด้านเพอมีเอทและการเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนจะทำให้ค่าฟลักซ์รวม ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์และค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้น สำหรับค่าการเลือกผ่านและค่า PSI นั้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนจะทำให้ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI ลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารป้อนหรือการลดความดันด้านเพอมีเอท จะทำให้ค่าการเลือกผ่านและค่า PSI เพิ่มขึ้น และที่ระดับความเข้มข้นต่ำของสารป้อน ความดันด้านเพอมีเอท อุณหภูมิของสารป้อน และอัตราการไหลของสารป้อน จะมีผลต่อค่าการเลือกผ่านและค่า PSI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สภาวะที่เหมาะสมในการแยกอะซิโตนในไทรล์ออกจากสารละลายเจือจางด้วยกระบวนการเพอร์แวนพอเรชัน คือ ที่ระดับความเข้มข้นของอะซิโตนในไทรล์ในสารป้อนที่ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิของสารป้อน 40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งให้ค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในเพอมีเอทร้อยละ 45.81 โดยปริมาตร ค่าฟลักซ์รวม ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์และค่าฟลักซ์ของน้ำเท่ากับ 5.29, 2.42 และ 2.87 $\text{kg/m}^2\text{hr}$ ตามลำดับ ให้ค่าการเลือกผ่าน 28.33 และค่า PSI 144.58 $\text{kg/m}^2\text{hr}$

สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันในการแยกอะซิโตไนโตรลออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรลและน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน พบว่า สมรรถนะในการแยกอะซิโตไนโตรลออกจากตัวอย่างน้ำทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกัน ซึ่งการแยกอะซิโตไนโตรลออกจากน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ให้ค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรลในเพอมีเอทร้อยละ 44.66 โดยปริมาตร ค่าฟลักซ์รวม ค่าฟลักซ์ของสารอินทรีย์ และค่าฟลักซ์ของน้ำเท่ากับ 5.16, 2.30 และ 2.85 kg/m²hr ตามลำดับ ให้ค่าการเลือกผ่าน 27.00 และค่า PSI 134.16 kg/m²hr และจากสมรรถนะในการแยกอะซิโตไนโตรลออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรลและน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่ไม่แตกต่างกัน แสดงว่ากระบวนการเพอร์แวกพอเรชันสามารถแยกอะซิโตไนโตรลออกจากน้ำเสียได้ โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและประสิทธิภาพในการคืนกลับของสารโดยเฉลี่ยร้อยละ 33.46 และ 33.60 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดลองนี้ใช้เยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีนแบบมีรูพรุน (Microporous membrane) ประกอบกับเยื่อแผ่น PTFE อาจมีความทนทานต่ออะซิโตไนโตรลได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้ความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรลในเพอมีเอทมีค่าไม่สูงมากนัก ดังนั้น เพื่อให้การแยกมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ควรมีการทดลองแยกสารละลายอะซิโตไนโตรลด้วยเยื่อแผ่นพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีนแบบไม่มีรูพรุน (Nonporous membrane) หรือทำการศึกษาด้วยเยื่อแผ่นชนิดอื่นๆ ซึ่งน่าจะทำให้ความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรลในเพอมีเอทมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งสามารถใช้เป็นข้อเปรียบเทียบในการศึกษาได้

5.2.2 ควรมีการศึกษาด้วยโมดูลของเยื่อแผ่นประเภทอื่นๆ นอกเหนือจากโมดูลแบบแผ่นเรียบ เพื่อเพิ่มผิวที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นให้มากขึ้นและเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มค่าฟลักซ์ของสารซึ่งจะสามารถดึงกลับสารได้มากยิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถใช้เป็นข้อเปรียบเทียบในการศึกษาการแยกสารละลายอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการลดต้นทุนทางด้านพลังงานของกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันร่วมด้วย เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษากระบวนการเพอร์แวกพอเรชันที่เป็นระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous) ต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Long, R. 1995. Separation Process in Waste Minimization. New York : Marcel Dekker.
2. Feng, X.; and Huang, R. Y. M. 1997. Liquid Separation by Membrane Pervaporation: a review. Industrial & Engineering Chemistry Research 36 : 1048.
3. Wang, H.; Tanaka, H.; Kita, H.; and Okamoto K. 1999. Pervaporation of Aromatic/ Non-Aromatic Hydrocarbon Mixture through Plasma-Grafted Membranes. Journal of Membrane Science 154: 221-228.
4. Dutta, B. K., et al. 1996. Pervaporation: Principles and Applications. Separation and Purification Methods 25(2): 131-224.
5. Rautenbach, R.; and Albrecht, R. 1995. The Separation Potential of Pervaporation: Part 2. Process Design and Economics. Journal of Membrane Science 25: 25-54.
6. Ho, W. S. W.; and Sirkar, K. K. 1992. Membrane Handbook. New York : Van nostrand Reinhold.
7. Slanley, A. 1994. Pervaporation Finds its Niche. Chemical Engineering 101(9): 34.
8. Barber, T. A.; and Miller, B. D. 1994. Pervaporation Technology: Fundamental and Environmental Application. Chemical Engineering 101(9): 88.
9. Nunes, S. P.; and Peinemann, K. V. 2001. Membrane Technology in the Chemical Industry Newyork : Wiley-VCH. 287-288.
10. Flemming, H. L.; and Slater, C. S. 1992. Membrane Handbook New York : Van nostrand Reinhold. 105-159.
11. Drioli, E.; and Romano, M. 2001. Progress and New Perspectives on Intergraded Membrane Operations for Sustainable Industrial Growth. Industrial & Engineering Chemistry Research 40: 1277-1300.
12. Chen, M. S. K.; Markiewicz, G. S.; and Venugopal, K. G. 1989. Development of Membrane Pervaporation TRIMTM Process for Methanol Recovery From CH₃OH/MTBE/C₄ Mixture. Membrane Saparation in Chemical Engineering AIChE Symposium 85: 82-88.

13. Karisson, H. O. E.; and Tragardh, G. 1993. Pervaporation of Dilute Organic-Water mixtures. A Literature Review on modeling Studies and Applications to Aroma Compound Recovery. Journal of Membrane Science 76: 121-146.
14. Wijmans, J. G.; and Baker, R. W. 1995. The Solution-Difussion Model: A Review. Journal of Membrane Science 107: 1-21.
15. Groot, W. J.; Baart D. L. F.; Donck, P.B.; van der Lans R. G. J. M.; and Luyben K. Ch. A. M. 1991. Mass transfer in silicone rubber membranes for the recovery of fermentation products by pervaporation and perstraction. Bioseparation 2: 261-277.
16. Huang, R. Y. M.; and Rhim, J. W. 1991. Separation Characteristics of Pervaporation Membrane Separation Processes. In Pervaporation Membrane Separation Process, Edited by Huang, R.Y.B., Amsterdam, Elsevier Science Publishers. 169.
17. Mulder, M. H. V.; and Huang, R. Y. B. 1991. Thermodynamic Principles of Pervaporation. In Pervaporation Membrane Separation Process, Edited by Huang, R.Y.B., Amsterdam, Elsevier Science Publishers. 225-251.
18. Matsura, T. 1994. Synthetic Membrane and Membrane Separation Process. Florida. CRC Press. 131-220.
19. Lamer, T.; Rohart, M. S.; Voilley, A.; and Bussart, H. 1994. Influence of Sorption and Diffusion of Aroma Compound in Silicone Rubber on their Extraction by Pervaporation. Journal of Membrane Science 9: 251-263.
20. Psaume, R.; Aptel, P.; Aurelle, Y.; Mora, J. C.; and Bersilon, J. L. 1988. Pervaporation: Importance of Concentration Polarization in the Extraction of Trace Organic from Water. Journal of Membrane Science 36: 373-384.
21. Blume, I.; Wijmans, J. G.; and Baker, R. W. 1990. The Separation of Dissolved Organics from Water by Pervaporation. Journal of Membrane Science 49: 253-286.
22. Ji, W.; Sikdar, S. K.; and Hwang, S. T. 1994. Modelling of Multicomponent Pervaporation for Removal of Volatile Organic Compound from Water. Journal of Membrane Science 93:1-19.

23. Watson, J. M.; and Panyne, P. A. 1990. A Study of Organic Compound Pervaporation Through Silicone Rubber. Journal of Membrane Science 49: 171-205.
24. Boddeker, K. W.; and Bengton, G. 1990. Pervaporation of Low Volatility Aromatics from Water. Journal of Membrane Science 53: 143-158.
25. ชมพูนุท พิภพลาภอนันต์. 2537. เพอร์เวพอเรชันของของผสมน้ำ-ปิวทานอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
26. จริญญาลักษณะณ์ อติชาติพงษ์กุล และรุ่งโรจน์ สุขเกิดกิจพิบูลย์. 2532. การแยกของผสมแอลกอฮอล์-น้ำโดยกระบวนการเพอแวปเปอเรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
27. Liu, Q.; Noble, R. D.; Falconer, J.; and Funke, H. H. 1996. Organic/Water Separation by Pervaporation with a Zeolite Membrane. Journal of Membrane Science 117: 163-174.
28. Masuda, T.; Takatsuka, M.; Tang, B. Z.; and Higashimura, T. 1990. Pervaporation of Organic Liquid-Water Mixtures Through Substituted Polyacetylene Membranes. Journal of Membrane Science 49: 69-83.
29. Bandini, S.; Saavedra, A.; and Sarti, G. C. 1997. Vacuum membrane distillation: experiments and modeling. AIChE Journal 43: 398-408.
30. Nguyen, T.; and Nobe, K. 1987. Extraction of Organic Contaminates in Aqueous Solution by Pervaporation. Journal of Membrane Science 30: 11-22.
31. Boddeker, K. W.; Bengton, G.; and Pingel, H. 1990. Pervaporation of Isomeric Butanols. Journal of Membrane Science 54: 1-12.
32. โอตปี กกกำแหง. 2543. การแยกอะซิโตนและเอทิลอะซิเตตออกจากสารละลายเจ็อจางโดยกระบวนการเพอแวปพอเรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
33. Slater, C. S. 1997. Recovery of Ethyl Acetate from Process Effluents Using Pervaporation Technology. J. Environ. Sci. Health. A32(5): 1339-1352.

34. Nagase, Y.; Sugimoto, K.; Takamura, Y.; and Matsui K. 1991. Chemical Modification of Poly (substituted-Acetylene) VI. Introduction of Fluoroalkyl Group into Poly(1-Trimethylsilyl-1-Propyne) and The Improve Ethanol Permselectivity at Pervaporation. Journal of Applied Polymer Science 43: 1227-1232.
35. Hennepe, H. J. C.; Bargeman, D.; Milder, M. H. V.; and Smolders, C. A. 1987. Zeolite-filled Silicone Rubber Membranes: Part 1. Membrane Preparation and Pervaporation Results. Journal of Membrane Science 35: 39-55.
36. Welty, J. R.; Wicks, C. E.; and Wilson, R. E. 1984. Fundamentals of Mass Transfer. Fundamentals of Momentum Transfer Heat and Mass Transfer. New York. John Wiley&Sons. 471-507.
37. Rajagopalan, N.; and Cheryan, M. 1995. Pervaporation of Grape Juice Aroma. Journal of Membrane Science 104: 243-250.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

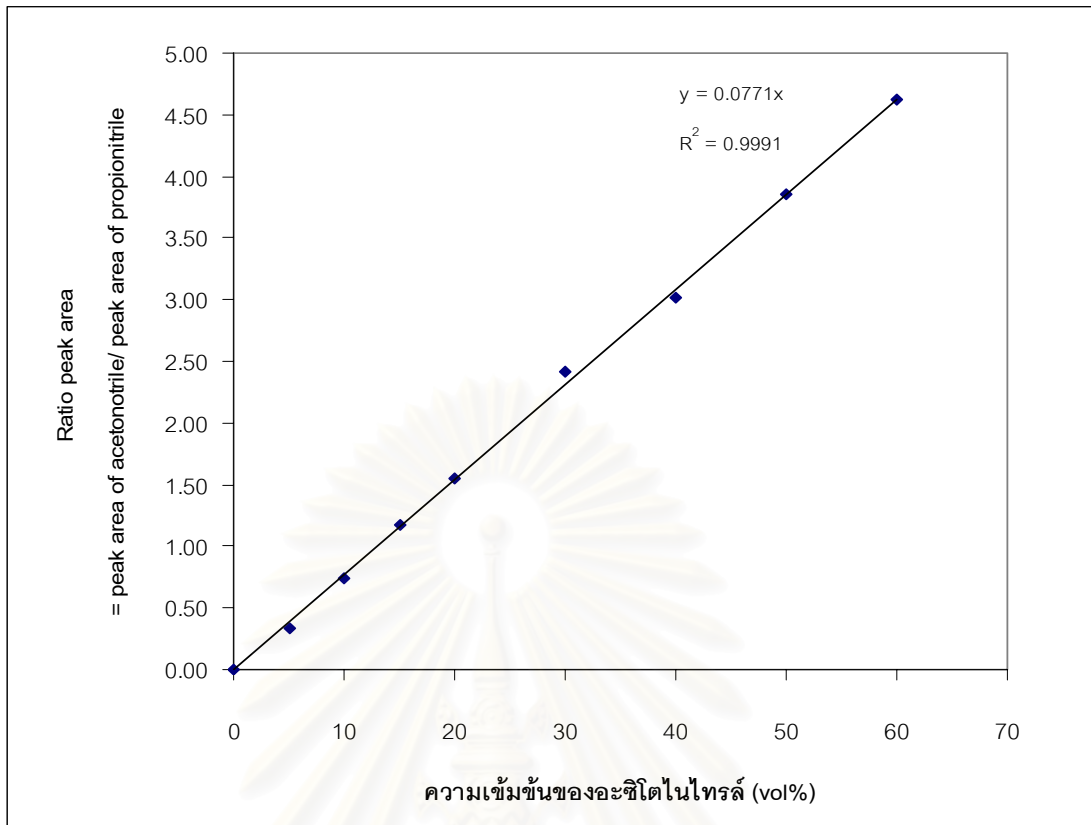
การวิเคราะห์ความเข้มข้น

ในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารอะซิโตไนไทรล์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC) ของบริษัท Shimadzu รุ่น GC-7AG ของประเทศญี่ปุ่น คอลัมน์ที่ใช้คือ Porapak Q ขนาด 80/100 mesh มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4 มิลลิเมตร ความยาว 2 เมตร ดีเทคเตอร์ที่ใช้คือ FID โดยมีสภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

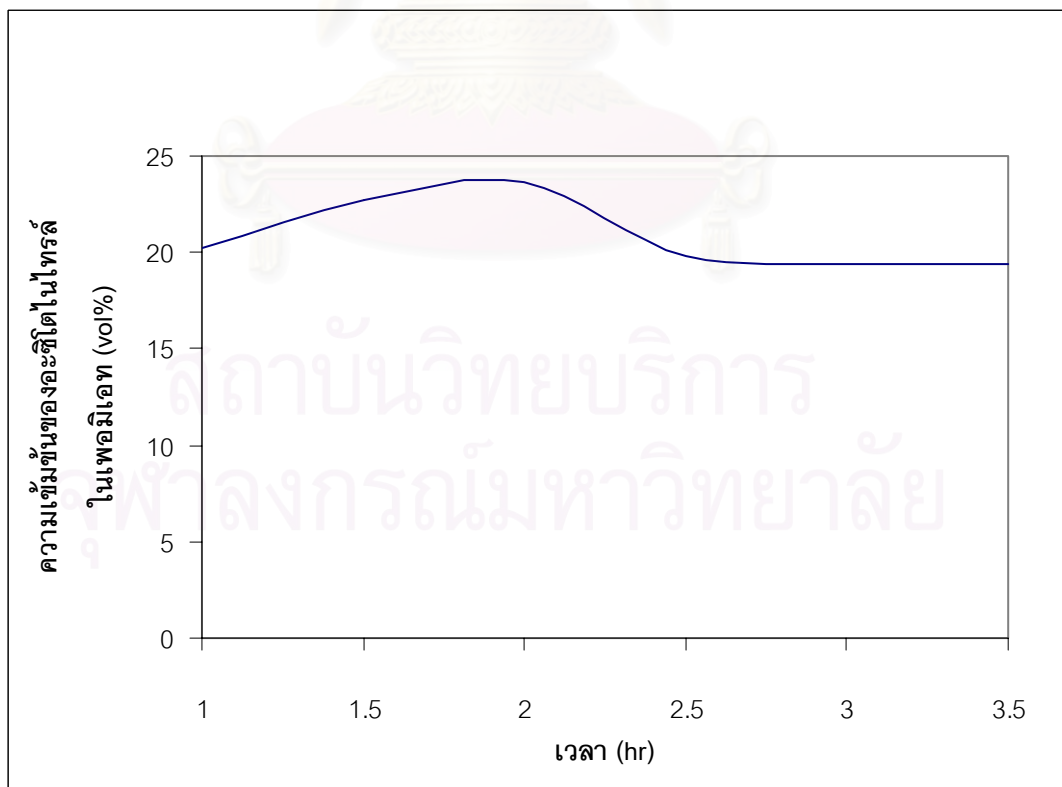
Column temperature	=	180 °C
Injection temperature	=	220 °C
Detector temperature	=	220 °C
Carrier gas	=	ไนโตรเจน
Flow rate	=	50 ml/min

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายอะซิโตไนไทรล์

- เตรียมสารละลาย Internal standard (Propionitrile) ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 ในเมทานอล จำนวน 10 มิลลิลิตร
- เตรียมสารละลายมาตรฐานอะซิโตไนไทรล์ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยปริมาตร ตามลำดับ ในเมทานอลจำนวน 10 มิลลิลิตร
- นำสารละลาย Internal standard จากข้อ 1. จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ในข้อ 2. จำนวน 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมได้ในแต่ละความเข้มข้นไปฉีดเข้าเครื่อง GC ในปริมาตร 1 ไมโครลิตร แล้วบันทึกพื้นที่ใต้กราฟของอะซิโตไนไทรล์และโพรพิโอไนไทรล์ เพื่อนำมาทำกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังรูปที่ ก.1
- นำสารละลาย Internal standard จากข้อ 1. มาผสมกับสารตัวอย่างจำนวน 0.5 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายผสมมาฉีดเข้าเครื่อง GC ปริมาตร 1 ไมโครลิตร จากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟของสารอะซิโตไนไทรล์และโพรพิโอไนไทรล์ที่ได้ไปหาความเข้มข้นของสารอะซิโตไนไทรล์จากกราฟมาตรฐาน ดังแสดงการคำนวณในภาคผนวก ข



รูปที่ ก.1 แสดงกราฟมาตรฐานของอะซิโตนไทรล์



รูปที่ ก.2 แสดงสภาวะคงตัว (Steady state) ของกระบวนการเพอร์เมอเรนซ์

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าความเข้มข้น ค่าฟลักซ์ และค่าการเลือกผ่าน

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการสมดุลมวล (Mass balance) เพื่อช่วยในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสาร ค่าฟลักซ์ และค่าการเลือกผ่าน ซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณดังต่อไปนี้

การคำนวณค่าความเข้มข้นของสารอะซิโตไนโตรล์

ค่าความเข้มข้นของสารสามารถหาได้จากกราฟมาตรฐาน โดยประมาณแนวโน้มด้วยสมการเส้นตรง ดังสมการที่ ข.1

$$y = ax + b \quad (\text{ข.1})$$

- โดยที่
- x = ค่าความเข้มข้นของอะซิโตไนโตรล์ (vol%)
 - y = Ratio peak area
 - a = ความชันของกราฟมาตรฐาน
 - b = จุดตัดแกน Y ของกราฟมาตรฐาน

การคำนวณค่าฟลักซ์

การคำนวณค่าฟลักซ์รวม หาได้จากสมการ ข.2

$$J = \frac{W_p}{A * t} \quad (\text{ข.2})$$

- เมื่อ
- J = ค่าฟลักซ์รวม (kg/m²hr)
 - W_p = น้ำหนักรวมของเพอมีเอท (kg)
 - t = เวลาในการเก็บตัวอย่างเพอมีเอท (hr)
 - A = พื้นที่เยื่อแผ่น (m²)

ตัวอย่างการคำนวณ พิจารณาผลการทดลองดังตารางที่ ค.1 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{จากผลการทดลอง } W_p &= 0.00552 & \text{kg} \\ t &= 1 & \text{hr} \\ A &= 0.001134 & \text{m}^2 \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการที่ ข.2 จะได้

$$J = \frac{(0.00552)}{(0.001134)(1)} = 4.87 \text{ kg/m}^2\text{hr}$$

การคำนวณค่าฟลักซ์ของสารแต่ละตัว ได้แก่ อะซิโตนไนโตรล (สาร i) และน้ำ (สาร j) ซึ่งหาได้จากสมการ ข.3 และ ข.4

$$J_i = \frac{W_{iP}}{t * A} \quad (\text{ข.3})$$

$$J_j = J - J_i \quad (\text{ข.4})$$

โดยที่

$$W_{iP} = \frac{c_{iP} * W_P}{100} \quad (\text{ข.5})$$

เมื่อ J_i = ค่าฟลักซ์ของสาร i ($\text{kg/m}^2\text{hr}$)

J_j = ค่าฟลักซ์ของสาร j ($\text{kg/m}^2\text{hr}$)

W_{iP} = น้ำหนักของสาร i ในเฟอมีเอท (kg)

c_{iP} = ความเข้มข้นของสาร i ในเฟอมีเอท (vol%)

ตัวอย่างการคำนวณ พิจารณาผลการทดลองดังตารางที่ ค.1 ดังต่อไปนี้

$$\text{จากผลการทดลอง } c_{iP} = 42.83 \text{ vol\%}$$

แทนค่าลงในสมการ ข.5 จะได้

$$W_{ip} = \frac{(42.83)(0.00552)}{100} = 0.00236 \text{ kg}$$

$$\text{ปริมาตรของอะซิโตนในไตรลีนเพอมีเอท} = \frac{W_{ip}}{d}$$

เมื่อ d = ความหนาแน่นของอะซิโตนในไตรลีน (0.78 kg/l)

$$\text{ปริมาตรของอะซิโตนในไตรลีนเพอมีเอท} = \frac{0.00236}{0.78} = 3.03 \text{ ml}$$

หาค่าฟลักซ์ของอะซิโตนในไตรลีนได้ดังสมการ ข.3 ดังนี้

$$J_i = \frac{0.00236}{(1)(0.001134)} = 2.08 \text{ kg/m}^2\text{hr}$$

หาค่าฟลักซ์ของน้ำได้ดังสมการ ข.4 ดังนี้

$$J_i = 4.87 - 2.08 = 2.78 \text{ kg/m}^2\text{hr}$$

การคำนวณค่าการเลือกผ่าน (Selectivity)

ค่าการเลือกผ่าน (Selection factor, α_{ij}) คำนวณได้จากสมการ ข.6

$$\alpha_{ij} = \frac{(c_{ip} / c_{jp})}{(c_{if} / c_{jf})} \quad (\text{ข.6})$$

โดยที่ $c_{jp} = 100 - c_{ip}$ (ข.7)

$$c_{jf} = 100 - c_{if} \quad (\text{ข.8})$$

เมื่อ c_{jp} = ความเข้มข้นของสาร j ในเพอมีเอท (vol%)

c_{if} = ความเข้มข้นของสาร i ในสารป้อน (vol%)

c_{jf} = ความเข้มข้นของสาร j ในสารป้อน (vol%)

ตัวอย่างการคำนวณ พิจารณาผลการทดลองดังตารางที่ ค.1 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{จากผลการทดลอง } c_{iP} &= 42.83 \text{ vol\%} \\ c_{iF} &= 3.62 \text{ vol\%} \end{aligned}$$

หาความเข้มข้นของน้ำในเฟอมีเอทและในสารป้อนได้ดังสมการ ข.7 และ ข.8 ดังนี้

$$\begin{aligned} c_{jP} &= 100 - 42.83 = 57.17 \text{ vol\%} \\ c_{jF} &= 100 - 3.62 = 96.38 \text{ vol\%} \end{aligned}$$

ดังนั้น สำหรับค่าการเลือกผ่านจะได้

$$\alpha = \frac{(42.83/57.17)}{(3.62/96.38)} = 18.75$$

ค่าดัชนีการแยกของเพอร์เวปพอเรชัน (Pervaporation separation index, PSI) คำนวณได้จากสมการ ข.7

$$PSI = J * (\alpha_{ij} - 1) \quad (ข.9)$$

ตัวอย่างการคำนวณ พิจารณาผลการทดลองดังตารางที่ ค.1 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{จากผลการทดลอง } J &= 4.87 \text{ kg/m}^2\text{hr} \\ \alpha &= 18.75 \end{aligned}$$

ค่า PSI จะได้

$$\begin{aligned} PSI &= 4.87 (18.75 - 1) \\ &= 86.44 \text{ kg/m}^2\text{hr} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ค.1 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.62	42.41	4.94	2.09	2.84	18.56	86.45
2	3.62	42.97	4.86	2.09	2.77	18.75	86.27
3	3.64	43.00	4.81	2.07	2.74	18.75	85.38
เฉลี่ย	3.62	42.83	4.87	2.08	2.78	18.75	86.44

ตาราง ค.2 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	8.17	55.61	5.61	3.12	2.49	13.89	72.31
2	8.14	55.72	5.69	3.17	2.52	14.00	72.97
3	8.17	55.59	5.61	3.12	2.49	13.89	72.31
เฉลี่ย	8.16	55.64	5.63	3.14	2.50	13.89	72.57

ตาราง ค.3 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	12.91	63.43	6.49	4.12	2.37	11.53	68.34
2	12.89	63.16	6.58	4.15	2.42	11.40	68.43
3	12.85	64.39	6.51	4.19	2.32	12.07	72.07
เฉลี่ย	12.88	63.66	6.53	4.15	2.37	11.67	69.68

ตาราง ค.4 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	17.64	70.06	7.58	5.35	2.23	11.43	79.06
2	17.62	70.52	7.65	5.39	2.25	11.38	79.41
3	17.63	70.23	7.65	5.38	2.28	11.23	78.26
เฉลี่ย	17.63	70.45	7.63	5.37	2.25	11.33	78.82

ตาราง ค.5 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 20 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.84	41.23	4.32	1.78	2.54	17.50	71.28
2	3.81	41.12	4.43	1.82	2.61	17.50	73.10
3	3.84	40.95	4.35	1.78	2.57	17.25	70.69
เฉลี่ย	3.83	41.10	4.37	1.79	2.57	17.50	72.11

ตาราง ค.6 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 30 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.99	38.33	4.13	1.58	2.55	15.50	59.89
2	4.01	38.33	4.06	1.55	2.50	15.50	58.87
3	3.99	38.24	4.14	1.58	2.56	15.50	60.03
เฉลี่ย	3.99	38.30	4.11	1.57	2.54	15.50	59.60

ตาราง ค.7 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 40 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	4.12	36.43	3.84	1.40	2.44	14.25	50.88
2	4.13	36.42	3.80	1.38	2.42	14.25	50.35
3	4.16	36.35	3.69	1.34	2.35	14.25	48.89
เฉลี่ย	4.14	36.40	3.77	1.37	2.40	14.25	49.95

ตาราง ค.8 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 20 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	8.58	51.18	4.96	2.54	2.42	11.67	52.92
2	8.59	51.14	4.94	2.53	2.41	11.67	52.71
3	8.63	50.98	4.86	2.48	2.38	11.56	51.32
เฉลี่ย	8.60	51.10	4.92	2.51	2.41	11.56	51.96

ตาราง ค.9 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 30 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	8.90	46.15	4.54	2.10	2.45	8.60	34.50
2	8.88	45.97	4.65	2.14	2.51	8.50	34.88
3	8.92	45.88	4.51	2.07	2.44	8.50	33.83
เฉลี่ย	8.90	46.00	4.57	2.10	2.47	8.50	34.28

ตาราง ค.10 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 40 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	9.05	44.15	4.27	1.88	2.38	7.90	29.46
2	9.09	44.71	4.07	1.82	2.25	8.10	28.90
3	9.13	43.74	4.01	1.76	2.26	7.80	27.27
เฉลี่ย	9.09	44.20	4.12	1.82	2.30	7.90	28.43

ตาราง ค.11 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 20 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	13.55	58.34	5.48	3.19	2.28	8.75	42.47
2	13.52	58.92	5.47	3.22	2.25	8.94	43.43
3	13.54	59.14	5.41	3.20	2.21	9.06	43.61
เฉลี่ย	13.54	58.80	5.45	3.20	2.25	8.94	43.27

ตาราง ค.12 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 30 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	13.98	53.77	4.74	2.55	2.19	7.25	29.63
2	13.93	55.02	4.76	2.62	2.14	7.63	31.56
3	13.97	53.21	4.86	2.59	2.27	7.13	29.79
เฉลี่ย	13.96	54.00	4.79	2.59	2.20	7.31	30.22

ตาราง ค.13 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 40 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	14.22	49.88	4.43	2.21	2.22	5.88	21.62
2	14.26	49.79	4.32	2.15	2.17	5.82	20.82
3	14.27	49.73	4.29	2.14	2.16	5.82	20.68
เฉลี่ย	14.25	49.80	4.35	2.17	2.18	5.82	20.97

ตาราง ค.14 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 20 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	18.59	66.28	5.92	3.92	2.00	8.57	44.81
2	18.55	66.35	6.01	3.98	2.02	8.57	45.50
3	18.59	66.27	5.91	3.92	1.99	8.52	44.44
เฉลี่ย	18.58	66.30	5.94	3.94	2.00	8.56	44.91

ตาราง ค.15 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 30 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	19.20	59.51	5.08	3.02	2.06	6.13	26.06
2	19.12	61.20	5.11	3.13	1.98	6.58	28.51
3	19.10	60.49	5.26	3.18	2.08	6.38	28.30
เฉลี่ย	19.14	60.40	5.15	3.11	2.04	6.38	27.71

ตาราง ค.16 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 40 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	19.45	55.55	4.79	2.66	2.13	5.21	20.17
2	19.42	56.02	4.81	2.70	2.12	5.29	20.63
3	49.43	56.43	4.74	2.67	2.06	5.42	20.95
เฉลี่ย	19.44	56.00	4.78	2.68	2.10	5.29	20.51

ตาราง ค.17 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.59	42.28	5.05	2.14	2.92	18.25	87.10
2	3.56	43.08	5.04	2.17	2.87	19.00	90.72
3	3.49	44.12	5.14	2.27	2.87	19.75	96.38
เฉลี่ย	3.55	43.16	5.08	2.19	2.89	19.00	91.44

ตาราง ค.18 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรัส ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.34	46.75	5.28	2.47	2.81	29.33	149.58
2	3.44	44.72	5.23	2.34	2.89	27.00	135.98
3	3.35	45.96	5.36	2.46	2.90	28.33	146.49
เฉลี่ย	3.38	45.81	5.29	2.42	2.87	28.33	144.58

ตาราง ค.19 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรัส ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.21	47.46	5.58	2.65	2.93	30.00	161.82
2	3.20	47.54	5.62	2.67	2.95	30.33	164.83
3	3.10	48.19	5.81	2.80	3.01	31.00	174.30
เฉลี่ย	3.17	47.73	5.67	2.71	2.96	30.33	166.30

ตาราง ค.20 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรัส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	8.02	56.93	5.86	3.33	2.52	14.55	79.42
2	8.02	56.68	5.88	3.33	2.55	14.55	79.67
3	8.08	56.55	5.75	3.25	2.50	14.44	77.28
เฉลี่ย	8.04	56.72	5.83	3.31	2.52	14.55	79.00

ตาราง ค.21 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	7.91	57.95	6.02	3.49	2.53	15.33	86.27
2	7.89	58.32	6.03	3.52	2.51	15.56	87.80
3	7.88	58.00	6.09	3.53	2.56	15.33	87.27
เฉลี่ย	7.89	58.09	6.05	3.51	2.54	15.44	87.36

ตาราง ค.22 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	7.69	59.32	6.38	3.79	2.60	18.75	113.25
2	7.68	59.34	6.43	3.81	2.61	18.75	114.13
3	7.62	59.45	6.55	3.90	2.66	18.38	113.84
เฉลี่ย	7.66	59.37	6.46	3.83	2.62	18.75	111.44

ตาราง ค.23 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	12.99	61.67	6.52	4.02	2.50	10.73	63.44
2	12.98	61.76	6.53	4.03	2.50	10.80	63.99
3	12.88	63.14	6.59	4.16	2.43	11.40	68.54
เฉลี่ย	12.95	62.19	6.54	4.07	2.47	10.93	64.94

ตาราง ค.24 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	12.69	65.11	6.79	4.42	2.37	12.47	77.88
2	12.74	64.80	6.73	4.36	2.37	12.27	75.85
3	12.67	65.06	6.85	4.46	2.39	12.40	78.09
เฉลี่ย	12.70	64.99	6.79	4.41	2.38	12.40	77.41

ตาราง ค.25 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	12.47	67.24	7.05	4.74	2.31	14.64	96.16
2	12.52	66.54	7.01	4.66	2.35	14.21	92.60
3	12.39	67.79	7.13	4.84	2.30	15.00	99.82
เฉลี่ย	12.46	67.19	7.06	4.75	2.32	14.64	96.03

ตาราง ค.26 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	17.67	70.02	7.59	5.32	2.28	11.14	76.96
2	17.67	70.17	7.58	5.32	2.26	11.19	77.24
3	17.61	70.50	7.68	5.41	2.27	11.38	79.72
เฉลี่ย	17.65	70.23	7.62	5.35	2.27	11.24	78.03

ตาราง ค.27 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	17.21	72.99	8.19	5.98	2.21	12.86	97.13
2	17.28	72.45	8.11	5.88	2.24	12.52	93.43
3	17.27	73.26	8.03	5.89	2.15	13.05	96.76
เฉลี่ย	17.25	72.90	8.11	5.91	2.20	12.81	95.78

ตาราง ค.28 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	17.09	74.29	8.26	6.14	2.12	13.76	105.40
2	17.14	73.95	8.21	6.07	2.14	13.52	102.79
3	17.04	74.30	8.37	6.22	2.15	13.76	106.80
เฉลี่ย	17.09	74.18	8.28	6.14	2.14	13.67	104.91

ตาราง ค.29 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.99	39.40	3.99	1.57	2.42	16.25	60.85
2	4.01	39.36	3.93	1.55	2.38	16.25	59.93
3	3.97	39.44	4.07	1.60	2.46	16.25	62.07
เฉลี่ย	3.99	39.40	3.99	1.57	2.42	16.25	60.85

ตาราง ค.30 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 13 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.89	40.54	4.22	1.71	2.51	17.00	67.52
2	3.87	41.00	4.26	1.75	2.51	17.25	69.22
3	3.90	40.80	4.16	1.70	2.46	17.25	67.60
เฉลี่ย	3.89	40.78	4.22	1.72	2.50	17.25	68.58

ตาราง ค.31 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	8.90	47.06	4.42	2.08	2.34	8.90	34.92
2	8.90	47.19	4.51	2.13	2.38	8.90	35.63
3	8.90	47.05	4.41	2.07	2.33	8.90	34.84
เฉลี่ย	8.90	47.10	4.44	2.09	2.35	8.90	35.08

ตาราง ค.32 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 13 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	8.69	49.29	4.85	2.39	2.46	9.70	42.20
2	8.70	49.86	4.75	2.37	2.39	9.90	42.36
3	8.71	49.65	4.76	2.36	2.39	9.90	42.28
เฉลี่ย	8.70	49.60	4.79	2.38	2.41	9.80	42.15

ตาราง ค.33 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	13.99	53.83	4.73	2.54	2.18	7.31	29.85
2	14.07	51.78	4.69	2.43	2.26	6.69	26.69
3	14.04	53.12	4.63	2.46	2.17	7.06	28.06
เฉลี่ย	14.03	52.19	4.68	2.48	2.21	7.00	28.08

ตาราง ค.34 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 13 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	13.76	55.61	5.20	2.89	2.31	7.81	35.41
2	13.67	56.80	5.31	3.02	2.29	8.19	38.18
3	13.67	55.59	5.44	3.02	2.42	7.81	37.05
เฉลี่ย	13.70	56.00	5.32	2.98	2.34	7.94	39.74

ตาราง ค.35 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตไนโตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	19.24	59.36	4.98	2.96	2.02	6.35	26.64
2	19.23	59.37	5.00	2.97	2.03	6.35	26.75
3	19.20	59.29	5.10	3.02	2.07	6.35	27.29
เฉลี่ย	19.23	59.34	5.03	2.98	2.04	6.35	26.91

ตาราง ค.36 ผลการแยกของผสมน้ำ-อะซิโตนไนโตรส ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 13 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	18.80	62.77	5.78	3.63	2.15	7.35	36.70
2	18.76	63.15	5.86	3.70	2.16	7.43	37.68
3	18.82	62.78	5.74	3.60	2.14	7.35	36.45
เฉลี่ย	18.80	62.90	5.79	3.64	2.15	7.39	38.97

ตาราง ค.37 ผลการแยกน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	3.46	44.78	5.17	2.31	2.85	27.00	134.42
2	3.46	44.51	5.20	2.32	2.89	26.67	135.20
3	3.48	44.69	5.11	2.28	2.82	27.00	132.86
เฉลี่ย	3.46	44.66	5.16	2.30	2.85	27.00	134.16

ตาราง ค.38 ผลการแยกน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	8.20	55.65	5.52	3.07	2.45	13.89	71.10
2	8.24	54.71	5.54	3.03	2.51	13.44	68.92
3	8.24	53.92	5.63	3.04	2.60	13.00	67.56
เฉลี่ย	8.23	54.76	5.56	3.05	2.52	13.44	69.17

ตาราง ค.39 ผลการแยกน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	12.81	66.43	6.36	4.22	2.13	13.20	77.59
2	12.82	66.27	6.36	4.21	2.14	13.07	76.77
3	12.81	65.90	6.44	4.24	2.20	12.86	76.06
เฉลี่ย	12.81	66.20	6.38	4.23	2.16	13.07	77.00

ตาราง ค.40 ผลการแยกน้ำเสียจากเครื่อง HPLC ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันด้านเพอมีเอท 10 มิลลิเมตรปรอท และความเข้มข้น สารป้อนร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง ที่	ความเข้มข้น ACN(vol%)		ค่าฟลักซ์ (kg/m ² hr)			ค่าการ เลือกผ่าน	PSI (kg/m ² hr)
	สารป้อน	เพอมีเอท	รวม	ACN	น้ำ		
1	17.48	73.79	7.53	5.56	1.97	13.43	93.60
2	17.42	74.28	7.58	5.63	1.95	13.76	96.72
3	17.42	75.13	7.48	5.62	1.86	14.38	100.08
เฉลี่ย	17.44	74.40	7.53	5.60	1.93	13.86	96.84

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

Detection limit และความเที่ยง ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

1. Detection limit ของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

เตรียมสารละลายมาตรฐานของอะซีโตไนโตรลีให้มีความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำสารละลายมาตรฐานมาฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ด้วยปริมาตร 1 ไมโครลิตร หลังจากนั้นคำนวณหาค่า LOD (Limit of Detection) และ LOQ (Limit of Quantitative) โดยค่า

LOD คือ ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ให้สัดส่วนของ signal ต่อ noise เท่ากับ 3

$$\text{LOD} = 3 \text{ s/n (signal/noise)} \quad (\text{ง.1})$$

LOQ คือ ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารซึ่งสามารถหาปริมาณได้ เป็นความเข้มข้นที่ให้สัดส่วนของ signal ต่อ noise เท่ากับ 10

$$\text{LOQ} = 10 \text{ s/n (signal/noise)} \quad (\text{ง.2})$$

หากความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้ให้ค่า s/n มากกว่า 3 และ 10 ก็จะต้องทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานดังกล่าวให้มีความเข้มข้นที่สามารถให้สัดส่วนของ s/n เท่ากับ 3 และ 10 ซึ่งค่าความเข้มข้นดังกล่าวจะเป็นค่า LOD และ LOQ

2. ความเที่ยง (Precision)

ค่าความเที่ยงของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี แสดงด้วยร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) โดยคำนวณได้จาก

$$\% \text{RSD} = \frac{SD}{x} * 100 \quad (\text{ง.3})$$

ซึ่งหาได้จากการเตรียมสารละลายมาตรฐานอะซิโตนไทรล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร (เป็นความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงที่ศึกษา) แล้วทำการฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีด้วยปริมาตร 1 ไมโครลิตร จำนวน 7 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่า %RSD ต่อไป ซึ่งเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ต้องมีค่า %RSD น้อยกว่า 10

จากการทดสอบ Detection limit และความเที่ยงจากข้อ 1 ถึง 2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น GC-7AG มีค่า

LOD	=	5	ppm
LOQ	=	50	ppm
%RSD	=	1.13	

รายละเอียดของความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์เพื่อใช้คำนวณค่า %RSD ดังแสดงในตาราง ง.1

ตาราง ง.1 แสดงความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์เพื่อใช้คำนวณค่า %RSD

ครั้งที่	ความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์ (vol%)
1	25.03
2	24.38
3	24.90
4	24.64
5	24.64
6	25.02
7	24.38

ภาคผนวก จ

สถิติวิเคราะห์

1. ผลของความเข้มข้นของสารป้อน

1.1 ค่าการแยก

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	23.478	3	7.826	95.267	.000
Within Groups	.657	8	8.215E-02		
Total	24.136	11			

		N	Subset for alpha = .05		
	CONC		1	2	3
Duncan	20%	3	3.8700		
	15%	3	4.1867		
	10%	3		5.1267	
	5%	3			7.4433
	Sig.		.213	1.000	1.000

1.2 ค่า PSI

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	80.943	3	26.981	34.623	.000
Within Groups	6.234	8	.779		
Total	87.177	11			

		N	Subset for alpha = .05		
	CONC		1	2	3
Duncan	20%	3	9.0667		
	15%	3	9.5900		
	10%	3		11.3633	
	5%	3			15.6733
	Sig.		.488	1.000	1.000

2. ผลของความดันด้านเพอมีเอท

2.1 ค่าการแยก

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: ค่าการแยก

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	250.271	6	41.712	207.981	.000
Intercept	1932.262	1	1932.262	9634.513	.000
CONC	173.440	3	57.813	288.264	.000
PRESSURE	76.832	3	25.611	127.698	.000
Error	1.805	9	.201		
Total	2184.338	16			
Corrected Total	252.076	15			

Duncan

	N	Subset			
CONC		1	2	3	4
20%	4	8.1125			
15%	4		8.8825		
10%	4			10.4625	
5%	4				16.5000
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

	N	Subset			
PRESSURE		1	2	3	4
40mmHg	4	8.4650			
30mmHg	4		9.4900		
20mmHg	4			11.8850	
10mmHg	4				14.1175
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = .201.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000.

b Alpha = .05

2.2 ค่า PSI

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: PSI

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	13908.660	6	2318.110	156.697	.000
Intercept	66185.280	1	66185.280	4473.917	.000
CONC	3025.156	3	1008.385	68.164	.000
PRESSURE	10883.504	3	3627.835	245.230	.000
Error	133.142	9	14.794		
Total	80227.082	16			
Corrected Total	14041.802	15			

Duncan

	N	Subset	
CONC		1	2
20%	4	54.3900	
15%	4	54.8700	
10%	4	60.2025	
5%	4		87.8025
Sig.		.071	1.000

	N	Subset			
PRESSURE		1	2	3	4
40mmHg	4	35.2775			
30mmHg	4		47.9725		
20mmHg	4			69.9675	
10mmHg	4				104.0475
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 14.794

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000

b Alpha = .05

3. ผลของอุณหภูมิของสารป้อน

3.1 ค่าพลักซ์ของน้ำ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: FLUX WATER

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.199	6	3.317E-02	9.660	.002
Intercept	55.540	1	55.540	16173.357	.000
TEMP	2.032E-02	3	6.773E-03	1.972	.189
CONC	.179	3	5.957E-02	17.348	.000
Error	3.091E-02	9	3.434E-03		
Total	55.770	16			
Corrected Total	.230	15			

		N	Subset
	TEMP		1
Duncan	50 องศา	4	1.8125
	40 องศา	4	1.8475
	30 องศา	4	1.8900
	25 องศา	4	1.9025
	Sig.		.073

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 3.434E-03

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000

b Alpha = .05

3.2 ค่าการแยก

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: ค่าการแยก

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	430.229	6	71.705	13.524	.000
Intercept	4322.734	1	4322.734	815.304	.000
TEMP	89.071	3	29.690	5.600	.019
CONC	341.159	3	113.720	21.448	.000
Error	47.718	9	5.302		
Total	4800.681	16			
Corrected Total	477.947	15			

Duncan

	N	Subset	
CONC		1	2
20%	4	12.5925	
15%	4	13.0350	
10%	4	16.0175	
5%	4		24.1025
Sig.		.075	1.000

	N	Subset	
TEMP		1	2
25c	4	14.1175	
30c	4	14.1250	
40c	4		18.1125
50c	4		19.3925
Sig.		.996	.452

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 5.302

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000

b Alpha = .05

3.3 ค่า PSI

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: PSI

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	9586.716	6	1597.786	8.881	.002
Intercept	141564.063	1	141564.063	786.867	.000
CONC	4572.866	3	1524.289	8.473	.005
TEMP	5013.849	3	1671.283	9.290	.004
Error	1619.177	9	179.909		
Total	152769.956	16			
Corrected Total	11205.893	15			

Duncan

	N	Subset	
CONC		1	2
15%	4	130.3550	
10%	4	140.1075	
20%	4	140.5725	
5%	4		222.6425
Sig.		.574	1.000

	N	Subset	
TEMP		1	2
25c	4	76.8775	
30c	4	78.3525	
40c	4		101.2825
50c	4		119.7375
Sig.		.880	.084

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 179.909

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000

b Alpha = .05

4. ผลของอัตราการใช้ของสารป้อน

4.1 ค่าการแยก

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: การแยก

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	188.872	5	37.774	70.563	.000
Intercept	1617.273	1	1617.273	3021.074	.000
CONC	146.858	3	48.953	91.444	.000
FLOW	42.014	2	21.007	39.241	.000
Error	3.212	6	.535		
Total	1809.357	12			
Corrected Total	192.084	11			

Duncan

	N	Subset		
CONC		1	2	3
20%	3	8.4700		
15%	3	9.3233		
10%	3		11.2267	
5%	3			17.4167
Sig.		.203	1.000	1.000

	N	Subset	
FLOW		1	2
6ml/min	4	9.6250	
13ml/min	4	10.5950	
20ml/min	4		14.1175
Sig.		.132	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = .619

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000

b Alpha = .05

4.2 ค่า PSI

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: PSI

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4958.821	5	991.764	17.202	.002
Intercept	36221.942	1	36221.942	628.262	.000
CONC	1759.766	3	586.589	10.174	.009
FLOW	3199.055	2	1599.527	27.743	.001
Error	345.925	6	57.654		
Total	41526.688	12			
Corrected Total	5304.746	11			

Duncan

	N	Subset	
CONC		1	2
15%	3	45.8333	
20%	3	48.2333	
10%	3	49.9333	
5%	3		75.7633
Sig.		.545	1.000

	N	Subset	
FLOW		1	2
6 ml/min	4	37.7300	
13 ml/min	4	50.2150	
20ml/min	4		76.8775
Sig.		.059	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 57.654

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000

b Alpha = .05



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. เปรียบเทียบสมรรถนะของการแยกอะซิโตนไทรล์ออกจากของผสมน้ำ-อะซิโตนไทรล์และน้ำเสียจากเครื่อง HPLC

5.1 ความเข้มข้นของอะซิโตนไทรล์ในเฟอมีเอท

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
PERMEATE	Equal variances assumed	.690	.438	.124	6	.906	.8150	6.5868	-15.3023	16.9323
	Equal variances not assumed			.124	5.321	.906	.8150	6.5868	-15.8140	17.4440

5.2 ค่าพลักซ์รวม

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
FLUXรวม	Equal variances assumed	.214	.660	.399	6	.704	7.250E-02	.1819	-.3726	.5176
	Equal variances not assumed			.399	5.738	.705	7.250E-02	.1819	-.3775	.5225

5.3 ค่าพังก์ชันของอะซิโตไนไทรล์

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Flux ACN	Equal variances assumed	.471	.518	.156	6	.881	4.250E-02	.2720	-.6231	.7081
	Equal variances not assumed			.156	5.457	.881	4.250E-02	.2720	-.6395	.7245

5.4 ค่าพลาซซ์ของน้ำ

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
FLUXน้ำ	Equal variances assumed	.926	.373	.285	6	.785	2.750E-02	9.651E-02	-2.087	.2637
	Equal variances not assumed			.285	4.974	.787	2.750E-02	9.651E-02	-.2210	.2760

5.5 ค่าการแยก

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ค่าการแยก	Equal variances assumed	.223	.654	-.072	6	.945	-.1975	2.7583	-6.9469	6.5519
	Equal variances not assumed			-.072	5.542	.945	-.1975	2.7583	-7.0844	6.6894

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.6 ค่า PSI

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
PSI	Equal variances assumed	.406	.548	-.027	6	.979	-.1800	6.6525	-16.4581	16.0981
	Equal variances not assumed			-.027	5.398	.979	-.1800	6.6525	-16.9088	16.5488

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพนิดา ปรรรัตน์ เกิดวันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาวិทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2542 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย