

การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน

**GLYCEROL SEPARATION FROM BIODIESEL
BY MEMBRANE TECHNOLOGY**

สุดปรารถนา ธีรชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน

สุดปรารถนา ถิราติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

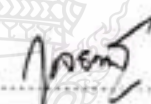
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน
Glycerol Separation from Biodiesel by Membrane Technology
ชื่อ - นามสกุล นางสาวศุภปรารถนา ทิราติ
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์จูไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์วรินทร์ดา อัปมานะ, วศ.ค.
ปีการศึกษา 2561


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระวัฒน์ เหมือนศรีชัย, วศ.ค.)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กุลชนาจุ ประเสริฐสิทธิ์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยภท กิระวารกุล, วศ.ค.)


..... กรรมการ
(อาจารย์วรินทร์ดา อัปมานะ, วศ.ค.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จูไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิวกกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 29 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุศปรารธนา ธีรชาติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมีและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์วิรินทร์ดา อัมมานะ, วศ.ค.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการทำไบโอดีเซลบริสุทธิ์โดยการแยกกลีเซอรอลด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและระดับนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งเป็นการศึกษาบนฐานของฟลักซ์เพอร์มิเอทความสามารถการกักกัน และกลไกการกรอง

ดำเนินการทดลองด้วยชุดการกรองแบบปิดตายโดยสารป้อนเป็นสารผสมระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอลในอัตราส่วน 97:3 โดยปริมาตร ที่สภาวะการกรองดังนี้ เมมเบรน UP150, UH030, UP010 และ UP005 ณ ความดัน 4-20 บาร์ และเมมเบรน NP010 ณ ความดัน 10-20 บาร์ ตามลำดับ การทดลองเป็นกาศึกษาค่าฟลักซ์เพอร์มิเอท ความสามารถในการกักกัน และกลไกการกรอง

ผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทสูงขึ้นเมื่อขนาดน้ำหนักรวมของตัวกรองและความดันสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของฟลักซ์เพอร์มิเอทจากเมมเบรน UP150 และ UH030 ณ ความดัน 8 บาร์ พบว่าที่ความดันสูงทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนมากขึ้น สภาวะการทำงานที่เหมาะสมในการแยกกลีเซอรอลควรใช้เมมเบรน UH030 ณ ความดัน 6 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอท $0.0156 \text{ g/min.cm}^2$ และค่าความสามารถกักกันกลีเซอรอลล้อยละ 93 สำหรับผลการศึกษากลไกฟลักซ์สูงด้วยแบบจำลองเฮอเมียร์พบว่าเมมเบรน UP150, UP010 และ UP005 เกิดแบบการอุดตันของรูพรุนเมมเบรน ในขณะที่เมมเบรน UH030 เกิดแบบชั้นเค้ก ผลการทดลองแสดงความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซล

คำสำคัญ: กลีเซอรอล ไบโอดีเซล เมมเบรน อัลตราฟิลเตรชัน ฟลักซ์สูง

Thesis title	Glycerol Separation from Biodiesel by Membrane Technology
Name-Surname	Miss Sudpratthana Thirati
Program	Chemical Engineering
Thesis Adviser	Assistance Professor Juraivan Ratanapisit, Ph.D.
Thesis Co-adviser	Miss Weerinda Appamana, D.Eng.
Academic Year	2018

ABSTRACT

In the present study, the glycerol separation from biodiesel by ultrafiltration and nanofiltration membrane technology was studied and based on permeate flux, percentage of rejection and membrane fouling models.

Experiments were conducted in series of dead-end filtration sets using biodiesel and oil/glycerol in 97:3 proportion (v/v) with different filtration setting as followings: membrane UP150, UH030, UP010 and UP005 at the pressure of 4-20 bar , respectively and NP010 at the pressure of 10-20 bar , respectively. The experiments were processed to study permeate fluxes, the percentage of rejection and membrane fouling models.

Results showed that greater pore sizes, as well as greater transmembrane pressure, enables greater fluxes. However, permeate fluxes of UP150 and UH030 membranes at 8 bars indicated an increased trend for the membranes to clog up at high pressure. The optimal operating condition of ultrafiltration by membrane UH030 at 6 bar was efficient in removing free glycerol, since the high value of stabilize permeate flux was $0.0156 \text{ g/min.cm}^2$ and glycerol rejection was 93%. Also the fouling mechanism was analyzed by the Hermia's model. Results showed that the pore blocking model played dominate part for UP150, UP010 and UP005 while the cake layer was significant for UH030. This work concludes that membrane technology is a possible alternative for biodiesel purification.

Keywords: glycerol, biodiesel, membrane, ultrafiltration, fouling

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความรู้และความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ และดร.วิรินทร์ดา อัมมานะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดจนแนะแนวทางแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยภพ ศิระวรกุล ที่เสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้วิชาการต่างๆ ขอขอบพระคุณ พ่อแม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนกำลังใจและกำลังใจทรัพย์ ทุกท่านที่มีส่วนให้ความสนับสนุนช่วยเหลือ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจและหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอกราบอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

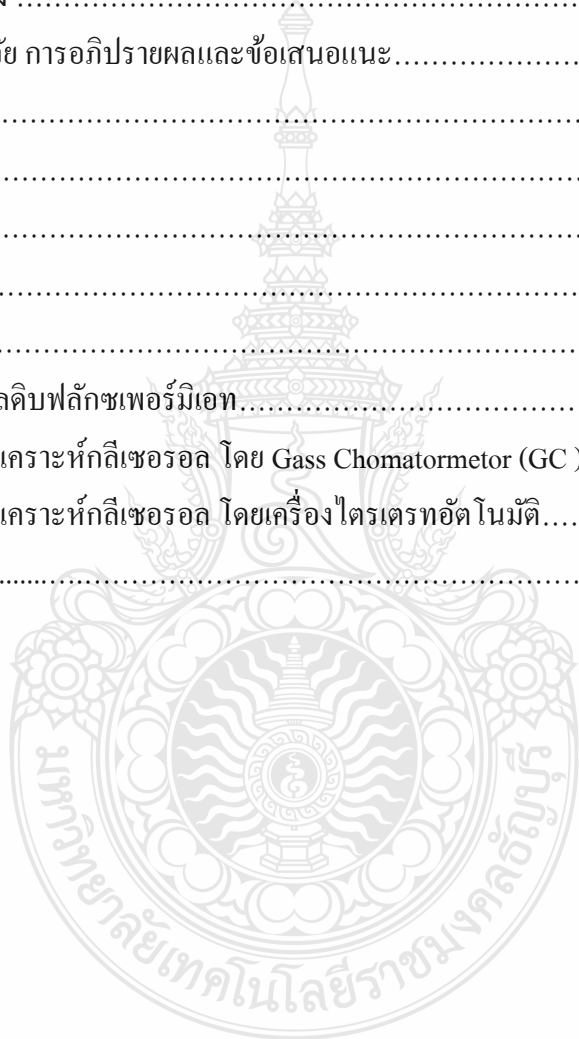
สุดปรารถนา ถิราติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	14
1.3 ขอบเขต.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2 ไปโอดีเซล.....	19
2.3 ก्लीเซอรอล.....	23
2.4 กรดไขมันอิสระ.....	24
2.5 เทคโนโลยีเมมเบรน.....	25
2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	37
3.2 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการใช้งาน.....	38
3.3 การเตรียมสารป้อน.....	40
3.4 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของก्लीเซอรอล.....	42
3.5 วิธีการทดลองกรอง.....	45
3.6 วิธีการวิเคราะห์.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	48
4.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรอง.....	48
4.2 ความสามารถในการแยกกลีเซอรอล.....	56
4.3 กลไกการกรอง	58
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุป.....	80
5.2 อภิปรายผล.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
บรรณานุกรม.....	82
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอท.....	88
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์กลีเซอรอล โดย Gass Chromatormeter (GC).....	164
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์กลีเซอรอล โดยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ.....	168
ประวัติผู้เขียน.....	177



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อดีและข้อเสียของเมมเบรนชนิดปิดตายและไหลขวาง..... 26
ตารางที่ 3.1	คุณลักษณะของเยื่อกรองเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน..... 39
ตารางที่ 3.2	คุณลักษณะของเยื่อกรองเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน..... 39
ตารางที่ 4.1	ค่าการกักกันเกลือของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน.. 57
ตารางที่ 4.2	ค่า R^2 ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 3 ชนิด ที่ความ 4, 6 และ 8 บาร์..... 59
ตารางที่ 4.3	ค่า R^2 ของเมมเบรน UP005 ทั้ง 3 ความดัน..... 66
ตารางที่ 4.4	ค่า R^2 ของเมมเบรน NP010 ทั้ง 3 ความดัน..... 67



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน..... 21
รูปที่ 2.2	หลักการของเทคโนโลยีเมมเบรน..... 25
รูปที่ 2.3	การกรองแบบไหลขวาง..... 25
รูปที่ 2.4	การกรองแบบปิดตาย..... 25
รูปที่ 2.5	แสดงความดันและขนาดของเมมเบรนระบบไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับได้..... 28
รูปที่ 2.6	การเกิดคอนเซนเตรชันโพราไรเซชัน..... 29
รูปที่ 2.7	แบบจำลองเรื่องการอุดตันของเฮอเมียทั้ง 4 แบบจำลอง..... 33
รูปที่ 2.8	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากที่สุด..... 35
รูปที่ 2.9	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้ 0..... 35
รูปที่ 2.10	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0..... 36
รูปที่ 3.1	แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบปิดตาย..... 40
รูปที่ 3.2	ภาพชุดจริงเครื่องมือการกรองแบบปิดตายในการทดลอง..... 40
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลด้วยอัตราส่วน 1:0.5 และตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น..... 41
รูปที่ 3.4	การกำจัดน้ำและเมทานอลด้วยเครื่อง Rotary Evaporator..... 42
รูปที่ 3.5	เปรียบเทียบน้ำมันไบโอดีเซลก่อนและหลังผ่านเครื่อง Rotary Evaporator..... 42
รูปที่ 3.6	แผนผังกระบวนการทดลอง..... 44
รูปที่ 3.7	ทางออกของกระแสเฟอมีเอทของชุดกรอง ก่อนเริ่มจับเวลา..... 46
รูปที่ 3.8	เครื่องไตรเตอร์ทอด โนมัตติคี่ห้อ Metrohm..... 47
รูปที่ 3.9	ชุดเครื่องวิเคราะห์ GC Perkin..... 47
รูปที่ 4.1	ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP150..... 48
รูปที่ 4.2	ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UH030..... 49
รูปที่ 4.3	ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP010..... 50
รูปที่ 4.4	ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP005..... 51
รูปที่ 4.5	ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน NP010..... 52
รูปที่ 4.6	ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 4 บาร์..... 53

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.7	ฟลักซ์เพอร์มิเททของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 6 บาร์.....	54
รูปที่ 4.8	ฟลักซ์เพอร์มิเททของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 8 บาร์.....	55
รูปที่ 4.9	ฟลักซ์เพอร์มิเททของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 10 บาร์.....	56
รูปที่ 4.10	ฟลักซ์เพอร์มิเททของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 15 บาร์.....	56
รูปที่ 4.11	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 8 บาร์.....	61
รูปที่ 4.12	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 6 บาร์.....	63
รูปที่ 4.13	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 4 บาร์.....	65
รูปที่ 4.14	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์ ที่เวลา 1-100 นาที.....	68
รูปที่ 4.15	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์ ที่เวลา 1-50 นาที.....	70
รูปที่ 4.16	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์ ที่เวลา 51-100 นาที.....	72
รูปที่ 4.17	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 8, 10 และ 15 บาร์ ที่เวลา 1-100 นาที.....	75
รูปที่ 4.18	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 8, 10 และ 15 บาร์ ที่เวลา 1-50 นาที.....	77
รูปที่ 4.19	ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกุลตัดต่อกลไกการอุดตันที่ความดัน 8, 10 และ 15 บาร์ ที่เวลา 51-100 นาที.....	79

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD	ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการสลายสารอินทรีย์ในน้ำ
CP	คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization)
COD	ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์
FAME	ไบโอดีเซล (Fatty Acid Methyl Esters)
kDa	กิโลดัลตัน (Kilo Dalton)
MWCO	ค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ถูกกักกัน (Molecular Weight Cut-off)
UP150	ชนิดเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันเกรดการค้า มีขนาด MWCO 150 kDa
UH030	ชนิดเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันเกรดการค้า มีขนาด MWCO 30 kDa
UP010	ชนิดเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันเกรดการค้า มีขนาด MWCO 10 kDa
UP005	ชนิดเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันเกรดการค้า มีขนาด MWCO 5 kDa
PES	พอลิอีเธอร์ซัลโฟน (polyether sulfone)

บทที่ 1

บทนำ

เทคโนโลยีการแยกสารด้วยเมมเบรนเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับระบบที่เกี่ยวข้องทางเคมีได้ดี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในการแยกกลีเซอรอลออกจากน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันกับชุดการทดลองการกรองแบบปิดตายและศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่แยกได้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ด้วยปัญหาวิกฤตราคาน้ำมันโลกที่สูงมากขึ้น เนื่องจากมีการคาดการณ์ว่าน้ำมันกำลังจะหมดลงในอนาคตอันใกล้รวมทั้งปัจจุบันมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทุกปี โดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมมีการใช้มากที่สุด ปัญหานี้ทำให้มีการมองหาพลังงานทางเลือกซึ่งน้ำมันไบโอดีเซล (biodiesel) เป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงทางเลือก และพบว่าเมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์แล้วให้คุณสมบัติในการเผาไหม้ที่ดีไม่ต่างจากน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมและยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น มีการเผาไหม้ที่สะอาดกว่าน้ำมันดีเซลปกติ ไอเสียมีคุณภาพที่ดีกว่าเพราะออกซิเจนในไบโอดีเซลทำให้มีการสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซลปกติ จึงมีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนน้อยกว่าน้ำมันดีเซลปกติ และเนื่องจากไม่มีกำมะถันในไบโอดีเซลจึงไม่มีปัญหาสารซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีเขม่าคาร์บอนน้อย จึงไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสียและช่วยยืดอายุการใช้งานเครื่องยนต์ได้ น้ำมันไบโอดีเซลเป็นน้ำมันทางเลือกที่ผลิตจากพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์มาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ และมีด่างหรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา[1] หลังจากผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะได้ผลผลิตเป็นอัลคิลเอสเทอร์ (alkyl ester) ที่มีสารตัวอื่นๆ ผสมอยู่ เช่น สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา แอลกอฮอล์ และกลีเซอรอล เป็นต้น จึงต้องมีการกำจัดสารเหล่านี้เพื่อให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์เป็นไปตามมาตรฐาน (ASTM D6751 และ EN14214) โดยพบว่ากลีเซอรอลเป็นผลผลิตที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตร[2] จึงมีความจำเป็นที่ต้องแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล เพราะกลีเซอรอลมีผลกระทบเชิงลบอย่างมากต่อเครื่องยนต์ดีเซล โดยทั่วไปการเพิ่มความบริสุทธิ์ไบโอดีเซลเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมี ใช้พลังงานสูง และมีชุดอุปกรณ์เสริมหลายตัว ทำงานซับซ้อนและมีค่าการลงทุนอุปกรณ์สูง ในการล้างไบโอดีเซลเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้ในการกำจัดสบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตกค้าง รวมทั้งกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

นั้น โดยพบว่าปริมาณน้ำเสียของการล้างใบ โอติเซลที่ถูกปล่อยออกสู่ธรรมชาติมีปริมาณมากกว่า 70,000 ลิตร/วัน (จากฐานการผลิต 350,000 ลิตร/วัน)ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยออกจะต้องมีค่าตามมาตรฐานดังนี้ COD ตั้งมีค่าไม่เกิน 400 มิลลิกรัม/ลิตร BOD₅ มีค่าไม่เกิน 60 มิลลิกรัม/ลิตร น้ำมันและสารหล่อลื่น มีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/ลิตร TDS ต้องมีค่าน้อยกว่า 3000 มิลลิกรัม/ลิตร และTKN มีค่าไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/ลิตร [3] จึงจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดน้ำก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ โดยการบำบัดน้ำเสียของโรงงานจะมีการส่งไปยังโรงบำบัดน้ำเสียและต้องมีค่า BOD ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียนั้นมีค่า 128.45-160 USD/ลูกบาศก์เมตร[4] ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นและเวลาในการผลิตเพิ่มมากขึ้น[5,6] เพื่อหาแนวทางการบำบัดที่เหมาะสมสำหรับการจัดการน้ำเสียจากใบโอติเซลต่อต้นทุนการบำบัด

ดังนั้นเทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่งในการประยุกต์ใช้กับขั้นตอนการทำให้ใบโอติเซลบริสุทธิ์เพราะเทคโนโลยีเมมเบรนได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพการแยกโดยไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนเฟสจึงลดการใช้พลังงาน ลดการใช้สารเคมี และไม่มีการปล่อยน้ำเสียสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและง่ายต่อการทำงานเมื่อเทียบกับการแยกอื่นๆ [7] การแยกสารด้วยเทคนิคเมมเบรนมีข้อเด่นหลายประการ เช่น ความสามารถแยกองค์ประกอบขนาดใหญ่และเล็ก โดยเฉพาะเมื่อสารป้อนมีความเข้มข้นในระดับต่ำได้ดีประกอบกับกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนต่ำ (ขึ้นกับลักษณะสารป้อน) จึงทำให้มีคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพเหมือนหรือใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เริ่มต้น ซึ่งการทำให้บริสุทธิ์และนำกลับคืนผลิตภัณฑ์เสียค่าใช้จ่ายสูง โดยเฉพาะในแง่ของพลังงานที่ต้องใช้เมื่อเทียบกับกระบวนการทั่วไป [8,9]

ปัจจุบันเทคโนโลยีเมมเบรนได้ถูกพัฒนาอย่างมาก มีการผลิตมากขึ้นและราคาเมมเบรนทั่วโลกมีราคาถูกลงมาก เมมเบรนทำงานได้ทั้งแบบกว้างและเฉพาะเจาะจงในการแยกสารได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามปัญหาหลักของการใช้เมมเบรนคือการอุดตันและการเกิด ฟา้ลว์ลิงเป็นหลัก ทำให้ฟลักซ์ลดลงอายุเมมเบรนสั้นลงและจำเป็นต้องมีการล้างเมมเบรนบ่อยครั้งเพื่อฟื้นฟูการทำงานกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนจึงมีปัญหาสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการนำไปใช้งานจริง คือการลดลงของฟลักซ์เพอมีอเทอในระหว่างการทำงาน ทั้งนี้เป็นผลมาจากฟา้ลว์ลิงและคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน การลดปัญหาคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันสามารถทำได้จากการปรับสภาวะการทำงานของกระบวนการกรอง การเกิดฟา้ลว์ลิงของเยื่อกรองขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น สภาวะดำเนินงาน คุณสมบัติสารป้อน ชนิดเยื่อแผ่น เป็นต้น

สำหรับกำลังการผลิตใบโอติเซลในสหรัฐอเมริกาเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 6.6 ล้านแกลลอนต่อปี จากปีค.ศ. 2006 ถึง 2012 และในประเทศไทยมีกำลังการผลิตใบโอติเซลจาก 0.36 เป็น 8.5 ล้านลิตร/วัน

แต่จะสูญเสียไปโอดีเซล 20 ลิตร ในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย จากไปโอดีเซลดิบ 100 ลิตรที่ผลิตได้ [10] การใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของไปโอดีเซล จึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่งและในปัจจุบันต่างประเทศมีความสนใจอย่างมากในการพัฒนาใช้เทคโนโลยีเมมเบรนควบคู่ในกระบวนการผลิตไปโอดีเซลและโอเลโอเคมีคัลส์แบบเดิมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยก ลดต้นทุนการทำงาน ความง่ายในการปฏิบัติงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในประเทศไทยยังมีงานประยุกต์เมมเบรนในส่วนนี้น้อย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันเพื่อแยกกลีเซอรอลจากไปโอดีเซล โดยศึกษาถึงความสามารถการแยกกลีเซอรอลและปัญหาฟอสฟอรัสที่มีต่อฟลักซ์เพอมีเอท บนฐานความดันและชนิดของเมมเบรน

1.2 วัตถุประสงค์การทำวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกกลีเซอรอลจากไปโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนเกรดการคัดระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

1.2.2 วิเคราะห์กลไกการเกิดฟอสฟอรัสจากกระบวนการเมมเบรน

1.3 ขอบเขตการทำวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองการแยกด้วยชุดกรองแบบปิดตาย และใช้เยื่อกรองเกรดการคัดต่างประเทศ โดยศึกษาบนฐานของขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด (molecular weight cut off, MWCO) และความดัน

1.3.2 การทดลองการกรองด้วยเมมเบรนเกรดการคัด ช่วงความดันการกรองในระดับอัลตราฟิลเตรชัน คือ 4-20 บาร์

1.3.3 ชนิดเยื่อกรองที่ใช้ในการทดลอง

1.3.3.1 เยื่อกรองเกรดการคัดชนิด พอลิเอเธอร์ซัลโฟน (polyether sulfone; PES) ระดับอัลตราฟิลเตรชัน คือ UP005 UP010 UH030 และ UP150

1.3.3.2 เยื่อกรองเกรดการคัดชนิด พอลิเอเธอร์ซัลโฟน (polyether sulfone; PES) ระดับนาโนฟิลเตรชัน คือ NP010

1.3.4 ประเมินการลดลงของฟลักซ์และความสามารถกักกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงาน

1.3.5 วิเคราะห์กลไกฟอสฟอรัสของกระบวนการเมมเบรน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างผลงานทางวิชาการ

1.4.2 เป็นข้อมูลเทคโนโลยีเพื่อเป็นทางเลือกต่อการพัฒนาการแยกผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล

1.4.3 เป็นพื้นฐานข้อมูลเพื่อพัฒนาชุดกรอง เพื่อเพิ่มคุณภาพการแยก ปริมาณฟลักซ์และลดการเกิดฟัลลิ่ง เพื่อนำไปพัฒนาสร้างเครื่องมือต้นแบบ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันเพื่อแยกเกลือออกจากไบโอดีเซลและกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีดังต่อไปนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Magno Jose Alves และ คณะ (2013) ศึกษาการทำไบโอดีเซลบริสุทธิ์ด้วยเทคโนโลยีเมมเบรน ด้วยการกรองระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุน 0.22 และ 0.33 ไมครอน ณ ความดัน 1 และ 2 บาร์ ตามลำดับ และอัลตราฟิลเตรชันที่มี 10 และ 30 kDa ณ ความดัน 4 บาร์ และมีการเติมน้ำลงในไบโอดีเซลก่อนกรอง โดยใช้ชุดเครื่องกรองแบบปิดตาย พบว่าเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าแต่คุณสมบัติของเพอร์มิเอทมีค่าปริมาณเกลือไม่ผ่านค่าตามมาตรฐาน ในขณะที่เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันขนาด 30 kDa ไม่สามารถทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ตามมาตรฐานเช่นกัน สำหรับเมมเบรนขนาด 10 kDa ให้ค่าฟลักซ์การไหลคงที่และสามารถแยกเกลือออกจากไบโอดีเซลเป็นไปตามมาตรฐานปริมาณเกลือในไบโอดีเซลน้อยกว่าร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก [11]

Yong Wang และคณะ (2009) ศึกษาการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ด้วยการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้สารป้อนเป็นไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันปาล์มและเมมเบรนชนิดเซรามิก ระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุน 0.1, 0.2 และ 0.6 μm ที่สภาวะการทำงาน 0.15 MPa อุณหภูมิ 60°C ผลการศึกษาแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณโลหะและปริมาณเกลือในเพอร์มิเอท ผลการทดลองพบว่าเมมเบรนเซรามิกที่มีขนาดความพรุน 0.1 μm ค่าฟลักซ์คงที่ประมาณ 300 $\text{Lm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ให้ค่าโพแทสเซียม 1.40 mg/kg โซเดียม 1.78 mg/kg แคลเซียม 0.81 mg/kg แมกนีเซียม 0.20 mg/kg และปริมาณเกลืออิสระ 0.0108 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน EN 14538 [12]

Juan Jose Torres และ คณะ (2017) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยใช้สารป้อนได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองในระหว่างกระบวนการรีไฟน์กับเอทานอลในอัตราส่วน 5:1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก การทดลองการกรองใช้เมมเบรนพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องแล็บด้วย poly(vinylidene fluoride) (PVDF) ที่มีขนาด MWCO 570-600 kDa และ poly(sulfone) (PSf) ที่มีขนาด MWCO 75-81 kDa ทำการทดลองที่ความดัน 5 บาร์ และ 7 บาร์ เป็น

เวลา 120 นาที ผลการทดลองพบว่าเมมเบรน PVDF ให้ค่าฟลักซ์และการกักกันการที่ต่ำกว่าเมมเบรน PSf โดยให้ค่าฟลักซ์สูงถึง $9.5 \text{ L/m}^2 \text{ h}$ และ ค่าการกักกันกลีเซอรอลทั้งหมด 67.3% ที่อุณหภูมิ 30°C ถึงแม้เมมเบรน PVDF จะมีประสิทธิภาพการแยกที่ดี แต่จำเป็นต้องมีการพัฒนาค่าเพอร์มิเอทและค่าการเลือกผ่านให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น [13]

Maria Carolina Se'rgi Gomes และคณะ (2013) ศึกษาปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักต่อความสามารถในการกำจัดกลีเซอรอลจากไบโอดีเซลด้วยกระบวนการกรองแบบไหลขวาง ด้วยเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน 0.2, 0.1 และ $0.05 \mu\text{m}$ ที่สภาวะอุณหภูมิ 50°C ความดัน 1.0, 2.0 และ 3.0 บาร์ และระดับอัลตราฟิลเตรชันมีขนาด MWCO 20 kDa และที่ขนาดของรูพรุน $0.05 \mu\text{m}$ ที่สภาวะอุณหภูมิ 50°C ความดัน 1.0, 2.0 และ 3.0 บาร์ โดยสารป้อนได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการดีกัมและเอทานอล และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาแสดงอยู่ในเทอมของฟลักซ์และปริมาณกลีเซอรอลแยกได้ พบว่าการกรองระดับไมโครฟิลเตรชันมีฟลักซ์การไหลที่ดีที่สุดอยู่ที่การทดลองเติมน้ำ 10% ระดับอัลตราฟิลเตรชัน $0.05 \mu\text{m}$ และ 20 kDa ภายใต้อัตราความดัน 1 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์การไหลมากกว่า $60 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ มีปริมาณกลีเซอรอลในเพอร์มิเอทน้อยกว่าร้อยละ 0.02 [14]

Maria Carolina Sérgio Gomes และคณะ (2015) ศึกษาประสิทธิภาพเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันควบคู่กับการเติมน้ำในการกำจัดกลีเซอรอลจากไบโอดีเซล โดยสารป้อนได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการดีกัมและน้ำมันคาโนลาด้วยกระบวนการกรองแบบไหลขวาง โดยใช้เยื่อกรองเซรามิกที่มีขนาด MWCO 20 kDa และขนาดของรูพรุน $0.05 \mu\text{m}$ อุณหภูมิ 50°C ความดัน 0.5-2.0 bar ผลการศึกษาแสดงอยู่ในเทอมของฟลักซ์ที่และปริมาณกลีเซอรอลที่แยกได้พบว่าประสิทธิภาพของเมมเบรนในการกำจัดกลีเซอรอลในน้ำมันคาโนลาไม่ให้ผลดีเมื่อเทียบกับน้ำมันถั่วเหลืองที่ให้ค่าการกักกันกลีเซอรอลอยู่ที่ 13 % โดยน้ำหนัก [15]

Jehad Saleh และ คณะ (2010) ศึกษาความสามารถของกระบวนการเมมเบรนควบคู่กับการเติมน้ำในการกำจัดกลีเซอรอลจาก FAME ด้วยเมมเบรนที่มีขนาด MWCO 100 kDa ที่ความดัน 552 kPa อุณหภูมิ 25°C ด้วยกระบวนการกรองแบบไหลขวาง โดยสารป้อนได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันคาโนลาและเมทานอล พบว่ากระบวนการทางเมมเบรนกับการเติมน้ำร้อยละ 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ให้ผลการแยกกลีเซอรอลที่ดีสามารถแยกได้ร้อยละ 51-63 โดยน้ำหนัก ซึ่งไบโอดีเซลมีปริมาณกลีเซอรอลน้อยกว่าค่ามาตรฐาน (0.225%) [16]

Atadashi I.M. และคณะ (2014) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จากไบโอดีเซลดิบ โดยสารป้อนได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือเมมเบรนเซรามิกที่มีขนาดรูพรุน 0.05 μm ที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ อุณหภูมิ 50°C พบว่าการแยกด้วยเทคโนโลยี เมมเบรนให้ฟลักซ์การไหล 67 $\text{kg/m}^2 \text{ h}$, 72 $\text{kg/m}^2 \text{ h}$ และ 81 $\text{kg/m}^2 \text{ h}$ สามารถเพิ่มคุณภาพให้ไบโอดีเซล โดยสามารถกักกันตัวเร่งปฏิกิริยาได้ 93.642% ปริมาณโพแทสเซียมลดลงจาก 8.328 mg/L เหลือ 0.312 mg/L ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานกำหนดทั้ง ASTM D6751 และ EN 14214 [17]

Maria Carolina Sérgio Gomes และคณะ (2011) ศึกษาการแยกกลีเซอรอลจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปลงและเอทานอลด้วยอัตราส่วน 1:7 โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยน้ำหนัก ด้วยเซรามิกเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันขนาด 0.2 ไมโครเมตรควบคู่กับการเติมน้ำที่ความดัน 1 2 และ 3 บาร์ ผลการทดลองพบว่าเซรามิกเมมเบรนที่ระดับไมโครฟิลเตรชันสามารถแยกกลีเซอรอลจาก 14% เหลือ 7% และยังพบว่าการดำเนินการที่ความดันสูงสุด (3 บาร์) ไม่ได้ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทและค่าการกักกันที่ดีที่สุด [18]

Maria Carolina Sérgio Gomes และคณะ (2010) ศึกษาการแยกกลีเซอรอลจากไบโอดีเซลด้วยสารตั้งต้นไบโอดีเซล 80% กลีเซอรอล 10% และเอทานอล 10% ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุน 0.2, 0.4 และ 0.8 ไมโครเมตร ณ ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ ผลการทดลองพบว่าดำเนินการกรองด้วยไมโครฟิลเตรชันที่ความดันสูงกว่า 2 บาร์ ทำให้ความสามารถการกักกันลดลง โดยพบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร ดำเนินการที่ความดัน 2 บาร์ให้ค่าฟลักซ์ที่ 78.4 $\text{kg/m}^2 \text{ h}$ และสามารถกักกันกลีเซอรอลได้ 99.4% [19]

Cecilia Pagliero และคณะ (2007) ศึกษาผลกระทบการเกิดฟอสฟอรัสในการกำจัดตัวของน้ำมันดอกทานตะวันและน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์ด้วยการทดลองการกรองแบบปิดตาย ที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 2 และ 6 บาร์ โดยพบว่าเมมเบรนพอลิเมอร์สามารถกักกันฟอสโฟไลปิดได้ถึงร้อยละ 95 [20]

รังสินีย์ ขุนหลัดและคณะ (2557). ศึกษาการแยกฟอสโฟไลปิดและกรดไขมันอิสระในน้ำมันรำข้าวคิบด้วยเมมเบรน ระดับอัลตราฟิลเตรชันที่ความดัน 10 บาร์และนาโนฟิลเตรชันที่ความดัน 28 และ 34 บาร์ ตามลำดับ โดยสารตั้งต้นระหว่างน้ำมันรำข้าวคิบและเฮกเซนในอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตร โดยพบว่าค่าฟลักซ์ของการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันอยู่ที่ 19.717 และ 9.778 $\text{kg/m}^2 \text{ h}$ ให้ค่าความสามารถการกักกันฟอสโฟไลปิดและกรดไขมันอิสระร้อยละ 77.70 และ 68.04 ตามลำดับ ด้วยวิธีวิเคราะห์ AOCS CA 12-55 และ AOCS CA 5a-40.[21]

จิรนนท์ ชันหล่อ และคณะ(2558). ศึกษาการกำจัดฟอสโฟไลปิดและกรดไขมันอิสระในน้ำมันสบู่นำมาด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน (UP005 และ UP150) ชนิดเมมเบรนพอลิอีเธอร์ซัลโฟนที่ความดัน 8-15 บาร์ โดยพบว่าเมมเบรน UP005 ให้ค่าความสามารถการกักกันสูงถึงร้อยละ 88.45 [22]

2.2 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์ ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกับยานพาหนะได้ และยังช่วยรักษาสภาพเครื่องยนต์ให้ใช้งานได้นาน เนื่องจากออกซิเจนในไบโอดีเซลให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อย ช่วยลดมลพิษทางอากาศ รวมทั้งลดการอุดตันของระบบไอเสีย เนื่องจากองค์ประกอบของไบโอดีเซลไม่มีธาตุกำมะถัน แต่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงช่วยการเผาไหม้ได้ดีขึ้น และลดมลพิษซัลเฟอร์-ไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และฝุ่นละออง

2.2.1 วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ น้ำมันพืช น้ำมันพืชใช้แล้ว และไขมันสัตว์ อาทิ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันละหุ่ง น้ำมันงา และน้ำมันดอกทานตะวัน ปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันที่น่าสนใจนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

2.2.2 การผลิตไบโอดีเซล [23]

ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธีคือ การใช้โดยตรงและการผสม ไมโคร-อิมัลชัน (microemulsion) กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต นอกจากนั้นยังมีการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ วิวิธพันธ์ในการผลิตไบโอดีเซลด้วย โดยมีรายละเอียดดังนี้

การใช้โดยตรงและการผสมเป็นการใช้น้ำมันของพืช หรือไขมันจากสัตว์โดยตรง เช่น ใช้น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม หรือ น้ำมันจากไขสัตว์ไปลงในเครื่องยนต์ดีเซล โดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นใด อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญของการใช้น้ำมันพืชโดยตรง คือ ต้องมีการอุ่นน้ำมันในทุกจุดที่มีน้ำมันผ่านเป็นวิธีการที่ได้น้ำมันในราคาที่ถูกโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำน้ำมันพืชซึ่งยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นมาใช้ แต่การที่จะนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยความร้อนในการหลอมเหลวและลดความหนืดของน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ

11-17 เท่า ที่อุณหภูมิตัวน้ำมันพืชยังมีความหนืดสูงขึ้นเป็นลำดับจนเกิดเป็นไข การที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้หัวฉีดน้ำมันฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยาก เป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์

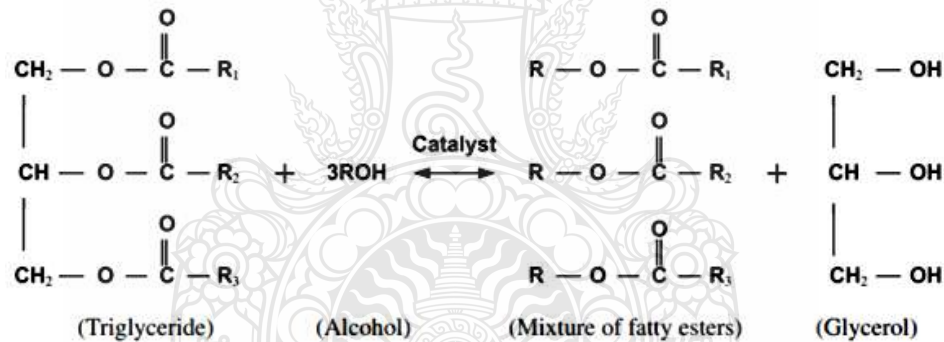
แบบผสมคือเป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือไขมันสัตว์) กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืช เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด เช่น ไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันมะพร้าว เรียกว่า โคโคดีเซล ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่มีการดัดแปลงเครื่องยนต์ จึงต้องเลือกชนิดน้ำมันพืช ชนิดของตัวทำละลาย และสัดส่วนผสมที่เหมาะสมกับพื้นที่และฤดูกาลที่ใช้ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้ และไม่เกิดความยุ่งยากต่างๆตามมา เช่น การเกิดไขในท่อส่งน้ำมันทำให้เกิดการอุดตัน เป็นต้น

ไมโครอิมัลชัน (microemulsion) เป็นการผสมสาร 2 ชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อให้สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยใช้สารลดแรงดึงผิวเป็นตัวประสาน ทำให้อนุภาคแขวนลอยมีขนาดเล็ก อยู่ในช่วง 1–150 นาโนเมตรเท่านั้น ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อแก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืชให้มีความหนืดลดลง โดยใช้ควบคู่กับตัวทำละลายเช่น เมทานอล, เอทานอล และ 1-บิวทานอล ไมโครอิมัลชันที่เกิดจากเมทานอลกับน้ำมันพืชจะได้น้ำมันที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่เมื่อนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่าการสะสมตัวของคราบ (ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอน) เกาะรอบๆ หัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้

กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนจากสารประกอบหนึ่งชนิดไปเป็นสารประกอบอื่นๆ มากกว่าหนึ่งชนิด โดยใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้จะต้องจำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 450 - 600 องศาเซลเซียส สารประกอบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกทำให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งกระบวนการนี้ยากที่จะกำหนดหรือควบคุมให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการเนื่องด้วยความหลากหลายทางปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ (natural fatty acid) และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์หรือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) เป็นที่ยอมรับในสากล และมีการใช้ทั่วไป มีคำจำกัดความว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติเหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ ได้น้ำมันที่มีความคงตัวมากขึ้น สามารถนำไปเติมในเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิด ทั้งเติมโดยตรงและผสมลงในน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ เช่น B5 หมายถึงการผสมไบโอดีเซลต่อน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 5:95 หรือ B100 ซึ่งเป็นน้ำมันไบโอดีเซล

100 % เป็นต้น แต่ปัญหาคือ ต้นทุนการผลิตมีราคาแพงกว่าเมื่อเทียบกับ ไบโอดีเซลแบบอื่นๆ ปัจจุบันราคาของน้ำมันไบโอดีเซลยังสูงกว่าน้ำมันดีเซล 1-2 เท่าตัว อย่างไรก็ตามการนำมาใช้กับเครื่องยนต์มักจะนำน้ำมันดีเซลมาผสมด้วย ซึ่งในปัจจุบันได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระบบขนส่งมวลชน เนื่องจากเป็นน้ำมันที่มีราคาไม่ต่างจากน้ำมันดีเซลมากนัก นอกจากนี้เผาไหม้ได้อย่างหมดจดไม่มีเขม่าควันหลงเหลือให้เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จากความนิยมเป็นอย่างมากเช่นนี้ทำให้ปั้มน้ำมันจำนวนมากนำไบโอดีเซลมาบริการให้กับลูกค้า เชื้อเพลิงชนิดนี้มีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และมีความคงตัว ความหนืดเปลี่ยนแปลงได้น้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน จุดวาบไฟของไบโอดีเซล มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้และการขนส่ง นอกจากนั้นแล้ว ค่าซีเทนที่เป็นดัชนีบอกลักษณะการติดไฟของไบโอดีเซลยังมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลสามารถเตรียมได้จากการนำน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์มาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ และมีด่างหรือ กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะ ได้ผลผลิตเป็นอัลคิลเอสเทอร์ (alkyl ester) และกลีเซอรอล (glycerol) ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Maria Carolina Se' rgi Gomes n และคณะ, 2011) [18]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ กรด เบส และเอนไซม์ การผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก และเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ทำให้ลดระยะเวลาในการผลิตไบโอดีเซลลง แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้จะละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ทำให้แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยาก และมีฤทธิ์กัดกร่อนส่งผลทำให้ต้องใช้น้ำในปริมาณมากในการล้างผลิตภัณฑ์ ทำให้สิ้นเปลืองและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากขั้นตอนการทำปฏิกิริยาที่ผ่านมา

ไบโอดีเซลยังมีส่วนผสมของกลีเซอรอล โซเดียมไฮดรอกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยา สบู่ และแอลกอฮอล์ จึงล้างด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 50-60°C ล้างจนกระทั่งน้ำล้างสะอาดหรือมีค่าเป็นกลาง [24]

2.2.3 ประโยชน์ของไบโอดีเซล

2.2.3.1 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านสิ่งแวดล้อม การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ (National Biodiesel) และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อม (US Environment Protection Agency) ของประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าการใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 145 แรงม้า ว่าสามารถลดวันดำได้มากกว่าร้อยละ 40 และสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก เพราะผลิตจากพืช

2.2.3.2 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ การใช้น้ำมันไบโอดีเซลจะช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากเป็นน้ำมันมีความหนืดใสช่วยหล่อลื่นเครื่องยนต์ได้ดีกว่าน้ำมันปิโตรดีเซลซึ่งต้องเติมซัลเฟอร์ ซึ่งจะจับตัวก่อมลพิษในภายหลังเพื่อช่วยในการหล่อลื่น ดังนั้นน้ำมันปิโตรดีเซลที่ขายในฝรั่งเศส แทนที่จะเติมซัลเฟอร์เขาจะเติมไบโอดีเซล 5% เข้าไปผสมแทน การขนส่งหรือการให้บริการเติมน้ำมันไบโอดีเซลก็ไม่มีอะไรต่างไปจากน้ำมันปิโตรดีเซลและพบว่าน้ำมันไบโอดีเซลให้ความปลอดภัยในการขนส่งและการสัมผัสมากกว่าน้ำมันปิโตรดีเซล เพราะไบโอดีเซลมีจุดติดไฟสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ในขณะที่น้ำมันปิโตรดีเซลมีจุดติดไฟที่ 70 องศาเซลเซียสเท่านั้น นอกจากนี้จะติดไฟได้ยากกว่าแล้วยังมีความเป็นพิษต่ำกว่าน้ำมันปิโตรดีเซลมาก เพราะสกัดจากสารธรรมชาติ น้ำที่ละลายเกลือเข้มข้นยังมีความเป็นพิษสูงกว่าไบโอดีเซลถึง 10 เท่า ดังนั้น การขนส่งและการสัมผัสน้ำมันไบโอดีเซลจึงปลอดภัยเท่ากับการขนส่งน้ำมันพืช

2.2.4 ข้อเสียของน้ำมันไบโอดีเซล [25]

2.2.4.1 ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติเป็นสารชะล้างที่ดี หากใช้น้ำมันไบโอดีเซล 100% กับเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบันจะทำให้ชิ้นส่วนท่อทางต่างๆ ที่ทำจากยางธรรมชาติเปื่อยยุ่ยได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนชิ้นส่วนท่อต่างๆที่น้ำมันไหลผ่านให้เป็นอย่างสังเคราะห์เท่านั้นก็หมดปัญหา

2.2.4.2 น้ำมันไบโอดีเซลแบบผสม เช่น ปิโตรดีเซล 80% ไบโอดีเซล 20% นั้นไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนท่ออย่างเพียงแต่เปลี่ยนไส้กรองน้ำมันหลังจากใช้ครั้งแรกไปได้สักพักเท่านั้น เพราะไบโอดีเซลจะไปชะล้างคราบเขม่าและคราบสกปรกอื่นๆที่เคยติดค้างอยู่ในระบบเครื่องยนต์ หลังจากนั้นก็ใช้ไปตามปกติเหมือนเดิม

2.2.4.3 ในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลทำให้เกิดน้ำเสียเป็นปริมาณมากและเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

2.3 กลีเซอรอล [26]

กลีเซอรอลดิบ (crude glycerol)) เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เพื่อผลิตไบโอดีเซล ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากต้องมีการจำกัดกลีเซอรอลดิบที่ผลิตได้มากกว่าร้อยละ 10 ของผลผลิตไบโอดีเซล ซึ่งส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ดีเซลและคุณภาพของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

กลีเซอรอลเป็นสารโพลีไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) ที่มีสูตรเคมี $C_3H_8O_3$ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นหมู่ไฮดรอกซิล สามารถละลายน้ำและแอลกอฮอล์ได้ มีความคงตัวสูงในสภาวะปกติของการใช้งานและเก็บรักษา กลีเซอรอลดิบเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เพื่อผลิตไบโอดีเซล ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากต้องมีการจำกัดกลีเซอรอลดิบที่ผลิตได้มากกว่าร้อยละ 10 ของผลผลิตไบโอดีเซล ซึ่งส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ดีเซลและคุณภาพของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล จึงมีการนำกลีเซอรอลมาใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลาย ได้แก่ผลิตภัณฑ์ยา อาหาร เครื่องสำอาง กระจาย เป็นต้น กลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เรียกว่ากลีเซอรอลดิบ ประกอบด้วย กลีเซอรอล 58-82% เอทานอลหรือเมทานอล 1-2% น้ำ 10-12% โซเดียมคลอไรด์ 6-8% สารประกอบอินทรีย์ (เมทิล/เอทิลเอสเทอร์ และกรดไขมันอิสระ 1-2% (Cvengros และ Povazance, 1996) ในกระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์นั้นมีหลายวิธี เช่น การใช้กระบวนการแยกสารอินทรีย์และสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกโดยใช้กรดชนิดต่างๆ เพื่อเปลี่ยนสบู่เป็นกรดไขมันและแยกชั้นสารอินทรีย์ออก จากนั้นปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก่อนเข้าเครื่องระเหยเพื่อแยกเมทานอลและน้ำ ศึกษาผลผลิตและคุณภาพของกลีเซอรอลที่แยกได้ กลีเซอรอลที่ผ่านกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์ประมาณ 50-85 % จากนั้นต้องทำให้บริสุทธิ์ เพิ่มขึ้นโดยวิธีการกลั่นสุญญากาศ และกระบวนการฟอกสีเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม สุธารักษ์ บุญโชติ (2547) รายงานว่าชนิดและปริมาณของกรดที่เหมาะสมในการแยกกลีเซอรอลออกจากสารอินทรีย์มีความสำคัญต่อปริมาณผลผลิตและประสิทธิภาพทั้งในขั้นตอนการแยก สารอินทรีย์และขั้นตอนการกลั่นกลีเซอรอลเป็นสารที่มีจุดเดือดที่ 290 °C ที่ความดัน 760 mmHg ดังนั้นการกลั่นบริสุทธิ์กลีเซอรอลให้มีประสิทธิภาพต้องใช้ระบบการกลั่นสุญญากาศที่มีความดันเพิ่มเข้ามาในระบบ เพื่อให้กลีเซอรอลระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C ทำให้การแยกกลีเซอรอลออกจากสิ่งเจือปนง่ายขึ้น ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจำเป็นต้องมีการศึกษา วิธีการการกลั่น คุณสมบัติของสารแต่ละชนิดที่ทำการกลั่น และเทคนิคการฟอกสีกลีเซอรอลในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้วิธีการกลั่นและการฟอกสีที่เหมาะสมในการผลิตกลีเซอรอลที่มีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานการค้า นอกเหนือจากกระบวนการที่ได้กล่าวมาในข้างต้นแล้ว การแยก

กลีเซอรอลยังสามารถทำได้โดยกระบวนการเมมเบรน งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาเกี่ยวกับการแยกกลีเซอรอลโดยกระบวนการเมมเบรนเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนแต่ละขนาดและศึกษากลไกการกรองด้วยเมมเบรน [27]

2.4 กรดไขมันอิสระ (free fatty acid)

กรดไขมันอิสระหมายถึงกรดไขมัน (fatty acid) ที่ไม่ได้รวมอยู่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยปกติกรดไขมันเป็นลิพิด (lipid) มักพบอยู่ในน้ำมันและไขมันที่ใช้ปรุงอาหารบริโภค โดยจะรวมกันในรูปของไตรกลีเซอไรด์ หากถูกแยกออกมาโดยการไฮโดรไลซ์ จะอยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระ การเกิดกรดไขมันอิสระในอาหารเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของน้ำมันพืช ไขมัน และน้ำมันทอดซ้ำรวมทั้งอาหารที่มีไขมันสูง ปริมาณกรดไขมันอิสระ เป็นต้นเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียอาหาร (food spoilage) คือการเกิดกลิ่นผิดปกติ (off flavor) ที่เรียกว่า กลิ่นหืน (rancidity) และ ทำให้ค่าความเป็นกรด (acid value, AV) ของน้ำมันสูงขึ้น กรดไขมันอิสระที่เป็นกรดไขมันที่มีสายสั้น (short chain fatty acid) เช่น butyric acid ตัวมันเองมีกลิ่นเมื่อหลุดออกมาเป็นโมเลกุลอิสระทำให้เกิดกลิ่นผิดปกติในอาหาร นอกจากนี้กรดไขมันอิสระประเภทกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) เป็นสาเหตุเบื้องต้นของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาถูกโซ่ที่ทำให้การเหม็นหืนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว สาเหตุของการเกิดกรดไขมันอิสระไตรกลีเซอไรด์ ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ไลเปส โดยมีน้ำ เป็นส่วนร่วมในปฏิกิริยา เรียกว่า hydrolytic rancidity กรดไขมันอิสระมีองค์ประกอบหลักคือ กรดปาล์มมิติก กรดโอเลอิก และกรดสเตียริก มีรายละเอียดดังนี้

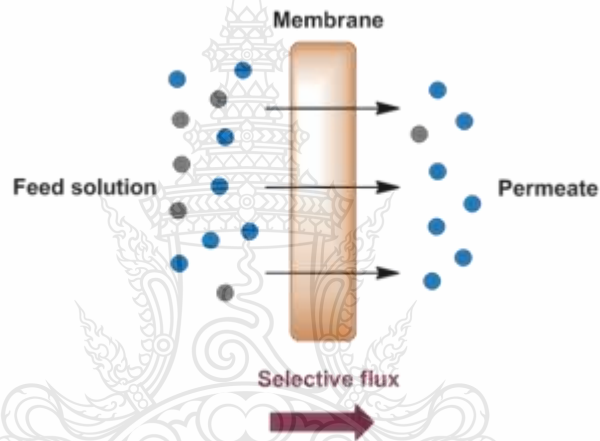
2.4.1 กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) เป็นกรดไขมันประเภทกรดไขมันชนิดอิ่มตัว (saturated fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุล 16 อะตอม พบมากในน้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว

2.4.2 กรดโอเลอิก (oleic acid) มีชื่อทางเคมีว่า octadecenoic acid เป็นกรดไขมัน (fatty acid) ประเภทกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 อัน ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9 จัดเป็น monounsaturated fatty acid

2.4.3 กรดสเตียริก (stearic acid) เป็นสารที่เกิดไขมันและน้ำมันจากสัตว์ เป็นผลึก สีขาวมันเงา ลักษณะเฉพาะคือมีกลิ่นหืนของไขมัน

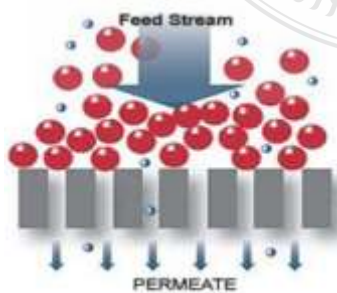
2.5 เทคโนโลยีเมมเบรน [28]

หลักการของเทคโนโลยีเมมเบรน หรือกระบวนการแยกสารละลายด้วยเมมเบรน เป็นกระบวนการกรองโดยอาศัยแรงขับเคลื่อนนอกถ่วงคือ สารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลเล็กจะผ่านเมมเบรนไปได้โดยอาศัยแรงดันขับเคลื่อนสารเนื่องจากผลต่างของความดันระหว่างเมมเบรน (trans membrane pressure : TMP) ส่วนตัวถูกละลายจะถูกเมมเบรนกักไว้เรียกว่า รีเทนเตต (retentate) หรือสารละลายเข้มข้นส่วนตัวทำละลายและตัวถูกละลายบางส่วนที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ผ่านเมมเบรน ไปเรียกว่า เพอร์มิเอท (permeate) ซึ่งส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นเพอร์มิเอทหรือรีเทนเตต แล้วแต่ความต้องการของกระบวนการ

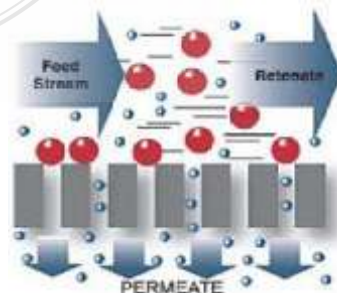


รูปที่ 2.2 หลักการของเทคโนโลยีเมมเบรน (Juan Jose Torres และ คณะ, 2017) [13]

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (เยื่อแผ่น หรือ เยื่อ: membrane) คือการกรองโดยใช้เยื่อบาง เพื่อการแยกของเหลวที่มีส่วนประกอบหลายชนิดออกจากกัน ทิศทางการกรองมีทั้งเป็นแบบไหลขวาง (cross flow) และแบบปิดตาย (dead end)



รูปที่ 2.3 การกรองแบบไหลขวาง[9]



รูปที่ 2.4 การกรองแบบปิดตาย[9]

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเมมเบรนชนิดปิดตายและไหลขวาง

กระบวนการเมมเบรนแบบปิดตาย	กระบวนการเมมเบรนแบบไหลขวาง
1. เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดเค้กหรือการสะสมของอนุภาคบนผิวหน้าเมมเบรนได้ง่าย	1. เป็นกระบวนการที่สามารถลดการสะสมของอนุภาคและการเกิดเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน
2. เป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับการกรองที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ หรือเป็นการกรองในปริมาณน้อยๆ เพื่อทดสอบเมมเบรน	2. เป็นกระบวนการที่การกรองสารในปริมาณมากๆ
3. เหมาะกับกระบวนการที่ไม่ต่อเนื่อง เพราะต้องมีการกำจัดเค้กออกจากผิวหน้าของเมมเบรน	

ที่มา : รัจนา จิระรัตนานนท์. 2541

การกรองด้วยเมมเบรนเพื่อคัดกรองแยกสารนั้น ความสามารถในการคัดกรองแยกสารและอัตราการกรองเป็นสิ่งที่มีความสำคัญที่ต้องพิจารณา ซึ่งขึ้นกับกลไกในการคัดกรองและการซึมผ่านเมมเบรนของสารที่ต้องการแยกกลไกดังกล่าวสามารถอธิบายได้ในสองลักษณะดังนี้

1) กลไกการซึมแพร่ผ่าน (diffusion) คือ สารที่จะซึมแพร่ผ่านเมมเบรน (permeant) เกิดการละลายเข้าไปในเนื้อเมมเบรนก่อน แล้วซึมแพร่ผ่านโดยใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร (concentration gradient) สารจะแพร่จากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ความสามารถในการแยกสารเกิดจากความแตกต่างของความสามารถละลายของสารและความเร็วในการซึมแพร่ในเนื้อเมมเบรนของสารเข้าไปในเนื้อเมมเบรนแต่ละชนิด ทำให้สารแต่ละชนิดมีการซึมทะลุผ่านเมมเบรนได้ต่างกัน อัตราการซึมแพร่ผ่านเมมเบรนจะเป็นไปตามกฎของฟลิค (Flick's law) ดังสมการที่ 2.1

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dx} \quad (2.1)$$

โดยที่ J_i คือ ฟลักซ์ของสาร i หรืออัตราการซึมผ่านเมมเบรนของสาร ต่อหน่วยพื้นที่ของเยื่อแผ่น ($g/m^2 \cdot s$)

D_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมแพร่ผ่าน (cm^2/s) ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารที่ต้องการแยก วัสดุเมมเบรน และอุณหภูมิ
$\frac{dC_i}{dx}$	คือ	เกรเดียนต์ความเข้มข้น หรือความชันของความเข้มข้น แสดงถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร i ที่ตำแหน่งต่างๆ

2) กลไกการไหลผ่านรูพรุน (pore-flow module) คือ อนุภาคขนาดเล็กของสารที่ต้องการคัดกรองเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนของเมมเบรนแล้วเกิดการชนกับผนังรูพรุน เกิดความเสียดทาน ต้านทานการไหลของอนุภาคผ่านรูพรุนของเมมเบรน ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ความดันเป็นตัวขับเพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านรูพรุน ความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านรูพรุนขึ้นกับความแตกต่างของความดัน อย่างไรก็ตามกลไกการไหลผ่านรูพรุนเหมาะกับการไหลผ่านตัวกลางที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมักสอดคล้องกับกฎความสัมพันธ์ของอัตราการไหลหรือฟลักซ์ของสารที่ไหลผ่านเยื่อแผ่นเป็นไปตามกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ดังสมการ 2.2

$$J_i = K' c_i \frac{dp}{dx} \quad (2.2)$$

โดยที่	$\frac{dp}{dx}$	คือ	เกรเดียนต์ความดัน (Pressure Gradient) เป็นความแตกต่างของความดันในรูพรุนที่ระยะต่างๆ
	C_i	คือ	ความเข้มข้นของสาร i ที่อยู่ในตัวกลาง (เมมเบรน)
	K'	คือ	สัมประสิทธิ์ การไหลผ่านเยื่อแผ่นที่สะท้อนถึงคุณสมบัติเฉพาะของเยื่อแผ่น และขนาดอนุภาค

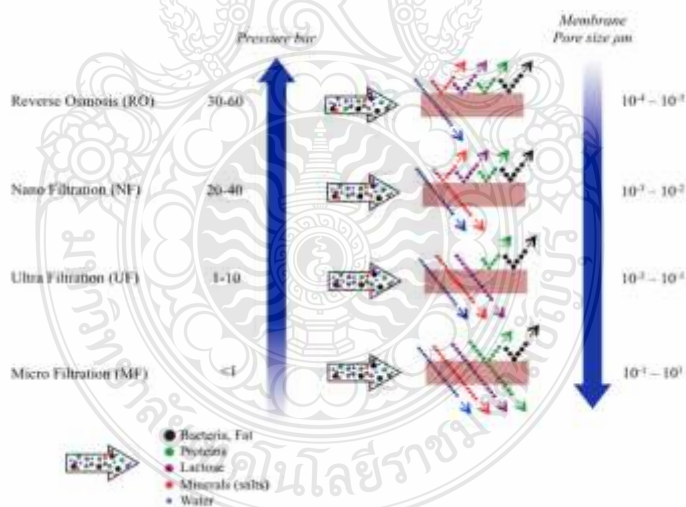
2.5.1 ชนิดกระบวนการเมมเบรน

กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้หลายแบบ ในที่นี้ขอกล่าวถึงระบบการกรองแบบที่สารป้อนมีเฟสเป็นของเหลวและใช้ความดันเป็นแรงขับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ โดยสามารถแบ่งอย่างกว้างๆ ได้ 3 ระบบ ดังนี้

1) กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) มีขนาดรูพรุนเมมเบรนในช่วง 10^{-1} - 10^1 ไมโครเมตร ตัวถูกละลายที่ใช้แยกโดยเยื่อแผ่นชนิดนี้ จึงมีขนาดเทียบเท่ากับน้ำหนักโมเลกุลตัด (Molecular Weight Cut Off, MWCO) ตั้งแต่ 300,000 ขึ้นไป

2) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) การกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันจะมีลักษณะส่วนใหญ่คล้ายกับการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน แต่แตกต่างกันที่ขนาดรูพรุนของเมมเบรนซึ่งอยู่ในช่วง 10^2 - 10^4 ไมโครเมตร ส่วนใหญ่จะใช้แยกสารคอลลอยด์, จุลินทรีย์, แบคทีเรียไวรัส ออกจากน้ำและสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน โดยความดันที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-10 bar ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น cellulose acetate, polyacrylonitrile และ polyester เป็นต้น ตัวถูกละลายที่ใช้แยกโดยเยื่อแผ่นชนิดนี้ มีขนาดเทียบเท่ากับ MWCO ในช่วง 500-300,000

3) กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration) การกรองในระดับนาโนฟิลเตรชัน มีลักษณะพื้นฐานส่วนใหญ่คล้ายกับ 2 แบบข้างต้น แต่แตกต่างกันที่ขนาดรูพรุนของเยื่อเมมเบรนซึ่งจะอยู่ในช่วง 10^3 - 10^2 ไมโครเมตร โดยความดันที่เหมาะสมอยู่ที่ช่วง 20-40 bar มีความสามารถในการแยกไอออนบางชนิด และสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ (natural organic matter: NOM) ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น polymer organic compounds atomic polyimide และ polyvinyl alcohol เป็นต้น เยื่อกรองนาโนฟิลเตรชันส่วนมากเป็นเยื่อกรองเชิงประกอบ ซึ่งประกอบด้วยชั้นผิวที่มีโครงสร้างแน่นอยู่บนชั้นรองรับที่มีรูพรุนใหญ่กว่าความสามารถในการกักกันเกลือประจุเดี่ยว (เช่น NaCl) ต่ำกว่าเยื่อแผ่นออสโมซิสผัน



รูปที่ 2.5 แสดงความดันและขนาดของเมมเบรนระบบไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน และออสโมซิสผันกลับได้[9]

2.5.2 คุณสมบัติของเมมเบรน

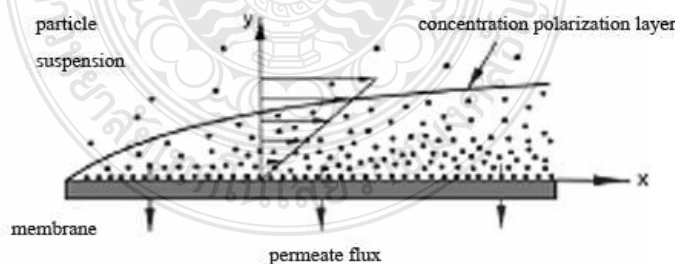
การเลือกเมมเบรนในการใช้งานนั้นจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ทำการผลิตเมมเบรน ทั้งนี้การเลือกวัสดุจะต้องเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์และการใช้งาน เพื่อลดการเกิดฟอสฟอรัส

และให้ผลการกักกันที่ดี ตัวอย่างคุณสมบัติเมมเบรนที่ต้องพิจารณาได้แก่ คุณสมบัติการชอบน้ำ, ลักษณะผิวหน้าเมมเบรน, ประจุของเยื่อแผ่น, ขนาดของรูพรุน และวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน เป็นต้น

สำหรับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ได้แก่ เซรามิกส์ พอลิเมอร์ เป็นต้น วัสดุเซรามิกมีข้อดีหลายประการเช่น ทนทานต่อพีเอช สารเคมี มีอายุการใช้งานที่นาน และการล้างเมมเบรนทำได้ง่ายกว่าวัสดุอื่น อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปเมมเบรนเซรามิกสัในระดับที่มีรูพรุนขนาดเล็กทำได้ยาก ทั้งนี้เป็นเพราะโครงสร้างของวัสดุ สำหรับวัสดุพอลิเมอร์นั้นเป็นที่นิยมในการกระบวนการกรองมากขึ้น สามารถใช้ได้ดีในการกรองตั้งแต่ระดับไมโคร อัลตรา และนาโน แต่ยังคงมีอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าเซรามิกส์ ปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตเมมเบรนอย่างกว้างขวาง แต่มีเพียงวัสดุไม่กี่ชนิดที่นำมาสร้างเมมเบรนแล้วประสบความสำเร็จทั้งในด้านการค้าและเทคนิค โดยตัวอย่างวัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการทำเมมเบรน เช่น โพลีเอเทอร์ซัลโฟน (polyethersulfone) เป็นเมมเบรนที่ทนต่อความร้อนและสารเคมีได้ดีทนแรงอัดได้ ทนต่อกรดด่าง เมมเบรนชนิดนี้นิยมนำมาใช้งานในด้าน อาหาร ยา เทคโนโลยีชีวภาพ และด้านเคมี

2.5.3 ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและฟาล์ว

1) คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (concentration polarization ; CP) การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเกิดจากการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนทำให้บริเวณผิวหน้าเมมเบรนมีความเข้มข้นสูงกว่าในบริเวณที่อยู่ห่างออกไปเมื่อความเข้มข้นบริเวณผิวหน้ามีความเข้มข้นมากๆจะเกิดเป็นชั้นเคลือบที่ผิวหน้าเมมเบรน ดังนั้นความต้านทานการไหลมีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้สารที่ต้องการกรองเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ช้าลงจึงส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าลดลง และมีความสามารถในการกักกันเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.6 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน [29]

2) ฟาล์ว (fouling) ฟาล์วมีผลต่อฟลักซ์และการกักกัน และเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อสมรรถนะของกระบวนการเมมเบรนให้ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อการลดลงของฟลักซ์-เพอร์มิเอตและอายุการใช้งานของเมมเบรนในระยะยาว การลดลงของฟลักซ์ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น

อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของสารป้อนและความเร็วของสารป้อน เป็นต้น ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์ฟัลว่ลิ่งมีความแตกต่างจาก ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพราไรเซชัน โดยปรากฏการณ์ฟัลว่ลิ่งเป็นผลจากการสะสมตัวของอนุภาคและเกิดการอุดตันของตัวถูกละลายทั้งที่ผิวหน้าและภายในของรูพรุนเมมเบรน และไม่สามารถผันกลับได้มีแรงกระทำระหว่างอนุภาคกับเมมเบรนส่งผลให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กลง นอกจากนี้ปรากฏการณ์ฟัลว่ลิ่งนั้น ไม่สามารถใช้วิธีปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินการได้ เช่น การเพิ่มอัตราการไหลหรือปรับเปลี่ยนความดัน แต่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีการใช้สารเคมีเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพราไรเซชันที่สามารถใช้สภาวะการทำงานเพื่อลดการเกิดได้ การเกิดฟัลว่ลิ่งในระยะเวลาานจะทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง โดยกลไกการเกิดฟัลว่ลิ่งสามารถเกิดขึ้น ได้ทั้งบริเวณผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุนของเมมเบรน

3) วิธีการป้องกันหรือการควบคุมการเกิดฟัลว่ลิ่ง

3.1) การบำบัดเบื้องต้น (pretreatment) ในกรณีสารป้อนมีสารแขวนลอยมากนั้น การป้องกันการเกิดฟัลว่ลิ่งจำเป็นต้องมีการบำบัดเบื้องต้น โดยทำให้สารป้อนมีการตกตะกอนหรือการกรองเบื้องต้น

3.2) การดัดแปลงผิวหน้าของเมมเบรน (membrane surface modification) การปรับแต่งคุณสมบัติของเมมเบรนให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมกับสารป้อน เช่น การเติมหมู่ชอบน้ำ หรือหมู่ที่มีประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรน

3.3) การออกแบบอุทกพลศาสตร์ของโมดูลให้เหมาะสม (hydrodynamic optimization of the membrane module) โดยออกแบบให้เกิดแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของสารป้อนที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงๆจะทำให้อนุภาคที่ผิวหน้าลดน้อยลง

3.4) การล้างเมมเบรนด้วยสารเคมี (membrane cleaning) เมื่อฟลักซ์ลดลงจนถึงระดับหนึ่งจำเป็นต้องล้างเมมเบรนเพื่อให้ค่าฟลักซ์กลับคืนมาบางส่วนหรือให้ได้เท่าเดิม สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด ได้แก่ กรดไนตริก, โซเดียมไฮดรอกไซด์, สารซักฟอก (detergent) และสารฆ่าเชื้อ (disinfectant) เป็นต้น

4) ทฤษฎีการกรอง [30]

4.1) ฟลักซ์ (flux) หรือ อัตราการไหลผ่านเยื่อกรองเมมเบรนของเพอร์มิเอต อาจมีหน่วยเป็นปริมาตร, โมล หรือน้ำหนักของเพอร์มิเอต ต่อหน่วยพื้นที่เยื่อกรองต่อเวลา สมการความสัมพันธ์แสดงดังนี้

$$J_i = \frac{V}{a.t} \quad (2.3)$$

โดยที่	J_i	คือ	ฟลักซ์ของสาร i
	V	คือ	ปริมาตรของสาร
	a	คือ	พื้นที่การกรอง
	t	คือ	เวลา

4.2) ฟาล์วตั้ง คือเกิดการสะสมของตัวละลายที่ผิวหน้าของเมมเบรน เนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อเลือกผ่านทำให้ไม่สามารถผ่านไปสู่อีกด้านได้ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กบางส่วนสามารถผ่านรูพรุนของเยื่อกรอง ทำให้เกิดการอุดตันและส่งผลทำให้สมรรถนะหรือค่าฟลักซ์ของเมมเบรนลดลง โดยเฮอเมีย (Hermia) เสนอ 4 แบบจำลองเรื่องการอุดตันสำหรับการกรองสารละลายชนิดนอนนิวโตเนียน (non Newtonian fluid) ที่ระบบมีความดันคงที่เพื่ออธิบายกลไกการลดลงของค่าฟลักซ์โดยทั้ง 4 รูปแบบ ดังนี้

4.2.1. Complete blocking model (CBM)

$$\ln J = \ln J_0 - K_c t \quad (2.4)$$

โดย	J	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาใดๆ หน่วย (m/s)
	J_0	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตตอนเริ่มต้น หน่วย (m/s)
	t	คือ	เวลา (s)
	K_c	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดฟาล์วตั้งตามแบบจำลอง CBM หน่วย (s^{-1})

พล็อตกราฟตามความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงระหว่าง $\ln J$ และ t จะได้ความชัน คือ K_c และจุดตัดแกน Y คือ $\ln J_0$

4.2.2. Intermediate blocking model (IBM)

$$1/J = (1/J_0) + K_i t \quad (2.5)$$

โดย	J	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาใดๆ หน่วย (m/s)
-----	-----	-----	--

J_0	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตตอนเริ่มต้น หน่วย (m/s)
t	คือ	เวลา (s)
K_i	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดฟอสฟอรัสตามแบบจำลอง IBM หน่วย (m^{-1})

พล็อตกราฟตามความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงระหว่าง $1/J$ และ t จะได้ความชัน คือ K_c และจุดตัดแกน Y คือ $1/J_0$

4.2.3. Standard blocking model (SBM)

$$(1/J)^{0.5} = (1/J_0)^{0.5} + K_s t \quad (2.6)$$

โดย	J	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาใดๆ หน่วย (m/s)
	J_0	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตตอนเริ่มต้น หน่วย (m/s)
	t	คือ	เวลา (s)
	K_s	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดฟอสฟอรัสตามแบบจำลอง SBM หน่วย ($m^{-1/2} \cdot s^{-1/2}$)

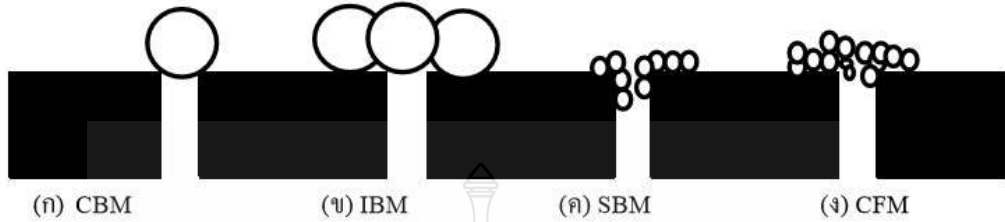
เมื่อพล็อตกราฟตามความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงระหว่าง $(1/J)^{0.5}$ และ t จะได้ความชัน คือ K_c และจุดตัดแกน Y คือ $(1/J_0)^{0.5}$

4.2.4. Cake filtration model (CFM)

$$(1/J)^2 = (1/J_0)^2 + K_c t \quad (2.7)$$

โดย	J	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาใดๆ หน่วย (m/s)
	J_0	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตตอนเริ่มต้น หน่วย (m/s)
	t	คือ	เวลา (s)
	K_c	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดฟอสฟอรัสตามแบบจำลอง CFM หน่วย (s/m^2)

เมื่อพล็อตกราฟตามความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงระหว่าง $(1/J)^2$ และ t จะได้ความชันคือ K_C และจุดตัดแกน Y คือ $(1/J_0)^2$



รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองเรื่องการอุดของเสอเมียทั้ง 4 แบบจำลอง [31]

4.3) ค่าการกักกัน (Rejection coefficient, R) คือ ร้อยละของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองเมมเบรนได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$\%R = [1 - (C_p/C_r)] \times 100 \quad (2.8)$$

โดย R คือ ความสามารถการกักกัน
 C_p คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอร์มิเอต
 C_r คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารป้อน

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ [32]

2.6.1 การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นกระบวนการทางสถิติเพื่อให้ได้สมการถดถอยสำหรับทำนาย ปรัชญาการณต่าง ๆ สิ่งที่ถูกทำนายเรียกว่าตัวแปรเกณฑ์หรือตัวแปรตาม ตัวแปรทำนายคือตัวแปรอิสระ ในกระบวนการนี้ตัวแปรตามหรือตัวแปรเกณฑ์จะมีเพียงตัวเดียว ส่วนตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนายจะมีกี่ตัวก็ได้ ถ้าหากมีตัวเดียวจะเรียกว่าการถดถอยอย่างง่าย (simple regression) หากมีตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป จะเรียกว่า การถดถอยพหุคูณ (multiple regression)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยของตัวแปรอิสระ 1 ตัวและตัวแปรตาม 1 ตัวโดยตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์

เชิงเส้นตรงกันอาจเป็นความสัมพันธ์ตามกันหรือผกผันก็ได้ รูปแบบการวิเคราะห์นี้ เป็นรูปแบบพื้นฐานที่ง่ายที่สุดของการวิเคราะห์การถดถอย โดยมีตัวแบบการถดถอยดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (2.9)$$

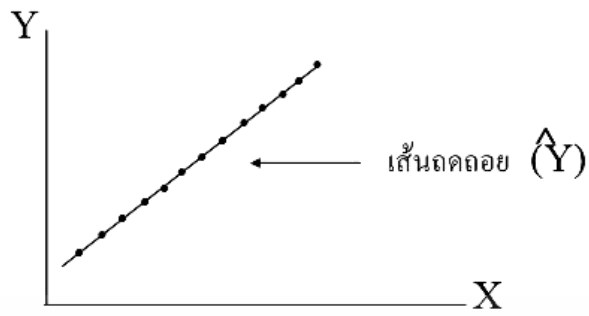
โดย	Y_i	คือ	ค่าของตัวแปรตามในลำดับที่ i
	β_0, β_1	คือ	พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า
	X_i	คือ	ค่าคงที่ของตัวแปรอิสระในลำดับที่ i
	ε_i	คือ	ความคลาดเคลื่อน (random error) ในลำดับที่ i

ค่าพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 เรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) โดยค่า β_1 คือความชันของสมการถดถอยที่บอกให้ทราบถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของการแจกแจงของตัวแปร Y เมื่อตัวแปรอิสระ (X) มีค่าเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ในขณะที่ β_0 คือจุดตัดแกน Y ของสมการถดถอยหรือเป็นค่าเฉลี่ยของการแจกแจงของตัวแปรตาม Y เมื่อตัวแปรอิสระ (X) มีค่าเท่ากับ 0 การตีความ β_0 นั้นหากข้อมูลที่น่าสนใจไม่ได้ครอบคลุมค่า 0 แล้วไม่สมควรที่จะตีความ ค่า β_0

2.6.2 สัมประสิทธิ์การกำหนด (the coefficient of determination)

ก่อนจะใช้สมการถดถอยในการทำนายและประมาณค่าตัวแปร Y ต้องมีการประเมินสมการถดถอยที่ได้จากตัวอย่างก่อน โดยประเมินว่าสมการถดถอยที่ได้นั้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรได้ดีเพียงใด นั่นคือ ผลบวกกำลังสองของเส้นถดถอยส่วน ผลบวกกำลังสองของทั้งหมดควรจะเป็นสัดส่วนที่ใหญ่ขึ้นเพียงนั้น ค่าของสัดส่วนที่ได้นี้เรียกว่าสัมประสิทธิ์การกำหนดหรือสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ แทนด้วย R^2 โดยที่ R^2 มีค่า $0 \leq R^2 \leq 1$

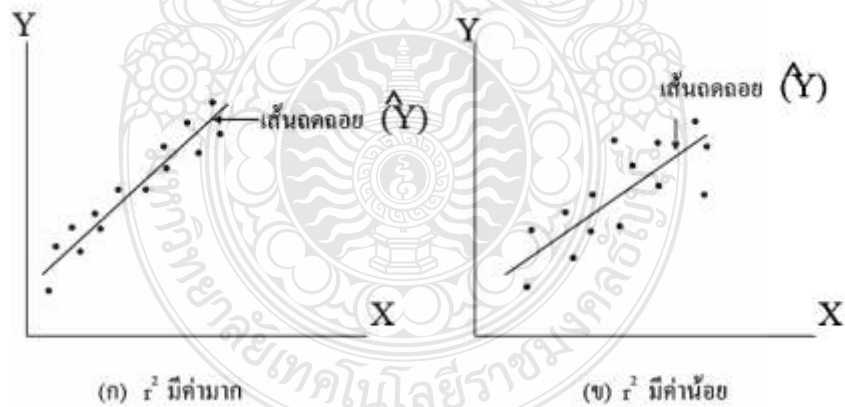
ค่า R^2 ที่มากที่สุดคือ 1 หมายถึงค่าของตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี เนื่องจากตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันมาก สังเกตได้จากทุกตัวของตัวอย่างจะอยู่บนเส้นถดถอย ดังแสดงในภาพที่ 2.8



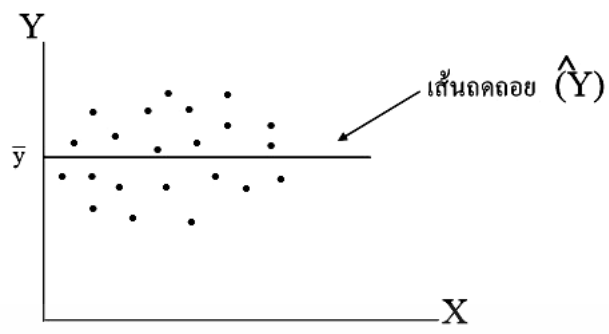
รูปที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากที่สุด ($R^2=1$)

ค่า R^2 เข้าใกล้ 0 หมายถึงค่าของตัวแปรอิสระในสมการถดถอยอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ไม่ดี เนื่องจากตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันน้อย ดังแสดงในภาพที่ 2.9

ค่า R^2 ที่น้อยที่สุดคือ 0 หมายถึงค่าของตัวแปรอิสระในสมการถดถอยไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเนื่องจากตัวแปรตามและตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กัน สังกัดได้จากทุกตัวของตัวอย่างจะไม่อยู่บนเส้นถดถอย ดังแสดงในภาพที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้ 0 (R^2 มีค่าเข้าใกล้ 0)



รูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0 ($R^2 = 0$)



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 น้ำมันไบโอดีเซล

น้ำมันไบโอดีเซลจากการทดลองนี้ได้รับการอนุเคราะห์จาก บริษัท น้ำมันพืชปทุม จำกัด จังหวัดปทุมธานี โดยน้ำมันไบโอดีเซลถูกเก็บรักษาไว้ในภาชนะปิดที่บดแสง ในสภาวะอุณหภูมิห้อง

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 แก๊สไนโตรเจน 99.98 เปอร์เซ็นต์ (Nitrogen, ไทยสเปเชียลแก๊ส จำกัด)

3.1.2.2 โซเดียมเพอร์ไอโอเดต (Sodium periodate, AR. Grade, Fisher)

3.1.2.3 กลีเซอรอล (Glycerol, AR. Grade, Vetec)

3.1.2.4 เมทิลเฮปทาเดคาโนเอต (Methyl heptadecanoate, GC Grade, Fluka)

3.1.2.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, AR. Grade, Ajax Finechem Pty Ltd.)

3.1.2.6 ซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, AR. Grade, J.T baker)

3.1.2.7 อีเทนไดโอด (Ethanediol, AR. Grade, RCI Labscan Analytical Science)

3.1.2.8 โบรโมไทมอลบลู (Bromothymol Blue, AR. Grade, Ajax finechem)

3.1.2.9 โพรพานอล (Propane-2-OL, AR. Grade, RCI Labscan Analytical Science)

3.1.2.10 โทลูอีน (Toluene, AR. Grade, RCI Labscan Analytical Science)

3.1.2.11 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, AR. Grade, Ajax finechem Pty Ltd.)

3.1.2.12 ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein, AR. Grade, Ajax finechem Pty Ltd.)

3.1.2.13 เฮกเซน (Hexane, AR. Grade, RCI Labscan Analytical Science)

3.1.2.14 เมทานอล (Methanol, AR. Grade, RCI Labscan Analytical Science)

3.1.2.15 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 41 (Filter papers, Ashless)

3.1.2.16 อากาศ (Air compressed)

3.1.2.17 แก๊สฮีเลียม 99.98 เปอร์เซ็นต์ (Helium, รังสิตแก๊ส จำกัด)

3.2 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการใช้งาน

3.2.1 เครื่องแก้วสำหรับทำการทดลอง ได้แก่ บีกเกอร์ กระจกบดวง ขวดลูกชมพู่ เป็นต้น

3.2.2 เครื่องกวนแม่เหล็ก ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7 ปรับความเร็วได้ 6 ระดับ

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PGW 3502i สำหรับชั่งน้ำหนักของเพอร์มิเอท

3.2.4 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA 214 สำหรับชั่งน้ำหนักของตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอล

3.2.5 เชื้อกรองเมมเบรน

ในงานวิจัยนี้มีหลักการในการเลือกใช้เมมเบรน มีดังนี้

3.2.5.1 ชนิดเมมเบรนในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมมเบรนพอลิเมอร์เพราะ โพลิเมอร์เป็นวัสดุดีสำหรับผลิตเยื่อแผ่นมีความหลากหลาย ให้การเลือกผ่านที่ดีและสามารถผลิตเยื่อแผ่นได้ทุกโครงสร้างตามที่ต้องการ และเมมเบรน polyether sulfone; PE เป็นหนึ่งในเมมเบรนโพลิเมอร์ที่เป็นชนิด hydrophilic ที่มีลักษณะให้สารผ่านได้เร็ว ทนต่อความร้อนและสารเคมีได้ดี เชื่อมด้วยกลีเซอรอล มีคุณสมบัติที่สามารถละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดี จึงเหมาะสำหรับการใช้งานวิจัย

3.2.5.2 ขนาดของเมมเบรน เนื่องจากเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันนิยมบอกเป็น Molecular weight cut-off; MWCO ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารที่ถูกกักโดยเยื่อแผ่น สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า MWCO จะถูกกักกันโดยเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันมีลักษณะพื้นฐานส่วนใหญ่คล้ายๆกับ แบบข้างต้น แต่ต่างกันที่ขนาดรูพรุนของเยื่อเมมเบรนซึ่งจะอยู่ในช่วง 10^{-3} - 10^{-2} ไมโครเมตร [33] ถึงแม้กลีเซอรอลมีน้ำหนักโมเลกุล 92 กรัม/โมล แต่กลีเซอรอลละลายได้ในน้ำและแอลกอฮอล์ จึงทำให้สามีนขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น ประกอบกับกลีเซอรอลไม่ละลายในน้ำมันและอีเทอร์

จากหลักการที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันเกรดการค้าจากบริษัท Microdyn Nadir ประเทศเยอรมันนี ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1-3.2 ในการแยกกลีเซอรอลจากไบโอดีเซล

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเยื่อกรองเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน

Membrane	Material	Nom.MWCO [kDa]	Driving [Bar]	Permeability [L/m ² hbar]
UP005	PES	5	10-20	>10
UP010	PES	10	4-8	>50
UH030	PESH	30	4-8	>35
UP150	PES	150	4-8	>286

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเยื่อกรองเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน

Membrane	Material	Nom. Retenrion Na ₂ SO ₄ [%]	Driving [Bar]	Water Flux @40 bar [L/(m ² h)]
NP010	PES	35-75	8-15	>200

ก่อนการทดลองทุกครั้ง เยื่อกรองเมมเบรนใหม่ถูกนำไปปรับสภาพด้วยการแช่ FAME เป็นเวลา 15 นาที

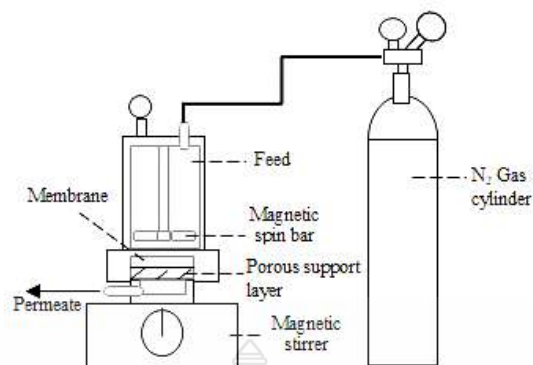
3.2.6 ชุดการกรองแบบปิดตาย

การทดลองนี้ใช้ระบบการกรองแบบปิดตาย โดยส่วนประกอบหลักของชุดการทดลองประกอบไปด้วย

3.2.6.1 ถังแก๊สไนโตรเจนความดันสูง บรรจุแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.98% มีความดันสูงสุด 1,500 psi หรือ 10,500 kPa เพื่อใช้เป็นแรงขับเพื่อให้สารป้อนเคลื่อนที่ผ่านเยื่อกรองเมมเบรน

3.2.6.2 ท่อแสดงนเลสเชื่อมระหว่างถังแก๊สไนโตรเจนกับถังกรองแบบปิดตาย ดังรูปที่

3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบปิดตาย

3.2.6.3 ถังกรองแบบปิดตาย (dead end stirred cell) ปริมาตร 170 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในตัวถังมีการติดตั้งแท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารป้อนในขณะที่ด้านล่างมีแผ่นสแตนเลสไวร์รองรับเยื่อกรองเมมเบรนที่มีพื้นที่การกรอง 19.625 ตารางเซนติเมตร ในการทดลองจะติดตั้งถังป้อนบนเครื่องกวน ด้านบนของถังป้อนจะมีเกจวัดความดันและใช้ท่อสแตนเลสต่อกับถังแก๊สไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพชุดจริงเครื่องมือการกรองแบบปิดตายในการทดลอง

3.3 การเตรียมสารป้อน

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนเพื่อศึกษาฟลักซ์เพอร์มิเอท ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลในไบโอดีเซลสังเคราะห์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลดิบเพื่อใช้เป็นสารป้อน

เพื่อควบคุมสารปนเปื้อนในการทดลองให้มีคุณภาพคงที่ น้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ได้จากบริษัท น้ำมันพืชปทุม จำกัด จึงถูกนำมาล้างเพื่อแยกสารประกอบอื่นๆออก เช่น กลีเซอรอล สารต่างๆ เพื่อหยุดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลต่อน้ำกลั่นในการล้างแต่ละครั้งคือ 1 : 0.5 โดยปริมาตร มีรายละเอียดดังนี้

3.3.1.1 อัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซลต่อน้ำกลั่น 1:0.5 โดยปริมาตร คือ ในกรวยแยกขนาด 1000 มิลลิลิตร เป็นน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 600 มิลลิลิตร และ น้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร

3.3.1.2 เขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที และตั้งทิ้งไว้จนเฟสไบโอดีเซลและเฟสน้ำแยกชั้นกันอย่างชัดเจน

3.3.1.3 วัดค่าพีเอชในเฟสน้ำที่ปล่อยออก เพื่อตรวจสอบสภาพความเป็นด่างที่ปนเปื้อนอยู่ในสารผสม

3.3.1.4 ทำซ้ำ 4 ครั้ง โดยครั้งที่ 4 ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น 1 คืน

3.3.1.5 นำน้ำมันที่ได้จากข้อ 4) ไปผ่านเครื่อง Rotary Evaporator เพื่อกำจัดน้ำหรือเมทานอลที่ตกค้างอยู่ในน้ำมันที่สภาวะ 90 องศาเซลเซียส ความดัน 500 มิลลิบาร์

3.3.1.6 นำน้ำมันที่ได้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นก่อนเก็บใส่ขวดสีชาในตู้ทึบแสง ที่อุณหภูมิห้องเพื่อใช้เป็นสารป้อนในการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลด้วยอัตราส่วน 1:0.5 และตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น



รูปที่ 3.4 การกำจัดน้ำและเมทานอลด้วยเครื่อง Rotary Evaporator



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบน้ำมันไบโอดีเซล: (ด้านซ้าย) ก่อนผ่านเครื่อง Rotary Evaporator และ (ด้านขวา) น้ำมันไบโอดีเซลหลังผ่านเครื่อง Rotary Evaporator

3.4 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของกลีเซอรอล

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการแยกกลีเซอรอลบนฐานของความเข้มข้นสูง โดยพบว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไบโอดีเซลให้ปริมาณกลีเซอรอลประมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตร Marcelo Medre Nobrega และคณะ (2012) [34] กลีเซอรอลที่ได้จากปฏิกิริยามีการกระจายตัวในเฟสน้ำเป็นหลักและพบการกระจายตัวบางส่วนอยู่ในเฟสไบโอดีเซลเช่นกัน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาอัตราส่วนของไบโอดีเซลต่อกลีเซอรอลดังนี้ 85:15, 90:10 95:5 และ 97:3 v/v พบว่าอัตราส่วน 85:15, 90:10 และ 95:5 มีกลีเซอรอลอิสระตกจมอยู่ที่ผิวหน้าเมมเบรน จึงเกิดการขัดขวางการไหลของฟลักซ์เพอร์มิเอท ซึ่งเป็นไปตามหลักการความสามารถละลายของกลีเซอรอลในไบโอดีเซล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็นร้อยละ 3 โดยปริมาตร ซึ่งมีการ

นำเสนองานวิจัย Aminul Islam และคณะ (2016) [35] ของปริมาณเกินพอของกลีเซอรอลคือร้อยละ 4 โดยปริมาตร

3.4.1 การปรับความเข้มข้นของสารป้อน

สารป้อนหรือน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างและการกำจัดน้ำต้องปรับคุณสมบัติโดยการเติมกลีเซอรอล โดยอัตราส่วนระหว่างไบโอดีเซลต่อกลีเซอรอล คือ 97:3 v/v รายละเอียดดังนี้

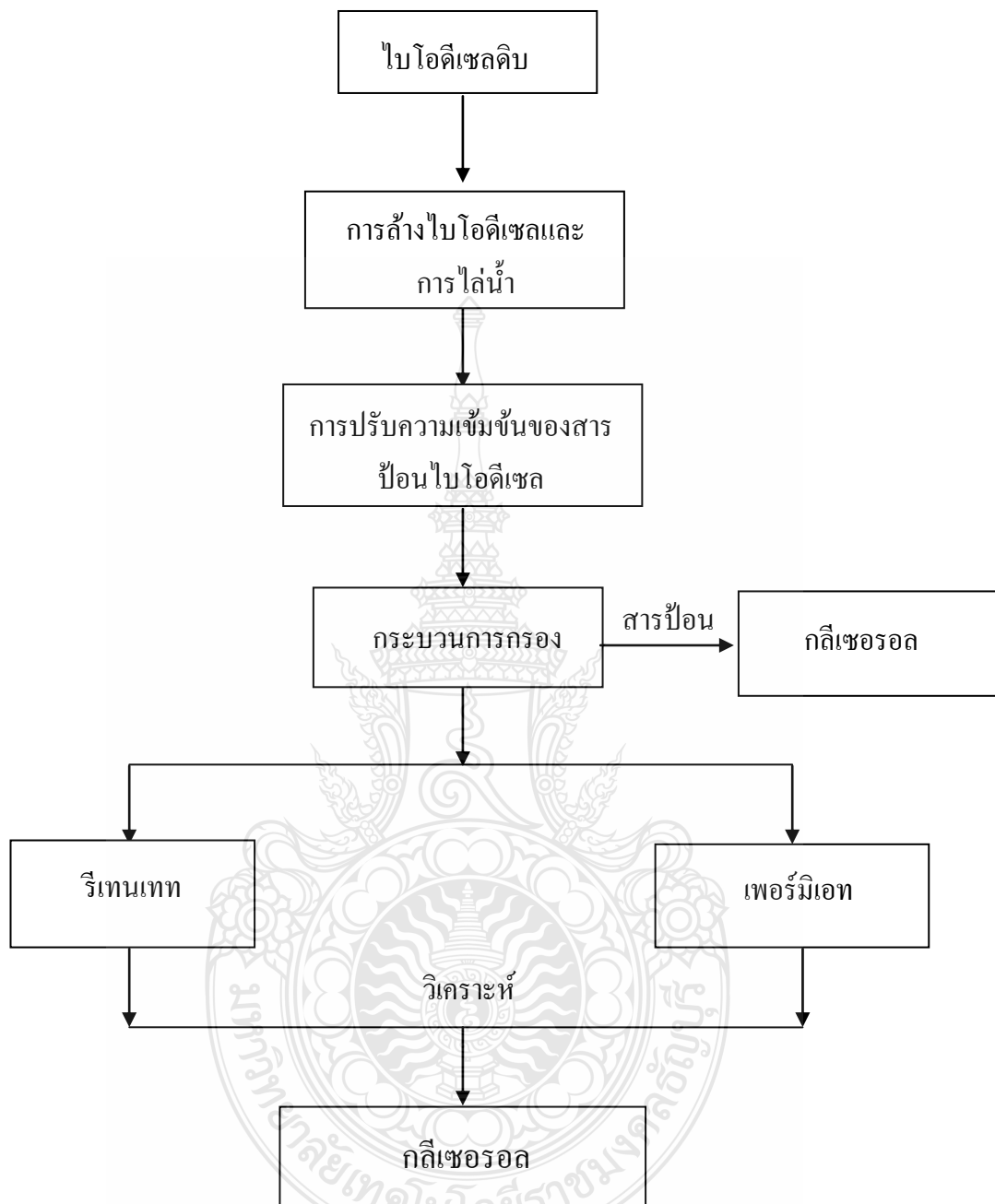
3.4.1.1 ชั่งไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ 127.32 กรัม ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง

3.4.1.2 ชั่งกลีเซอรอล 5.63 กรัม ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง

3.4.1.3 ผสมสารป้อนเป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องกวนสารละลายเพื่อช่วยในการผสม

3.4.1.4 แบ่งสารป้อนออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกนำไปวิเคราะห์ปริมาณเบื้องต้นใช้ปริมาณ 20 มิลลิลิตร และส่วนที่เหลือทั้งหมดนำไปทดลองกรองด้วยชุดการทดลองกรองแบบปิดตาย





รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการทดลอง

3.5 วิธีการทดลองกรอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคโนโลยีการแยกด้วยเยื่อกรองเมมเบรนเพื่อศึกษาฟลักซ์เพอร์มิเอทความสามารถในการกักกันกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 เริ่มจากตัดเยื่อกรองเมมเบรนให้มีขนาดเท่ากับแผ่นรองสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร (พื้นที่การกรอง 19.625 ตารางเซนติเมตร)

3.5.2 ทำการคลายตัวเมมเบรน โดยแช่ใน FAME เป็นเวลา 15 นาที

3.5.3 ประกอบเยื่อกรองเข้ากับชุดอุปกรณ์การกรอง ดังนี้

3.5.3.1 นำเยื่อกรองเมมเบรนที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาประกอบในชุดกรองแบบปิดตาย โดยชุดกรองแบบนี้ แบ่งได้ 3 ส่วนประกอบหลักคือ

1) ฝาด้านบน จะมีความดันเกจติดอยู่ และมีน็อตสำหรับล็อกฝาด้านบนให้ติดกับตัวท่อ

2) ตัวท่อไว้เก็บตัวอย่าง

3) ฝาด้านล่าง โดยที่ฝาด้านล่างจะมีร่องไว้ใส่เยื่อกรองเมมเบรนและแผ่นสแตนเลส และมีน็อตสำหรับล็อกฝาด้านล่างให้ติดกับตัวท่อ

3.5.3.2 นำเยื่อกรองเมมเบรนวางลงบนแผ่นสแตนเลส โดยให้ด้านที่มีลักษณะมันวาวติดกับแผ่นรอง จากนั้น นำเยื่อกรองเมมเบรนใส่ในร่องของฝาด้านล่าง โดยหงายแผ่นสแตนเลสขึ้นและให้ด้านที่ไม่มันวาวลงไปร่อง ทั้งนี้ต้องแน่ใจว่าขอบของเยื่อกรองจะวางอยู่บนยางโอริงพอดี

3.5.3.3 วางตัวท่อลงบนฝาด้านล่างโดยระวังไม่ให้เยื่อกรองเมมเบรนขยับและล็อกด้วยน็อต (ค่อยๆ ล็อกอย่างสม่ำเสมอทุกๆ ตัว)

3.5.3.4 ทำการใส่สารป้อนปริมาตร 130 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในถังป้อน สำหรับตัวอย่างสารป้อนก่อนทำการทดลองถูกดึงออกมา 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณสาร

3.5.3.5 วางชุดกวนแม่เหล็กลงในถังป้อน ปิดฝาด้านบนและใช้น็อตล็อกให้แน่น

3.5.3.6 ใช้ท่อสแตนเลสต่อระหว่างฝาด้านบนของชุดกรองกับถังเก็บในโตรเจน

3.5.4 เปิดเครื่องกวนแม่เหล็ก

3.5.5 ใช้ขวดลูกผสมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร วางบนเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง โดยจัดให้ปลายท่อทางออกของเพอร์มิเอทที่ฝาด้านล่างของชุดกรองไหลลงในขวดลูกผสมฟูได้พอดี

3.5.6 ปรับความดันระบบด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยการปรับเรกกูเรเตอร์ที่หัวท่อแก๊ส

ไนโตรเจนอย่างช้าๆ สังเกตเข็มของเกจวัดความดันที่ด้านบนของฝาบนของชุดการกรองให้ได้ความดันตามที่ต้องการดังนี้

3.5.6.1 ที่ UP010, UP 150 และ UH 030 ใช้ความดันที่ 4 6 และ 8 บาร์ ณ อุณหภูมิห้อง

3.5.6.2 ที่ UP005 ใช้ความดันที่ 10 15 และ 20 บาร์ ณ อุณหภูมิห้อง

3.5.7 สังเกตที่ขวดลูกผสมฟูให้กระแสเพอร์มิเอทไหลผ่านเยื่อกรองเมมเบรนสู่ขวดลูกผสมฟูหยดแรกจึงเริ่มจับเวลา

3.5.8 ทำการจดน้ำหนักของเพอร์มิเอทที่ได้ทุกๆ 1 นาที และนำไปพล็อตกราฟระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาจนสิ้นสุดการทดลอง การทดลองจะสิ้นสุดเมื่อกราฟเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state)

3.5.9 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างของกระแสเพอร์มิเอทและกระแสรีเทนเทต

3.5.10 ที่อยู่ในถังป้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.7 ทางออกของกระแสเพอร์มิเอทของชุดการกรอง ก่อนเริ่มจับเวลา

3.6 วิธีการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาฟ้าว์ลิ่งที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์และความสามารถในการแยกปริมาณกลีเซอรอลที่แยกได้ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ 2 แบบ ดังนี้

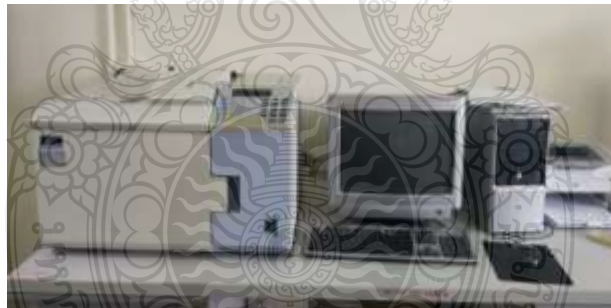
3.6.1 การวิเคราะห์ค่าฟลักซ์และการเกิดฟ้าว์ลิ่ง

3.6.2 การวิเคราะห์ความสามารถการกักกัน โดยวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอลที่แยกได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

3.6.2.1 วิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอลด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติและเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography, GC)



รูปที่ 3.8 เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 848 Titrino Plus



รูปที่ 3.9 ชุดเครื่องวิเคราะห์ GC Perkin รุ่น Autosystem XL

3.6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองอยู่บนฐานของค่าฟังก์ชันเพอร์มิเอทโดยใช้สมการที่ (2.3) ถึงสมการที่ (2.7) ควบคู่กับโปรแกรม Microsoft Excel 2010 ในการคำนวณสมการความสัมพันธ์และสร้างกราฟตามความสัมพันธ์

3.6.4 การวิเคราะห์ความสามารถการกักกัน โดยวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอล

บทที่ 4

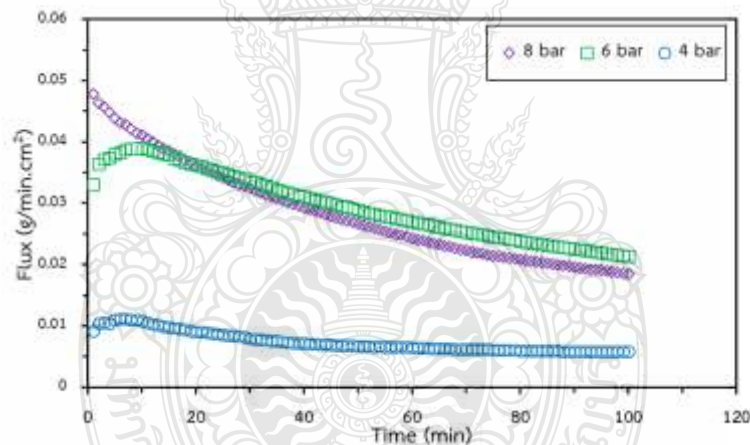
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองแยกกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระในไบโอดีเซลดิบด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนที่ระดับอัลตราฟิลเตรชัน ดังนี้

4.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรอง

4.1.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP150

ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป 4.1 พบว่าความดันมีผลต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตโดยที่สถานะเริ่มต้นการกรอง ณ ความดัน 8 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์สูงที่สุด ทั้งนี้เพราะเป็นความดันในการดำเนินการสูงสุด ส่งผลให้มีแรงขับสูงสุดผ่านเมมเบรน



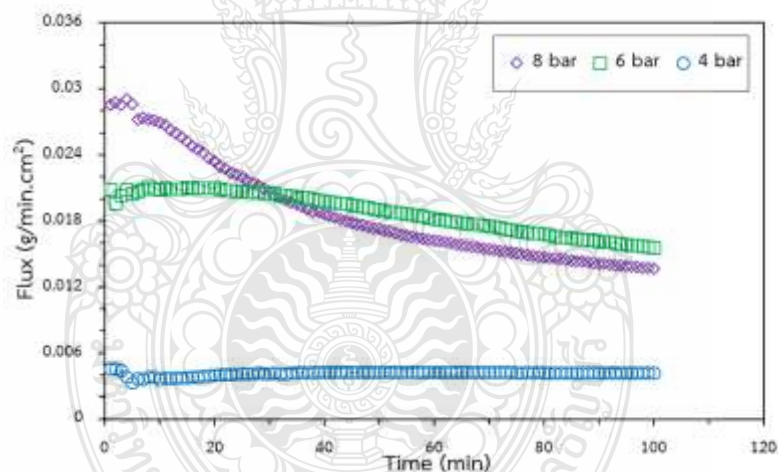
รูปที่ 4.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP150 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์

อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาการกรองนานขึ้นความดันที่สูงอาจส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุนมากขึ้นจึงทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง ซึ่งพบว่าค่าฟลักซ์สุดท้าย ณ ความดัน 8 บาร์ มีค่าต่ำกว่าความดัน 6 บาร์ และเมื่อเปรียบเทียบโปรไฟล์ฟลักซ์ ณ ความดัน 4 และ 6 บาร์ พบว่าฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน โดยการเปลี่ยนแปลงของเพอร์มิเอตฟลักซ์แบ่งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นมีการเพิ่มขึ้นในช่วงสั้นๆ จากนั้นจึงเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงที่สอง คือมีการลดลงของค่า

ฟลักซ์อย่างช้าๆอย่างต่อเนื่องและเข้าสู่สภาวะคงที่ตามระยะเวลาการทดลอง แสดงให้เห็นถึงแรงขับเคลื่อนที่มากกว่าให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ดีกว่า Magno Jose Alves และคณะ (2013) [11]

4.1.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UH030

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า โปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ความดัน 4 บาร์ และ 6 บาร์ มีความคล้ายคลึงกัน โดยการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เพอร์มิเอทแบ่งออกได้สามช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทมีแนวโน้มลดลงในช่วงสั้นๆ และเปลี่ยนไปในช่วงที่สองโดยมีการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์เพอร์มิเอท เพียงเล็กน้อยและเปลี่ยนเข้าช่วงที่สามคือมีการลดลงของฟลักซ์ช้าๆ และโปรไฟล์ฟลักซ์ที่ความดัน 4 และ 6 บาร์มีความแตกต่างของค่าฟลักซ์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เพอร์มิเอท ฟลักซ์สูงขึ้นเมื่อแรงขับเคลื่อนมากขึ้น B. Chakrabarty และคณะ (2008) [36] แตกต่างจากฟลักซ์ ณ ความดัน 8 บาร์ ให้ค่า ฟลักซ์สูงที่สุดในช่วงแรกนั้นพบได้ทั่วไปในการกรองด้วยเมมเบรนเนื่องจากแรงขับเคลื่อนสารที่สูงกว่า

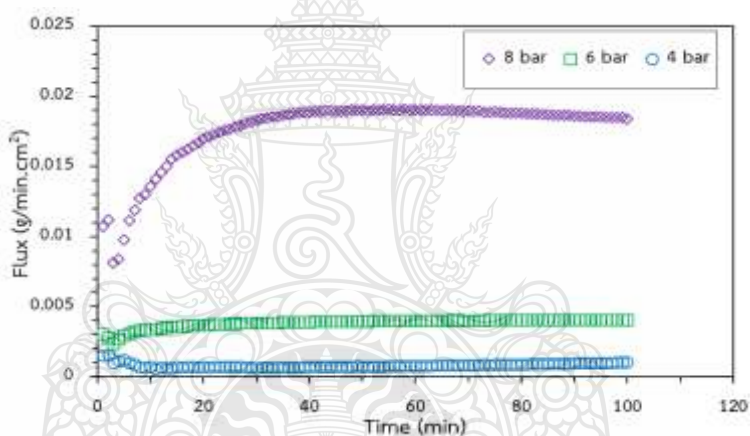


รูปที่ 4.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UH030 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์

และพบว่า ณ ความดัน 8 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์สุดท้ายที่ต่ำกว่าความดัน 6 บาร์ ทั้งนี้เป็นเพราะแรงขับเคลื่อนสารที่สูงกว่าผ่านเมมเบรนและสามารถผลักดันอนุภาคให้ผ่านเมมเบรนได้มากกว่าแรงขับเคลื่อนที่ต่ำกว่าและเมื่อเวลาการกรองนานขึ้นความดันสูงส่งผลทำให้อนุภาคอัดแน่นที่ผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุนมากขึ้น เช่นเดียวกับเมมเบรน UP150 ที่ความดัน 8 บาร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jehad Saleh และคณะ (2010) [16]

4.1.3 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP010

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าโปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ความดัน 6 บาร์ และ 8 บาร์ มีความคล้ายคลึงกัน โดยการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เพอร์มิเอทแบ่งออกได้สองช่วงคือ ช่วงเริ่มต้นค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทมีแนวโน้มลดลงในช่วงสั้นๆ และเปลี่ยนไปในช่วงที่สองคือมีการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทอย่างต่อเนื่องและเข้าสู่สภาวะคงที่ตามระยะเวลาการทดลองอาจเกิดจากแรงขับเคลื่อนที่มากกว่าทำให้มีการขับสารผ่านไปทางเพอร์มิเอทได้มากกว่า X.S. Yi, S.L. Yu และคณะ (2011) [37] และเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรน UP150 และ UH030 พบว่าโปรไฟล์ฟลักซ์มีความแตกต่างทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดรูพรุนที่เล็กลงของ UP010 ร่วมกับสภาวะคอนเซนเตรชันโพลาลิเซชันและฟาล์วลิ่งความแตกต่างของ UP010 อาจเกิดจากการอุดตันที่ผิวหน้าเมมเบรนทำให้อุณหภูมิของสารไม่สามารถผ่านรูพรุนขนาดเล็กได้

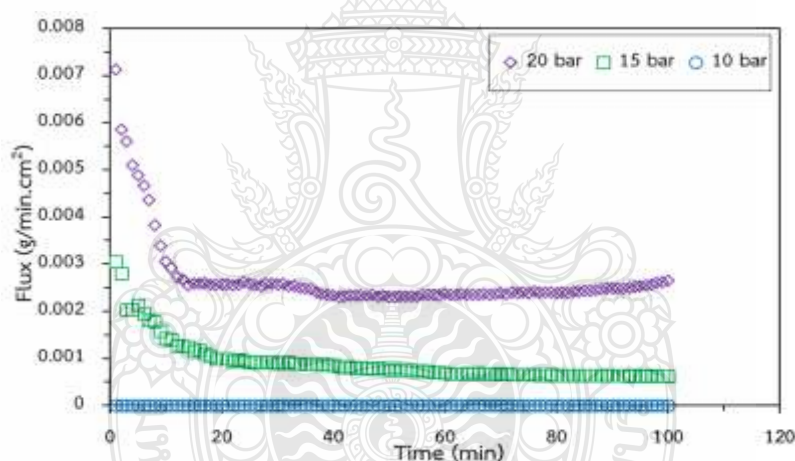


รูปที่ 4.3 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP010 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์

กล่าวคือเมื่อขนาดของอนุภาคและรูพรุนมีความแตกต่างกันอย่างมาก มีผลทำให้สารไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนได้ จึงลดการอุดตันภายในรูพรุน ประกอบกับระบบมีตัวกวนจึงทำให้อนุภาคนขนาดใหญ่มีการกระจายในเฟสของน้ำมันและอนุภาคเกิดการรวมตัวทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ในช่วงเริ่มต้นแทน I.M. Atadashi และคณะ (2014) [17] ซึ่งผลการทดลองในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์ของงานวิจัยโดย Saleh และคณะ (2010) [16] ทดลองการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซลด้วย เมมเบรนพอลิเมอร์ ชนิด polyacrylonitrile ขนาด 10 kDa

4.1.4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP005

ผลการทดลองดังแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าความดันมีผลต่อค่าฟลักซ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเห็นได้ว่าที่ความดัน 15 บาร์ และ 20 บาร์ มีแนวโน้มโปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทคล้ายคลึงกัน คือ ช่วงแรกของโปรไฟล์จะมีการลดลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากระบบดำเนินการที่ความดันสูงทำให้อนุภาคถูกบีบรีดผ่านรูพรุนไปยังกระแสเพอร์มิเอทเนื่องจากคอนเซนเตรชันโพลาไลเซชันและฟาล์วลิง จากนั้นโปรไฟล์ฟลักซ์จะเข้าสู่ช่วงที่สองโดยกราฟจะวิ่งเข้าสู่สภาวะคงที่ แต่ที่ความดัน 10 บาร์ มีการเพิ่มขึ้นของเพอร์มิเอทฟลักซ์เล็กน้อยอย่างช้าๆ และยังไม่เข้าสู่สภาวะคงที่ภายในระยะเวลาการกรอง แรงขับเคลื่อนในกระบวนการกรองมีค่าต่ำจึงส่งผลทำให้สารเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปได้ช้าๆ โดยกลไกการซึมผ่านเมมเบรนไปสู่เพอร์มิเอท การซึมผ่านของเพอร์มิเอทเช่นนี้สามารถพบได้ในการกรองที่ความดันน้อยๆ แสดงให้เห็นว่าความดันมีผลต่อโปรไฟล์ของการกรอง



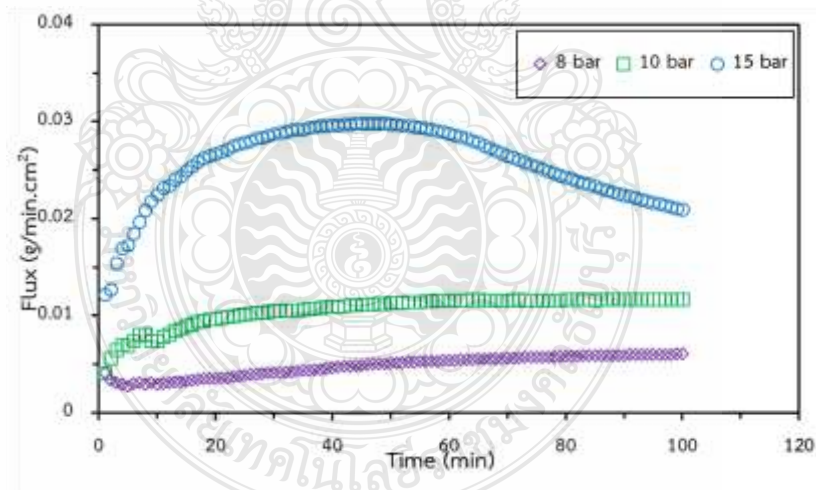
รูปที่ 4.4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP005 ที่ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์

จากการทดลองการกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ขนาด แสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดน้ำหนักรวมของเมมเบรนสูงขึ้น นอกจากนี้ความดันในการดำเนินการที่สูงมีผลต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ถึงแม้ว่าการดำเนินการที่ความดันสูงดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งใช้ความดันในการดำเนิน 10, 15 และ 20 บาร์ สูงกว่าเมมเบรน UP150 UH030 และ UP010 แต่ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ต่ำกว่า เนื่องจากเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดต่ำทำให้เกิดชั้นเค้กบริเวณผิวหน้าเมมเบรน ส่งผลให้สารผ่านไปยังกระแสเพอร์มิเอทได้อายากอย่างไรก็ตาม การ

เลือกใช้เมมเบรนที่มี MWCO ขนาดเล็กควบคู่กับความดันสูงไม่ทำให้ค่าฟลักซ์ดีขึ้นเสมอไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maria Carolina Se´rgi Gomes n และคณะ (2013) [14] ทำการแยกกลีเซอรอลจากไบโอดีเซลโดยใช้เซรามิกเมมเบรนขนาดไมโครฟิลเตรชันพบว่าการกรองที่ความดัน 1 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงกว่าความดัน 2 บาร์.

4.1.5 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน NP010

ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน NP010 แสดงได้ดังรูป 4.5 เมื่อเปรียบเทียบโปรไฟล์ความดัน 8 บาร์ กับ 10 บาร์ พบว่าฟลักซ์เพอร์มิเอต ณ ความดัน 8 บาร์ ฟลักซ์เพอร์มิเอตมีค่าต่ำกว่าที่ความดัน 10 บาร์ เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับความดัน 15 บาร์ แล้วพบว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต ณ 8 บาร์มีค่าต่ำกว่า 15 บาร์ อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับงานวิจัยของรังศิณีย์ ขุนหลัก (2557) [21] ทำการทดลองด้วยเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน ที่ความดัน 5-15 บาร์ และให้ค่าฟลักซ์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงกล่าวได้ว่าความดันมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารผ่านเยื่อกรองเมมเบรน จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าโปรไฟล์ฟลักซ์ ณ ความดัน 15 บาร์มีแนวโน้มช่วงแรกเพิ่มขึ้นและไม่เข้าสู่สภาวะคงที่ในระยะเวลาการกรอง

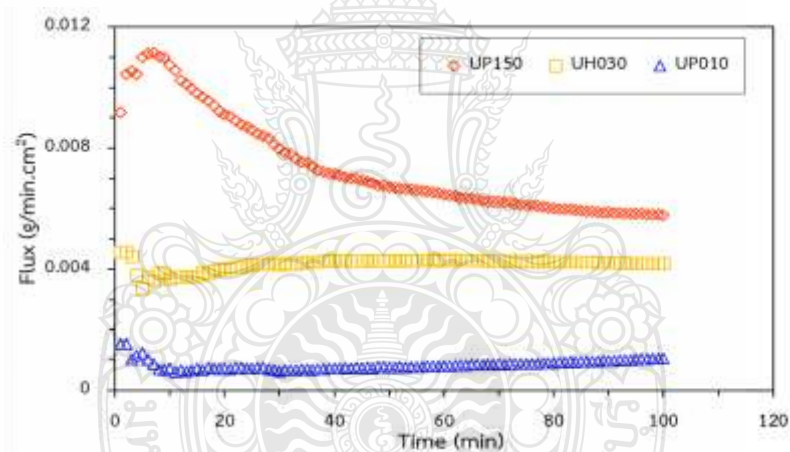


รูปที่ 4.5 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน NP010 ที่ความดัน 8, 10 และ 15 บาร์

จึงกล่าวได้ว่าความดันมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารผ่านเยื่อกรองเมมเบรน จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าโปรไฟล์ฟลักซ์ ณ ความดัน 15 บาร์มีแนวโน้มช่วงแรกเพิ่มขึ้นและไม่เข้าสู่สภาวะคงที่ในระยะเวลาการกรอง

4.1.6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองที่ความดัน 4 บาร์

รูปที่ 4.5 แสดงโปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองที่ความดัน 4 บาร์ ของเมมเบรนชนิด UP150, UH030 และ UP010 แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ของ UP150 มีค่าสูงที่สุดนั้นพบได้ทั่วไปในการกรองด้วยเมมเบรนที่มีขนาด MWCO ใหญ่ที่สุดทำให้สารสามารถผ่านเมมเบรนไปได้มากกว่า แต่หลังจากนั้นทำให้เกิดสภาวะที่มีการสะสมอนุภาคหรือโมเลกุลที่บริเวณผิวหน้ารูเยื่อกรอง มีผลทำให้สารที่ต้องการกรองเคลื่อนที่ผ่านเยื่อกรองเมมเบรนได้ช้าลงส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และพบว่าที่เมมเบรน UH030 ให้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ที่สูงในช่วงเวลาเริ่มต้นและลดลงทันทีทันใด แล้วค่อยๆเข้าสู่สภาวะคงที่ และยังพบว่าที่เมมเบรน UP010 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทลดลงในช่วงสั้นๆและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และไม่เข้าสู่สภาวะคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง เนื่องจากเป็นเมมเบรนที่มีขนาด MWCO เล็กทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคสารผ่านเมมเบรนได้น้อยกว่า

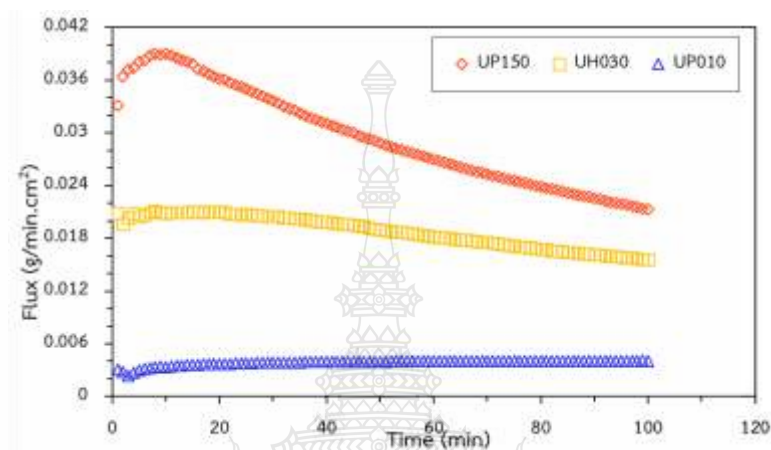


รูปที่ 4.6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 4 บาร์

4.1.7 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองที่ความดัน 6 บาร์

รูปที่ 4.7 แสดงโปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองที่ความดัน 6 บาร์ ของเมมเบรนชนิด UP150, UH030 และ UP010 แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ของ UP150 และ UH030 ที่ความดัน 6 บาร์ มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันคือค่าฟลักซ์มีการเพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วหลังจากนั้นมีการลดลงของฟลักซ์อย่างเห็นได้ชัด สาเหตุอาจเกิดจากการสะสมของอนุภาคภายในรูพรุนและผิวหน้ารูพรุนทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กลงจึงทำให้สารผ่านรูพรุนไปได้ยากในเวลาต่อมา แต่พบว่าที่ UP010 มีโปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทไม่สอดคล้องกัน คือ ในช่วงแรกฟลักซ์

ลดลงอย่างทันทีทันใด สาเหตุอาจเกิดจากการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนทำให้สารผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปได้ยากประกอบกับเมมเบรนชนิดนี้มีค่า MWCO เล็กกว่า UP150 และ UH030 ประมาณ 3-5 เท่า ทำให้เกิดความต้านทานการกรองในช่วงแรกสูงกว่าเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นในเวลาต่อมาเพียงเล็กน้อยแล้วเข้าสู่สภาวะคงที่

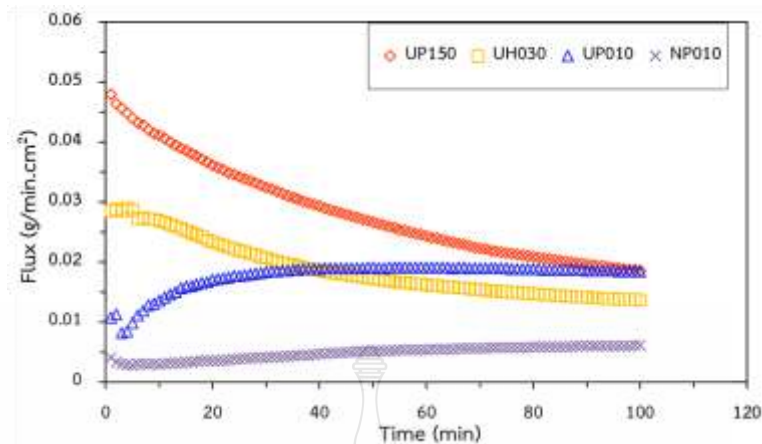


รูปที่ 4.7 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 6 บาร์

4.1.8 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองที่ความดัน 8 บาร์

รูปที่ 4.8 เป็นโปรไฟล์ของฟลักซ์เพอร์มิเอต เมื่อพิจารณาโปรไฟล์ฟลักซ์ของเมมเบรน UP150 และ UH030 มีแนวโน้มไปทางทิศทางเดียวกัน คือที่ค่าฟลักซ์เริ่มต้นมีค่าสูงสุดและลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากที่ขนาดรูพรุนเมมเบรนใหญ่ประกอบกับความดันที่สูงทำให้สารผ่านรูพรุนไปได้ง่ายในช่วงแรกและเกิดการอุดตันภายในรูพรุนมากขึ้นทำให้ต่อมาค่าฟลักซ์มีการลดลงอย่างต่อเนื่อง

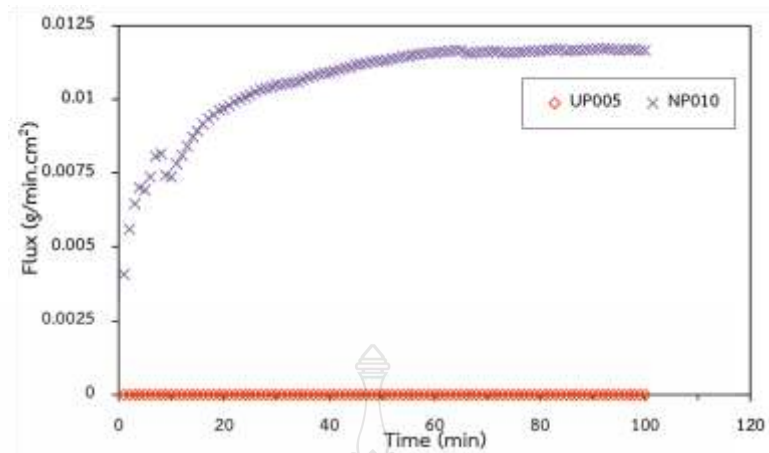
แต่เนื่องด้วยทำการกรองที่ความดันสูงจึงทำให้สารยังคงสามารถผ่านเมมเบรนไปได้ แต่ช้าลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ที่เมมเบรน UP010 เป็นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนขนาดเล็กประกอบกับดำเนินการที่ความดันสูงจึงทำให้อนุภาคเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของเมมเบรนได้ง่ายกว่า UP150 และ UH030 จึงทำให้สารผ่านรูพรุนเมมเบรนไปได้ช้าในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ของสารไม่สามารถผ่านรูพรุนไปได้จึงลดการอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรนหรือด้วยกลไกการซึมผ่านนั่นเอง จะเห็นได้ว่าขนาดของเยื่อเลือกผ่านส่งผลต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์ของการกรอง



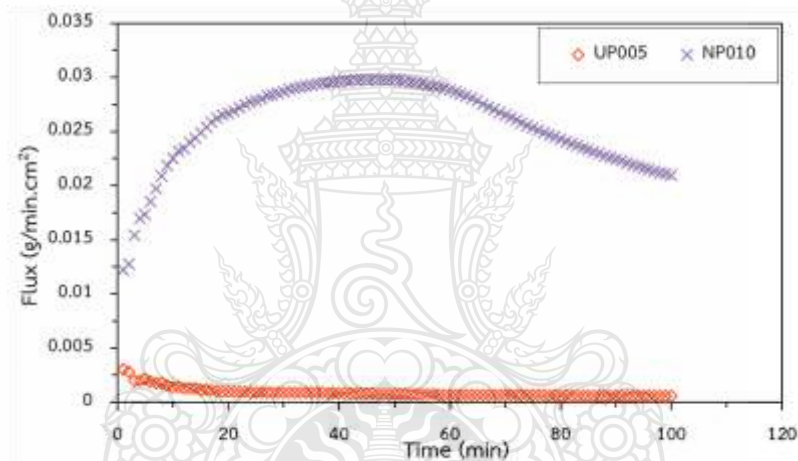
รูปที่ 4.8 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 8 บาร์

4.1.9 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองที่ความดัน 8 บาร์

เมื่อพิจารณา NP 010 มีแนวโน้มของฟลักซ์เพอร์มิเอทต่ำที่สุด เป็นผลมาจากความแน่นของเมมเบรนที่แตกต่างจากเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน จึงทำให้ไดนามิกส์การเคลื่อนที่ของสารผ่านเมมเบรนแตกต่างกันออกไป แต่มีแนวโน้มของโปรไฟล์ที่คล้ายคลึงกับเยื่อกรอง UP010 ที่เป็นเมมเบรนที่มีขนาดเล็กที่สุดของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน แต่เมื่อทำการทดลองด้วยความดันที่สูงขึ้น คือ 10 บาร์ และ 15 บาร์ เพื่อเปรียบเทียบเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชันหรือเป็นเมมเบรนชนิดที่คัดขนาดด้วยน้ำหนักมวลโมเลกุล (MWCO) กับเมมเบรนประเภทเนื้อแน่น ซึ่งพบว่าเมมเบรนประเภทเนื้อแน่น NP 010 ให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าและใช้เวลาในการกรองน้อยกว่า เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Maria Carolina Se' rgi Gomes n และคณะ (2010) [19] ทำการแยกไบโอดีเซลและกลีเซอรอลด้วยเซรามิกเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน พบว่าที่เมมเบรน ขนาด 0.4 μm ที่ความดัน 1 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์ใกล้เคียงกับเมมเบรนขนาด 0.8 μm ที่ความดัน 1 บาร์ดังรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่มีขนาดโมเลกุลตัดที่ใหญ่กว่า ไม่ได้ให้ค่าฟลักซ์การไหลที่ดีกว่า ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆอีกด้วย



รูปที่ 4.9 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 10 บาร์



รูปที่ 4.10 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดัน 15 บาร์

4.2 ความสามารถในการแยกกลีเซอรอล

ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ชนิด แสดงได้ดัง ตารางที่ 4.1 พบว่าเมมเบรนชนิด UH030 และ UP010 ให้ค่าความสามารถการกักกันที่ใกล้เคียงกัน และให้ค่าสูงอยู่ในช่วง 91-97% ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดเพื่อแยก กลีเซอรอล

ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเมมเบรนมีน้ำหนักโมเลกุลตัดน้อยลง แต่พบว่าเมมเบรน UP005 ให้ค่าความสามารถการกักกันกลีเซอรอลในช่วง 74-88% ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณฟลักซ์เพอร์มิเอตของเมมเบรน UP005 มีค่าน้อยจึงส่งผลต่อการวิเคราะห์ปริมาณ เนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลอิสระที่ตกจมลงไปที่ผิวหน้าเมมเบรน ประกอบกับความดันในการดำเนินงานที่สูงกว่า UP150, UH030 และ UP010 ประมาณ 3-5 เท่า ทำให้เกิดการผลกักกลีเซอรอลผ่าน

ไปยังกระแสเพอร์มิเอท จากผลของความสามารถในการแยกกลีเซอรอลจึงสนับสนุนว่าการเลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาดโมเลกุลตัดที่ต่ำร่วมกับการใช้ความดันสูงในการแยกสาร ไม่ได้ให้ผลในการแยกที่ดีเสมอไป กระบวนการแยกสารด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอย่างอื่นควบคู่ เช่น ความดัน องค์ประกอบของสารป้อน

ตารางที่ 4.1 ค่าการกักกันกลีเซอรอลของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

Membrane	Pressure (bar)	Glycerol Rejection (%)
UP150	4	66.45
	6	63.44
	8	48.31
UH030	4	93.85
	6	93.11
	8	91.14
UP010	4	95.11
	6	97.62
	8	91.98
UP005	10	88.37
	15	87.52
	20	73.69
NP010	8	***
	10	31.17
	15	68.41

เมื่อเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ต่อการนำใช้ระหว่างวิธีการแยกแบบดั้งเดิม (ล้างด้วยน้ำ) และการใช้เมมเบรนนั้น พบว่าการล้างด้วยน้ำมีค่าการลงทุนกับสารเคมี การก่อสร้างบ่อกักเก็บน้ำที่ต้องใช้พื้นที่ รวมทั้งใช้เวลาในการบำบัด และมีค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าไฟฟ้าและค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ ในราคาโดยประมาณ 4.20-5.30 บาทต่อลิตร [38] ดังนั้นเทคโนโลยีเมม

เบรนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะมีประสิทธิภาพในการแยกสารโดยการคัดขนาดและยังลดปริมาณน้ำเสีย จึงเป็นการลดเวลาในขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซล อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเมมเบรนยังมีค่าการลงทุนที่สูงกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ โดยพบว่าต้นทุนของเทคโนโลยีเมมเบรนจะขึ้นอยู่กับชุดเครื่องมือ เมมเบรน และการล้างเมมเบรน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตของโรงงาน [38] ซึ่งในที่นี้ใช้การประเมินต้นทุนของชุดเครื่องมือเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันชนิดไหลขวางระดับห้องปฏิบัติการที่มีชุดควบคุมและเก็บข้อมูลอัตโนมัติด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถป้อนอัตราการไหล ณ 500 ml/min ด้วยเมมเบรนชนิดพอลิเอทเธอร์ซัลโฟนแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber membrane) (Spectrum labs รุ่น KR2i TFF System ประเทศอเมริกา) พบว่าค่าการลงทุนชุดเครื่องกรองอยู่ที่ 400,000 บาท ค่าเมมเบรน 7,000-10,000 บาท/อัน บนฐานการทำงาน 300 ชั่วโมง นั้น พบว่าต้นทุนของการใช้เมมเบรนยังคงสูงกว่าการล้างด้วยน้ำอย่างมาก อย่างไรก็ตามการประเมินข้างต้นนี้เป็นการประเมินค่าอุปกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ ถ้าขยายกำลังการผลิตเป็นขนาดโรงงานอาจมีต้นทุนการดำเนินการที่ลดลง แต่จะมีต้นทุนด้านเครื่องมือสูงขึ้น ซึ่งการประเมินต้นทุนการทำงานที่แท้จริงควรทำในระดับเครื่องมือต้นแบบมากกว่าการประเมินในระดับห้องปฏิบัติการที่มีกำลังการผลิตต่ำกว่ามาก

4.3 กลไกการกรอง

กลไกการกรองของฟลักซ์ที่ผ่านมามีการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองต่างๆเป็นจำนวนมาก และที่น่าสนใจคือ แบบจำลองกระบวนการกรองภายใต้สภาวะความดันคงที่ของ Hermia โดยอธิบายได้ 4 แบบจำลอง ดังนี้

1. Complete Blocking Filtration Model (CBM)
2. Intermediate Blocking Filtration Model (IBM)
3. Standard Blocking Filtration Model (SBM)
4. Cake Filtration Model (CFM)

โดยการนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (R^2) และเปรียบเทียบค่า R^2 ของแต่ละแบบจำลอง ดังตารางที่ 4.2

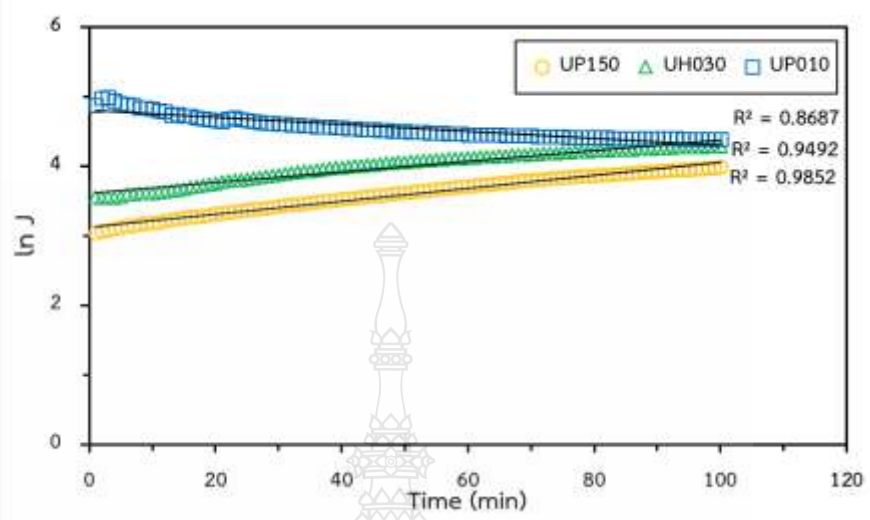
4.3.1 กลไกการกรองด้วยเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน UP150, UH030 และ UP010 ณ ความดัน 8, 6 และ 4 บาร์

ตารางที่ 4.2 ค่า R^2 ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 3 ชนิด ที่ความดัน 8, 6 และ 4 บาร์

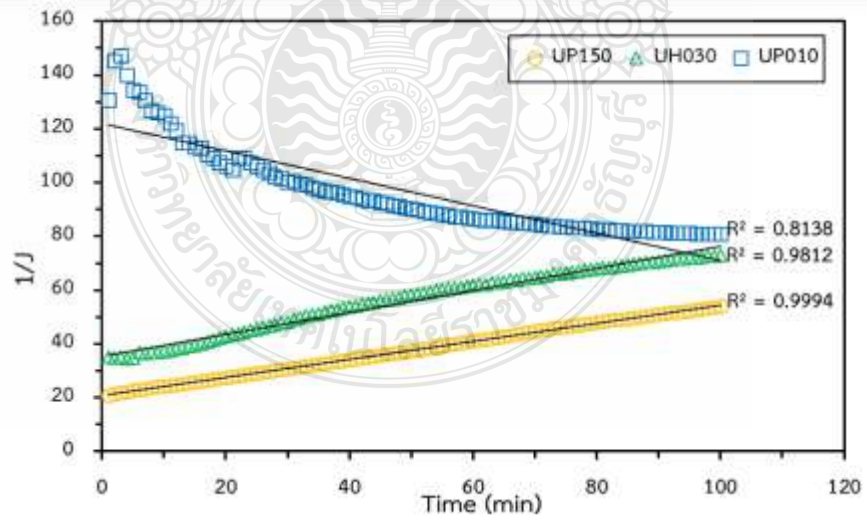
Membrane	Pressure (bar)	Regression Coefficient, R^2			
		CBM	IBM	SBM	CFM
UP150	8	0.985	0.999	0.996	0.988
UH030		0.949	0.981	0.967	0.996
UP010		0.869	0.814	0.843	0.750
UP150	6	0.980	0.981	0.982	0.970
UH030		0.993	0.990	0.993	0.981
UP010		0.856	0.8629	0.750	0.661
UP150	4	0.940	0.942	0.942	0.952
UH030		0.778	0.700	0.741	0.609
UP010		0.930	0.905	0.928	0.908

ตารางที่ 4.2 แสดงกลไกการกรองด้วยเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่ความดัน 8, 6 และ 4 บาร์ พบว่าเมมเบรน UP150 ให้ค่า R^2 สูงทุกแบบจำลองและมีแนวโน้มการเกิดฟัลด์ลิ่งด้วยกลไกชนิดการอุดตันของรูพรุน (pore blocking) ทั้ง 3 ความดัน ซึ่งอาจเป็นผลจากขนาดรูพรุนเมมเบรนมีขนาดใหญ่จึงทำให้สารสามารถผ่านเมมไปได้ และเกิดการอุดตันภายในรูพรุนในเวลาต่อมา พบว่าที่เมมเบรน UH030 ณ ความดัน 4 และ 6 บาร์ มีแนวโน้มการเกิดฟัลด์ลิ่งด้วยชนิดการอุดตันรูพรุน (pore blocking) ด้วยเช่นกัน แต่สำหรับความดัน 8 บาร์ ให้ผลการทดลองการเกิดฟัลด์ลิ่งสอดคล้องกับกลไกการกรองแบบเค้ก (Cake Filtration Model) สำหรับที่เมมเบรน UP010 ให้ค่า R^2 ต่ำกว่าเมมเบรนชนิดอื่นแต่พบว่ามีแนวโน้มเกิดฟัลด์ลิ่งด้วยการอุดตันของรูพรุน ทั้งนี้แสดงถึงการรวมตัวของอนุภาคที่ผิวหน้าของเมมเบรนส่งผลให้อนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านรูพรุนได้และลดปริมาตรรูพรุนในระหว่างการกรอง แสดงดังรูปที่ 4.11(ก.)-(ง.) ถึง 4.13 (ก.)-(ง.)

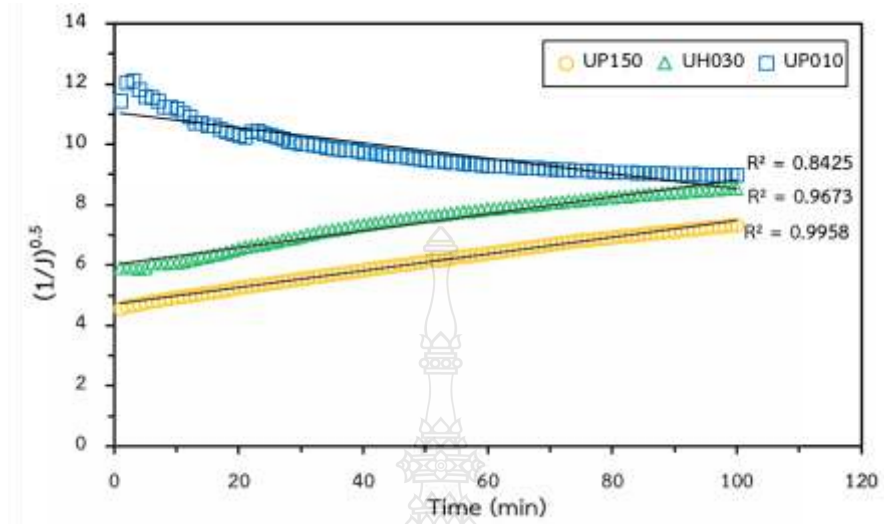
(ก.) CBM



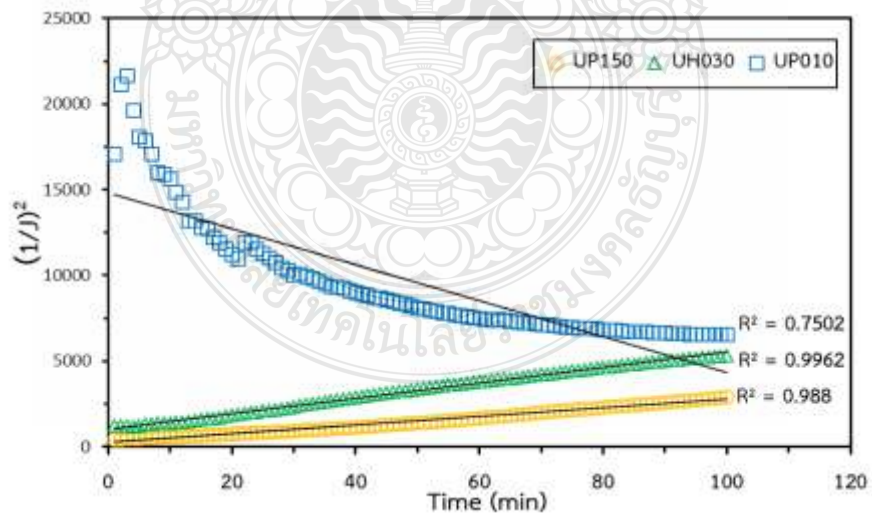
(ข.) IBM



(ค.) SBM

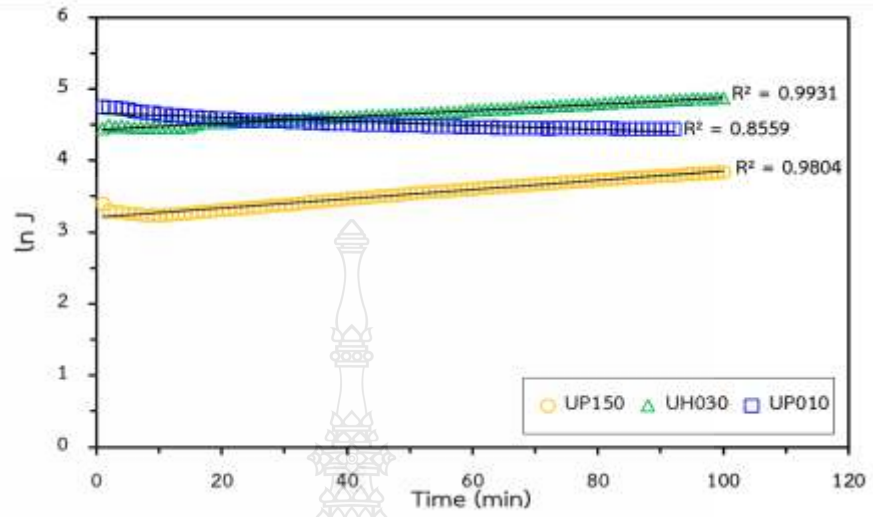


(ง.) CFM

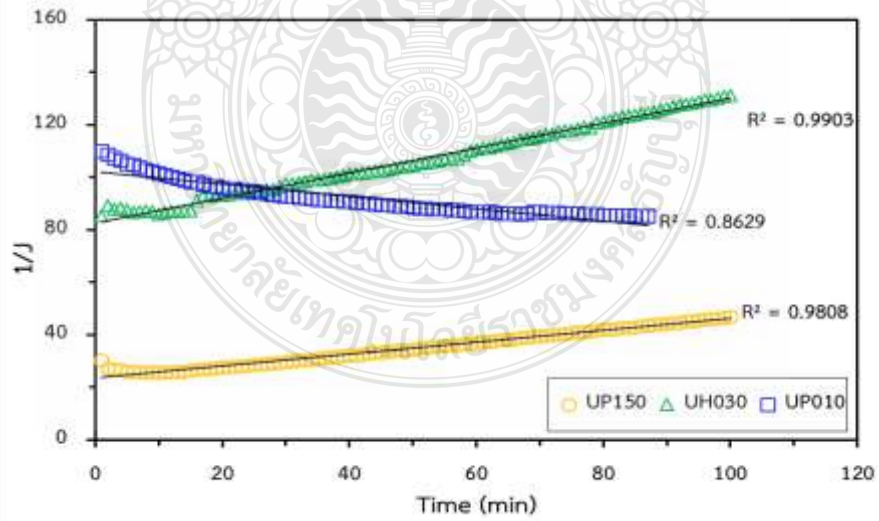


รูปที่ 4.11 ผลของขนาดน้ำหนักรีดเคลือบต่อกลไกการดูดซับที่ความดัน 8 บาร์: (ก.) CBM, (ข.) IBM, (ค.) SBM และ (ง.) CFM

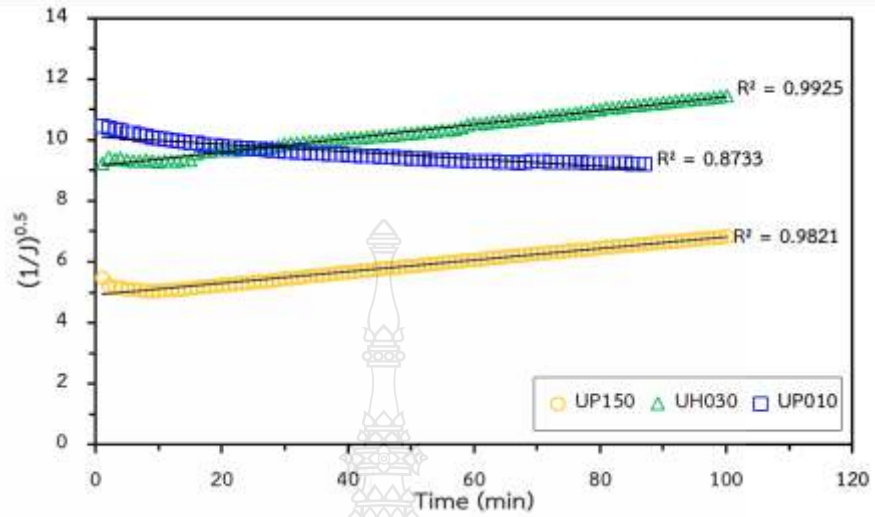
(ก.) CBM



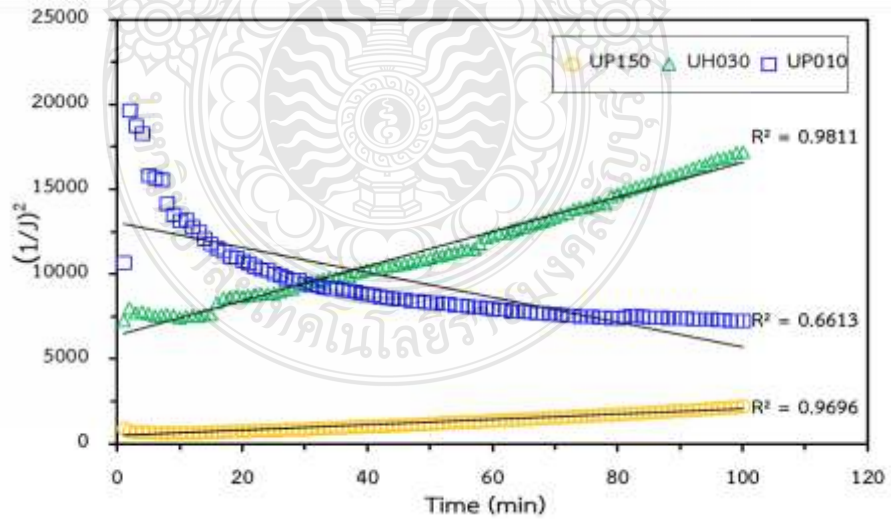
(ข.) IBM



(ค.) SBM

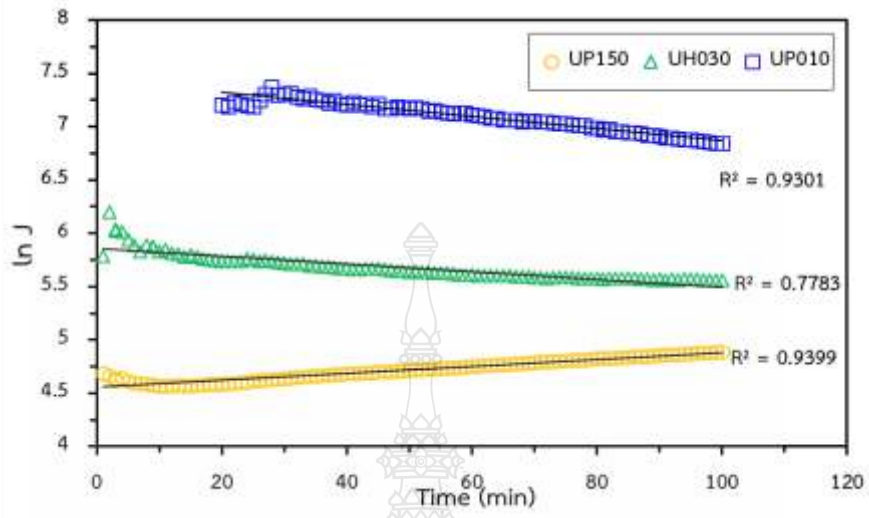


(ง.) CFM

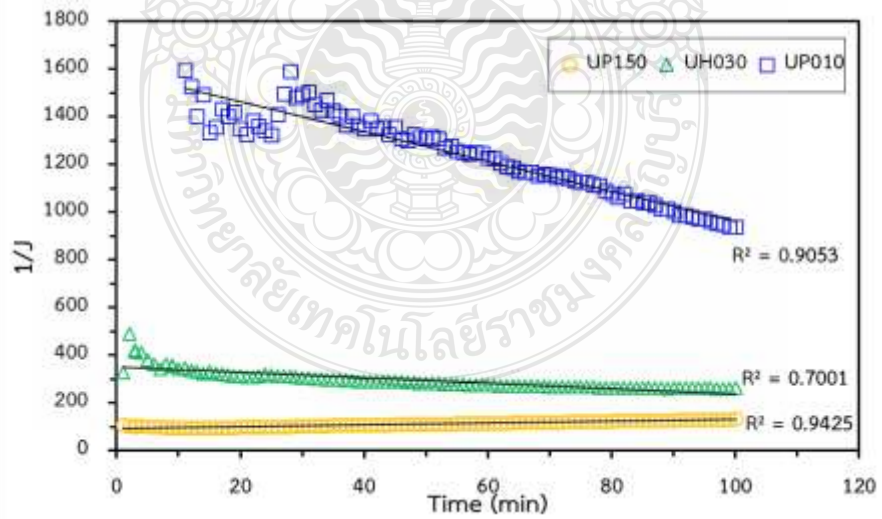


รูปที่ 4.12 ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกต์ตัดต่อกลไกการดูดตันที่ความดัน 6 บาร์: (ก.) CBM, (ข.) IBM, (ค.) SBM และ (ง.) CFM

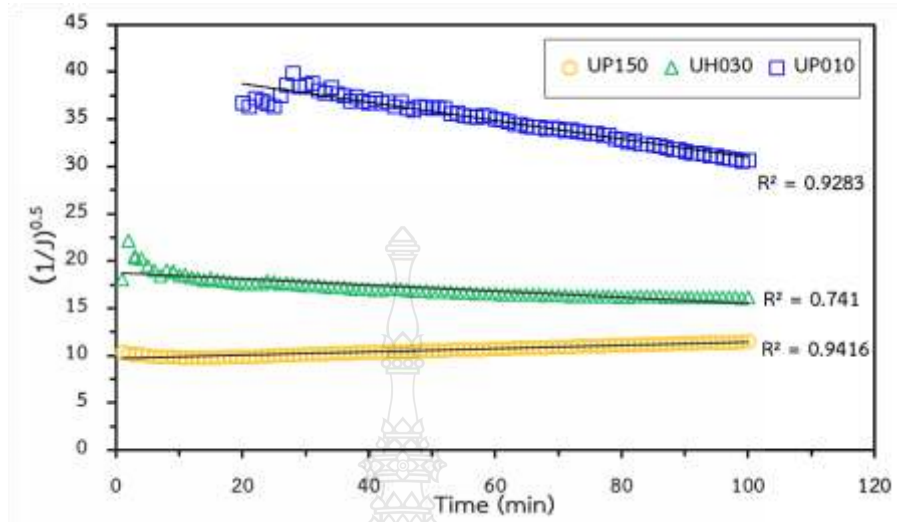
(ก.) CBM



(ข.) IBM

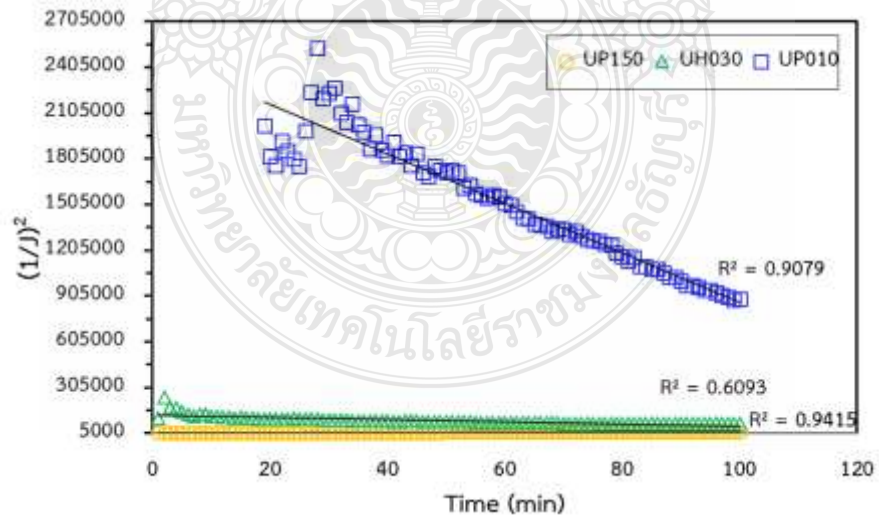


(ค.) SBM



(ง.) CFM

(จ.)



รูปที่ 4.13 ผลของขนาดน้ำหนักริมเลกซ์ตัดต่อกลไกการดูดตันที่ความดัน 4 บาร์: (ก.) CBM,

(ข.) IBM (ค.) SBM และ (ง.) CFM

4.3.2 กลไกการกรองด้วยเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ณ ความดัน 10 15 และ 20 บาร์

กลไกฟาล์วลิ่งโดยใช้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ของการกรอง ณ ความดัน 10 15 และ 20 บาร์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า R^2 ของเมมเบรน UP005 ทั้ง 3 ความดัน

Pressure (bar)	Time (min)	Regression Coefficient, R^2			
		CBM	IBM	SBM	CFM
10	1-100	0.992	0.754	0.754	0.781
15	1-100	0.751	0.890	0.829	0.959
20	1-50	0.597	0.677	0.638	0.748
	51-100	0.856	0.868	0.863	0.878

เนื่องจากเมมเบรน UP005 มีช่วงกราฟที่แตกต่างกับเมมเบรน UP150 UH030 และ UP010 อย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองพบว่าเมมเบรน UP005 ที่ความดัน 10 มีแนวโน้มเกิดกลไกฟาล์วลิ่งด้วยชนิดการอุดตันรูพรุน (pore blocking) ที่ความดัน 15 และ 20 บาร์ ค่า R^2 มีแนวโน้มการเกิดฟาล์วลิ่งสอดคล้องกับกลไกการกรองแบบเค้ก (Cake Filtration Model) และมีแนวโน้มเกิดกลไกฟาล์วลิ่งด้วยชนิดการอุดตันรูพรุน (pore blocking) ร่วมขึ้นด้วย เนื่องจากเป็นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มีขนาดโมเลกุลตัดเล็กที่สุด จึงมีโอกาสเกิดการสะสมของอนุภาคภายในรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรน และเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มายังเมมเบรนจึงเกิดการสะสมของอนุภาคเดิมขึ้นเป็นชั้นเค้ก

4.3.5 กลไกการกรองด้วยเยื่อกรองเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน NP010

กลไกฟาล์วลิ่งโดยใช้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ของการกรอง ณ ความดัน 8 10 และ 15 บาร์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า R^2 ของเมมเบรน NP 010 ทั้ง 3 ความดัน

Pressure (bar)	Time (min)	Regression Coefficient, R^2			
		CBM	IBM	SBM	CFM
8	1-50	0.890	0.594	0.881	0.842
	51-100	0.968	0.961	0.964	0.953
10	1-30	0.7857	0.5767	0.7193	0.4967
	31-60	0.9832	0.9488	0.9816	0.9764
15	1-30	0.583	0.509	0.525	0.324
	31-60	0.786	0.703	0.746	0.614

ผลการศึกษากลไกการกรองในระดับนาโนฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน NP010 ณ ความดัน 8 บาร์ ที่ 50 นาทีแรก พบว่าค่า R^2 ของความดันทั้ง 3 ค่า มีค่าไม่สูงมากนัก และมีแนวโน้มเกิดกลไกฟาล์วล้างด้วยชนิดการอุดตันรูพรุน (pore blocking) และเมื่อพิจารณาที่เวลา 50-100 นาที พบว่าเมมเบรน NP010 ทั้ง 3 ความดันมีโอกาสเกิดการอุดตันแบบชั้นเคลือบร่วมด้วย เนื่องจากเมมเบรนเป็นชนิดเนื้อแน่นที่แตกต่างจาก UP150, UH030 และ UP010 จึงมีโอกาสเกิดการอุดตันภายในรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรนสอดคล้องกับ UP005 เช่นเดียวกับงานวิจัยของจิรนนท์ ขันหล่อ(2558) ที่ศึกษาการแยกฟอสโฟไลปิดในน้ำมันสบู่ดำโดยใช้เมมเบรนชนิดเนื้อแน่น NP010 พบว่าเกิดกลไกฟาล์วล้างทั้ง 2 แบบ ที่เวลาการกรอง 30 นาทีแรก ของความดัน 10 และ 15 บาร์ ของกระบวนการกรองมาสามารถระบุกลไกได้เนื่องจาก R^2 มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นถึงว่ากลไกการอุดตันแบบ Hermia ไม่เหมาะสมกับช่วงเวลาการกรองดังกล่าว จึงไม่สามารถอธิบายได้ พบว่าที่เวลาการกรอง 30 นาทีสุดท้าย กลไกการกรอง Hermia แสดงกลไกการอุดตันชนิดการอุดตันรูพรุน (pore blocking)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลในการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน ด้วยเมมเบรน UP150, UH030, UP010 และ UP005 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอท

5.1.1.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองบนฐานความดัน

1.) ฟลักซ์การกรองของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันบนฐานความดัน โดยสภาวะที่เหมาะสมของ UP150 และ UP010 พบว่าความดันที่เหมาะสม 8 บาร์ เมมเบรน UH 030 สภาวะที่เหมาะสม 6 บาร์ และเมมเบรน UP005 โดยสภาวะที่เหมาะสม 20 บาร์

2.) ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองด้วยเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันบนฐานความดัน โดยสภาวะที่เหมาะสมของ NP010 คือ 15 บาร์

5.1.1.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรองบนฐานขนาดน้ำหนักรีด

1.) ฟลักซ์การกรองของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันบนฐานขนาดของรูพรุน เมมเบรนโดยการทดลองที่สภาวะความดัน 4, 6 และ 8 บาร์ พบว่าขนาดของเมมเบรนที่เหมาะสมคือ UP150

5.1.2 ความสามารถการกักกันกลีเซอรอล

5.1.2.1 ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลบนฐานความดัน

โดยพบว่าความดันทั้ง 3 ค่า เป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการแยกกลีเซอรอลด้วย เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน โดยเมมเบรน UP150 และ UH030 ที่ความดัน 4 บาร์ ให้ค่าร้อยละการกักกันสูงสุดและที่ความดัน 6 บาร์เหมาะสมกับเมมเบรน UP010 สำหรับเมมเบรน UP005 ความดัน 10 บาร์ ให้ค่าร้อยละการกักกันสูงสุด สำหรับเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชันที่ความดันสูงสุด 15 บาร์ ให้ค่าร้อยละการกักกันสูงสุด

5.1.2.2 ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลบนฐานของขนาดน้ำหนักรีด

โดยพบว่าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ชนิด สามารถกักกันกลีเซอรอลได้ โดยเชื่อมต่อกรองที่ค่าเปอร์เซ็นต์การกักกันกลีเซอรอลสูงสุดคือ เมมเบรน UH030 และ UP010 ที่ให้ค่าร้อยละการกักกัน 97.62 และ 93.85

5.1.3 กลไกฟาล์วของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

โดยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันเกิดกลไกการอุดตันของรูพรุน (pore blocking) แบบ CBM และกลไกการกรองแบบเค้ก (Cake Filtration Model) การแก้ไขการอุดตันแบบ CBMทำได้โดยการติดตั้งตัวกวนให้กับระบบ หรืออาจเปลี่ยนระบบเป็นการกรองแบบไหลขวางถ้าเกิดกลไกการกรองแบบเค้ก สำหรับเมมเบรนเนื้อแน่น UP005 และ NP010 พบว่าเกิดกลไกการอุดตันของรูพรุนและมีแนวโน้มเกิดกลไกการกรองแบบเค้กร่วมด้วย

5.2 อภิปรายผล

จากการทดลองสามารถเลือกใช้เมมเบรนชนิด UH030 ที่ความดัน 4 บาร์ เนื่องจากให้ค่าฟลักซ์การไหลที่สูงกว่าเมมเบรน UP010 แต่ให้ค่าการกักกันกลีเซอรอลถึงร้อยละ 93.85 เมื่อเทียบกับเมมเบรน UP010 ที่ความดัน 4 บาร์แล้ว ให้ค่าต่างกันแค่ร้อยละ 1.26 ถือว่าเมมเบรน UH030 ให้ค่าการกักกันที่ดี

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การนำเทคโนโลยีเมมเบรนใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล ควรมีการศึกษาสถานะการกรองที่เหมาะสม

5.2.2 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่อการกรอง ควรเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมกับเมมเบรนและสถานะการกรอง

5.2.3 ศึกษาความดันที่หลากหลายเพื่อหาสถานะที่ให้ค่าร้อยละการกักกันสูง

บรรณานุกรม

- [1] อ่ำพล เสนาณรงค์. (2544). พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวกับการพัฒนาน้ำมันดีเซลจากน้ำมันปาล์ม. วารสารนันทรี ปีที่ 48, ฉบับ ก.ค.-ก.ย.: 2-6.
- [2] Marcelo Medre Nobrega, Juliana Bonametti Olivato, Ana Paula Bilck, Maria Victorria Eiras Grossmann, Fábio Yamashita. (2012). **Glycerol with different purity grades derived from biodiesel: Effect on the mechanical and viscoelastic properties of biodegradable strands and films.** Materials Science and Engineering C 32 (2012), 2220-2222.
- [3] Jaruwat, P, Kongjao, S., Hunsom, M. (2010). **Management of biodiesel wastewater by the combined processes of chemical recovery and electrochemical treatment.** Energy Convers Manag. 51, 531-537.
- [4] Kumjadpai, S, Ngamlerdpokin, K, Chatanon, P, Lertsathitphongs, P, Hunsom, M, (2011). **Management of fatty acid methyl ester (FAME) wastewater by a combined two stage chemical recovery and coagulation process.** Can. J. Chem. Eng. 89, 369-376.
- [5] Berrios, M, Skelton, R.L. (2008). **Comparison of purification methods of biodiesel.** Chem. Eng. J 144, 459-465.
- [6] Canakci, M, Gerpen, J.V. (2001). **Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids.** Trans. ASAE 44 (6), 1429-1436.
- [7] Atadashi I.M., Aroua MK, Aziz AA. (2011). **Biodiesel separation and purification: A review.** Renew Energy 2011, 36: 437-43.
- [8] รังนา จิระรัตนานนท์. (2541). **กระบวนการแยกเยื่อแผ่นสังเคราะห์.** วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [9] โกสินทร์ สุวัชรังกุล. (2550). **การประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันแบบความดันต่ำสำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารปราบศัตรูพืช.** วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Suehara K, Kawamoto Y, Fujii E, Kohda J, Nakano Y, Yano T. (2005) **Biological treatment of wastewater discharged from biodiesel fuel production plan with alkali-catalyzed transesterification.** J Biosci Bioeng 100:437–42.
- [11] Magno Jose Alves, Suellen Mendonca Nascimento, Iara Gomes Pereira, Maria Ines Martins, ViceLma Luiz Cardoso, Miria Reis. (2013). **Biodiesel purification using micro and ultrafiltration membranes.** Renewable Energy 58, 15-20
- [12] Yong Wang, Xingguo Wang, Yuanfa Liu, Shiyi Ou, Yanlai Tan, Shuze Tang. (2009). **Refining of biodiesel by ceramic membrane separation.** Fuel Processing Technology 90, 422-427.
- [13] Juan Jose Torres, Natalia Evelin Rodriguez, Javier Toledo Arana, Nelio Ariel Ochoa, Jose Marchese, Cecilia Pagliero. (2017). **Ultrafiltration polymeric membranes for the Purification of biodiesel from ethanol.** Journal of Cleaner Production 141, 641-647.
- [14] Maria Carolina Se' rgi Gomes n, Pedro Augusto Arroyo, Nehemias Curvelo Pereira. (2013). **Influence of acidified water addition on the biodiesel and glycerol Separation through membrane technology.** Journal of Membrane Science 431, 28–36.
- [15] Maria Carolina Sérgio Gomes a,n , Pedro Augusto Arroyo b , Nehemias Curvelo Pereira b. (2015). **Influence of oil quality on biodiesel purification by Ultrafiltration.** Journal of Membrane Science 496, 242–249.
- [16] Jehad Saleh, Andr Y. Tremblay, Marc A. Dub. (2010). **Glycerol removal from Biodiesel using membrane separation technology.** Fuel 89, 2260–2266.
- [17] I.M. Atadashi, M.K. Aroua , A.R. Abdul Aziz , N.M.N. Sulaiman. (2014). **Removal of Residual palm oil-based biodiesel catalyst using membrane ultra-filtration technique: An optimization study.** Alexandria Engineering Journal 53, 705–715.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] Maria Carolina Se´rgi Gomes n, Pedro Augusto Arroyo, Nehemias Curvelo Pereira. (2011). **Biodiesel production from degummed soybean oil and glycerol removal using ceramic membrane.** Journal of Membrane Science 378, 453-461.
- [19] Maria Carolina Se´rgi Gomes n, Pedro Augusto Arroyo, Nehemias Curvelo Pereira. (2010). **Separation of biodiesel and glycerol using ceramic membranes.** Journal of Membrane Science 352, 271-276.
- [20] Cecilia Pagliero, Miguel Mattea, Nelio Ochoa, Jose Marchese. (2007). **Fouling of polymeric membrane during degumming of crude sunflower and soybean oil.** Food Engineering 78, 194-197.
- [21] รังสินีย์ ขุนหลักด. (2557). การแยกกัมในน้ำมันรำข้าวดิบด้วยเทคโนโลยีเยื่อแผ่นระดับนาโนฟิลเตรชัน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 15 และระดับนานาชาติครั้งที่ 7 ประจำปี 2557.
- [22] จีรนนท์ ขันหล่อ. (2558). การแยกฟอสโฟไลปิดในน้ำมันสบูดำและรำข้าวด้วยกระบวนการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันเทคโนโลยีเมมเบรน. การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 10 ปีการศึกษา 2558.
- [23] โครงการเคยู-ไบโอดีเซล [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th> (17 กรกฎาคม 2560)
- [24] สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. (2559). การกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันเพื่อแยกกลีเซอรอลสำหรับไบโอดีเซล.
- [25] ข้อดีข้อเสียของไบโอ [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://guru.sanook.com/2576/> (17 กรกฎาคม 2560)

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [26] วรรัตน์ เลิศสนเมธากุล. (2553). **กระบวนการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนเนตจากกลีเซอรอลดิบที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล**. วิทยานิพนธ์ (วศ.เคมี) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [27] สุจิตรา พรหมเชื้อ วิชาญชัย ออมทรัพย์สิน เพ็ญศิริ จำรัสฉาย และวัชรวิ ศรีรักษา. (2551). **การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกลีเซอรอลบริสุทธิ์**. สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตร เขตที่ 7. ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี.
- [28] ชันทอง สุนทรภา. (2547). **เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน**. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [29] Indok Nurul Hasyimah Mohd Amin, Abdul Wahab Mohammad, Mastura Markom, Leo Choe Peng, Nidal Hilal. (2010). **Analysis of deposition mechanism during ultrafiltration of glycerin-rich solutions**. Desalination 261, 313-320.
- [30] M. Cinta Vincent Vela, Silvia Alvarez Blanco, Jaime Lora Garcia, Enrique Bergantiños Rodríguez. (2008). **Analysis of membrane pore blocking models applied to the Ultrafiltration of PEG**. Separation and Purification Technology 62, 489-498.
- [31] นันทนา กันยานุวัฒน์ และ นุชนาท นาคา. (2555). **แนวทางการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบทางเคมี**. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐานกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- [32] Mehrdad Hesampour, Agnieszka Krzyzaniak, Marianne Nystrom. (2008). **The influence of different factors on the stability and ultrafiltration of emulsified oil in water**. Journal of Membrane Science 325, 199-208.
- [33] **เยื่อแผ่นสังเคราะห์ (Synthetic Membranes) [ออนไลน์]**. เข้าถึงได้จาก <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware>
(13 ตุลาคม 2560)

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [34] Marcelo Medre Nobrega, Juliana Bonametti Olivato, Ana Paula Bilck, Maria Victoria Eiras Grossmann, Fabio Yamashita. (2012). **Glycerol with different purity grades derived from biodiesel: Effect on the mechanical and viscoelastic properties of biodegradable strands and films.** Materials Science and Engineering C 32, 2220-2222.
- [35] Aminul Islam, Hamid Reza Fard Masoumi, Yun Hin Taufiq-Yap. (2016). **Glycerolysis of palm fatty acid distillate for biodiesel feedstock under different reactor conditions.** Fuel 174 (2016) 133–139.
- [36] B. Chakrabarty, A.K. Ghoshal, M.K. Purkait. (2008). **Ultrafiltration of table oil-in-water emulsion by polysulfone membrane.** J. Membr. Sci 325 (2008) 427-437.
- [37] X.S. Yi, S.L. Yu, W.X. Shi, N. Sun, L.M. Jin, S. Wang, B. Zhang, C. Ma, L.P. Sun, **The influence of important factor on ultrafiltration of oil/water emulsion using PVDF membrane modified by nano-sized TiO₂/Al₂O₃.** Desalination 281 (2011) 179-184.
- [38] Waste Water Management for Food Industries 7 June 2017-Bitec [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware> (13 ตุลาคม 2560)



ภาคผนวก



วิเคราะห์ฟลักซ์

เริ่มจับเวลาเมื่อเพอร์มิเอทหยุดแรกหยุดลงสู่ภาชนะรองรับ จากนั้นเก็บน้ำหนักเพอร์มิเอท
ทุกๆ 1 นาที คำนวณค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทเฉลี่ย ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ฟลักซ์เฉลี่ย} = \frac{\text{น้ำหนักเพอร์มิเอท}}{\text{เวลา} \times \text{พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน}}$$

โดยที่ น้ำหนักเพอร์มิเอท (g) เวลาการกรอง (min)

พื้นที่หน้าตัดเมมเบรนมีค่าคงที่ทุกการทดลอง เท่ากับ 19.625 cm^2

ตัวอย่างการคำนวณ

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	พื้นที่เมมเบรน (cm^2)
1	0.25	19.625
2	0.53	19.625

$$\begin{aligned} \text{ฟลักซ์เพอร์มิเอท} &= \frac{0.25}{1 \times 19.625} \\ &= 0.012739 \text{ g/min.cm}^2 \end{aligned}$$

ตารางที่ ก1 ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 8 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.94	0.047898
2	1.82	0.046369
3	2.69	0.04569
4	3.52	0.044841
5	4.31	0.043924
6	5.08	0.043142
7	5.89	0.042875
8	6.61	0.042102
9	7.31	0.041387
10	8.07	0.041121
11	8.76	0.040579
12	9.43	0.040042
13	10.06	0.039432
14	10.7	0.038944
15	11.34	0.038522
16	11.94	0.038025
17	12.56	0.037647
18	13.11	0.037113
19	13.66	0.036634
20	14.18	0.036127

ตารางที่ ก1 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	14.72	0.035717
22	15.26	0.035345
23	15.76	0.034916
24	16.28	0.034565
25	16.77	0.034181
26	17.25	0.033807
27	17.76	0.033517
28	18.22	0.033157
29	18.69	0.03284
30	19.11	0.032459
31	19.53	0.032102
32	19.92	0.03172
33	20.33	0.031392
34	20.73	0.031068
35	21.13	0.030763
36	21.53	0.030474
37	21.91	0.030174
38	22.3	0.029903
39	22.65	0.029593
40	23.01	0.029312

ตารางที่ ก1 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	28.85	0.024099
62	29.08	0.0239
63	29.27	0.023674
64	29.48	0.023471
65	29.69	0.023275
66	29.93	0.023108
67	30.12	0.022907
68	30.26	0.022675
69	30.4	0.02245
70	30.6	0.022275
71	30.78	0.02209
72	30.99	0.021932
73	31.17	0.021757
74	31.38	0.021608
75	31.58	0.021456
76	31.81	0.021328
77	32.04	0.021203
78	32.24	0.021062
79	32.47	0.020943
80	32.69	0.020822

ตารางที่ ก1 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	32.87	0.020678
82	33.09	0.020562
83	33.27	0.020425
84	33.47	0.020303
85	33.66	0.020178
86	33.84	0.02005
87	34.06	0.019949
88	34.24	0.019826
89	34.43	0.019712
90	34.62	0.019601
91	34.8	0.019486
92	34.98	0.019374
93	35.17	0.01927
94	35.36	0.019168
95	35.55	0.019068
96	35.66	0.018928
97	35.85	0.018832
98	36.04	0.018739
99	36.18	0.018622
100	36.36	0.018527

ตารางที่ ก2 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 6 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.65	0.033121
2	1.43	0.036433
3	2.19	0.037197
4	2.94	0.037452
5	3.74	0.038115
6	4.51	0.038301
7	5.33	0.038799
8	6.12	0.038981
9	6.88	0.038953
10	7.66	0.039032
11	8.38	0.038819
12	9.09	0.038599
13	9.78	0.038334
14	10.47	0.038107
15	11.15	0.037877
16	11.7	0.037261
17	12.36	0.037048
18	12.98	0.036745
19	13.59	0.036447
20	14.21	0.036204

ตารางที่ ก2 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	14.86	0.036057
22	15.42	0.035715
23	16.01	0.035469
24	16.61	0.035265
25	17.17	0.034996
26	17.73	0.034748
27	18.25	0.034442
28	18.79	0.034195
29	19.3	0.033912
30	19.81	0.033648
31	20.33	0.033417
32	20.76	0.033057
33	21.26	0.032828
34	21.76	0.032611
35	22.16	0.032262
36	22.59	0.031975
37	23.06	0.031758
38	23.5	0.031512
39	23.93	0.031266
40	24.38	0.031057

ตารางที่ ก2 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	24.82	0.030847
42	25.23	0.03061
43	25.67	0.030419
44	26.07	0.030191
45	26.5	0.030007
46	26.81	0.029698
47	27.23	0.029522
48	27.62	0.029321
49	28.01	0.029128
50	28.36	0.028902
51	28.64	0.028615
52	29.01	0.028427
53	29.37	0.028237
54	29.74	0.028063
55	30.09	0.027877
56	30.45	0.027707
57	30.8	0.027534
58	31.14	0.027358
59	31.49	0.027196
60	31.8	0.027006

ตารางที่ ก2 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	32.09	0.026806
62	32.42	0.026645
63	32.74	0.026481
64	33.03	0.026298
65	33.35	0.026144
66	33.63	0.025964
67	33.92	0.025797
68	34.19	0.02562
69	34.48	0.025463
70	34.78	0.025318
71	35.08	0.025176
72	35.36	0.025025
73	35.64	0.024877
74	35.91	0.024727
75	36.18	0.024581
76	36.44	0.024432
77	36.74	0.024313
78	37	0.024171
79	37.23	0.024014
80	37.45	0.023854

ตารางที่ ก2 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	37.71	0.023723
82	37.99	0.023607
83	38.26	0.023489
84	38.51	0.023361
85	38.66	0.023176
86	38.91	0.023054
87	39.17	0.022942
88	39.39	0.022808
89	39.63	0.022689
90	39.86	0.022568
91	40.09	0.022448
92	40.31	0.022326
93	40.42	0.022146
94	40.64	0.022203
95	40.84	0.021905
96	41.08	0.021805
97	41.27	0.02168
98	41.48	0.021568
99	41.63	0.021427
100	41.85	0.021325

ตารางที่ ก3 ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 4 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.18	0.00917197
2	0.37	0.00942675
3	0.58	0.00985138
4	0.76	0.00968153
5	0.94	0.00957962
6	1.17	0.00993631
7	1.39	0.01011829
8	1.59	0.01012739
9	1.8	0.01019108
10	2.01	0.01024204
11	2.21	0.01023741
12	2.44	0.01036093
13	2.64	0.01034787
14	2.85	0.01037307
15	3.03	0.01029299
16	3.25	0.01035032
17	3.45	0.01034095
18	3.63	0.01027601
19	3.82	0.01024472
20	4	0.01019108

ตารางที่ ก3 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	4.19	0.01016682
22	4.38	0.01014476
23	4.56	0.01010246
24	4.74	0.01006369
25	4.92	0.01002803
26	5.09	0.0099755
27	5.24	0.00988912
28	5.41	0.00984531
29	5.57	0.00978695
30	5.76	0.00978344
31	5.9	0.00969797
32	6.06	0.00964968
33	6.22	0.00960432
34	6.36	0.00953166
35	6.54	0.00952138
36	6.67	0.00944091
37	6.83	0.00940609
38	6.98	0.0093597
39	7.17	0.00936796
40	7.32	0.00932484

ตารางที่ ก3 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	7.47	0.00928383
42	7.62	0.00924477
43	7.76	0.00919567
44	7.92	0.00917197
45	8.08	0.00914933
46	8.23	0.00911659
47	8.38	0.00908524
48	8.53	0.0090552
49	8.69	0.00903679
50	8.83	0.00899873
51	8.99	0.00898214
52	9.12	0.0089368
53	9.26	0.00890278
54	9.41	0.00887945
55	9.54	0.00883845
56	9.69	0.00881711
57	9.82	0.00877863
58	9.96	0.00875027
59	10.12	0.00874015
60	10.25	0.00870488

ตารางที่ ก3 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	10.37	0.00866242
62	10.49	0.00862133
63	10.61	0.00858154
64	10.74	0.00855096
65	10.87	0.00852131
66	11.01	0.00850029
67	11.15	0.00847989
68	11.27	0.00844511
69	11.4	0.00841872
70	11.53	0.00839308
71	11.65	0.00836099
72	11.77	0.00832979
73	11.87	0.00828549
74	12.01	0.00826993
75	12.11	0.0082276
76	12.22	0.00819309
77	12.35	0.00817272
78	12.48	0.00815287
79	12.6	0.00812707
80	12.7	0.00808917

ตารางที่ ก3 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP150 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	12.8	0.00805221
82	12.9	0.00801616
83	13.02	0.00799325
84	13.15	0.00797695
85	13.28	0.00796103
86	13.38	0.00792771
87	13.5	0.00790687
88	13.6	0.00787493
89	13.7	0.0078437
90	13.82	0.00782449
91	13.92	0.0077945
92	14.04	0.00777624
93	14.15	0.00775289
94	14.24	0.0077192
95	14.36	0.00770231
96	14.47	0.00768047
97	14.55	0.00764331
98	14.66	0.00762251
99	14.78	0.00760728
100	14.88	0.00758217

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 8 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.53	0.027006
2	0.97	0.024713
3	1.46	0.024798
4	1.98	0.025223
5	2.51	0.02558
6	2.89	0.024544
7	3.37	0.024531
8	3.89	0.024777
9	4.34	0.024572
10	4.81	0.02451
11	5.27	0.024412
12	5.72	0.024289
13	6.18	0.024223
14	6.62	0.024095
15	7.08	0.024051
16	7.49	0.023854
17	7.91	0.023709
18	8.32	0.023553
19	8.73	0.023413
20	9.14	0.023287

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	9.53	0.023124
22	9.9	0.02293
23	10.29	0.022797
24	10.65	0.022611
25	10.96	0.022339
26	11.32	0.022185
27	11.67	0.022024
28	11.99	0.02182
29	12.33	0.021665
30	12.65	0.021486
31	12.94	0.02127
32	13.26	0.021115
33	13.58	0.020969
34	13.83	0.020727
35	14.12	0.020557
36	14.44	0.020439
37	14.71	0.020258
38	15	0.020114
39	15.28	0.019964
40	15.57	0.019834

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	15.85	0.019699
42	16.13	0.019569
43	16.42	0.019458
44	16.68	0.019317
45	16.96	0.019205
46	17.22	0.019075
47	17.48	0.018951
48	17.72	0.018811
49	17.99	0.018708
50	18.25	0.018599
51	18.52	0.018504
52	18.75	0.018373
53	18.95	0.018219
54	19.15	0.01807
55	19.41	0.017983
56	19.64	0.017871
57	19.89	0.017781
58	20.15	0.017703
59	20.4	0.017618
60	20.65	0.017537

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	20.87	0.017433
62	21.12	0.017358
63	21.33	0.017252
64	21.57	0.017174
65	21.82	0.017105
66	22.03	0.017008
67	22.28	0.016945
68	22.52	0.016875
69	22.75	0.016801
70	22.96	0.016713
71	23.13	0.0166
72	23.36	0.016532
73	23.57	0.016452
74	23.8	0.016388
75	24	0.016306
76	24.25	0.016259
77	24.45	0.01618
78	24.65	0.016103
79	24.85	0.016028
80	25.05	0.015955

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	25.15	0.015821
82	25.34	0.015746
83	25.54	0.01568
84	25.76	0.015626
85	25.95	0.015556
86	26.13	0.015482
87	26.34	0.015427
88	26.53	0.015362
89	26.67	0.015269
90	26.88	0.015219
91	27.07	0.015158
92	27.29	0.015115
93	27.5	0.015067
94	27.62	0.014972
95	27.82	0.014922
96	28	0.014862
97	28.19	0.014809
98	28.37	0.014751
99	28.48	0.014659
100	28.66	0.014604

ตารางที่ 4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 6 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.41	0.020881
2	0.77	0.019608
3	1.2	0.020372
4	1.64	0.020881
5	2.01	0.020474
6	2.44	0.020711
7	2.88	0.020954
8	3.32	0.021136
9	3.7	0.020938
10	4.09	0.02083
11	4.53	0.020974
12	4.93	0.020924
13	5.35	0.020959
14	5.75	0.020917
15	6.2	0.021051
16	6.62	0.021072
17	7	0.020971
18	7.43	0.021023
19	7.84	0.021015
20	8.26	0.021034

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	8.63	0.02093
22	8.98	0.020788
23	9.38	0.02077
24	9.76	0.020711
25	10.18	0.020738
26	10.55	0.020666
27	10.93	0.020617
28	11.34	0.020626
29	11.7	0.020547
30	12.09	0.020525
31	12.46	0.02047
32	12.79	0.020356
33	13.18	0.020341
34	13.51	0.020237
35	13.89	0.020212
36	14.24	0.020145
37	14.6	0.020096
38	14.91	0.019983
39	15.24	0.019902
40	15.59	0.01985

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	15.92	0.019776
42	16.25	0.019705
43	16.57	0.019626
44	16.91	0.019573
45	17.22	0.019489
46	17.53	0.019409
47	17.84	0.019332
48	18.1	0.019205
49	18.34	0.019062
50	18.64	0.018987
51	18.96	0.018934
52	19.23	0.018834
53	19.53	0.018767
54	19.84	0.018712
55	20.12	0.018631
56	20.42	0.018571
57	20.7	0.018495
58	20.97	0.018414
59	21.16	0.018266
60	21.45	0.018207

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	21.73	0.018143
62	21.99	0.018064
63	22.3	0.018027
64	22.56	0.017953
65	22.81	0.017872
66	23.07	0.017802
67	23.33	0.017734
68	23.59	0.017668
69	23.85	0.017604
70	24.11	0.017542
71	24.36	0.017474
72	24.63	0.017422
73	24.74	0.01726
74	24.99	0.017199
75	25.24	0.017139
76	25.48	0.017075
77	25.71	0.017005
78	25.91	0.016918
79	26.17	0.016871
80	26.38	0.016794

ตารางที่ ก4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	26.64	0.01675
82	26.75	0.016614
83	27	0.016567
84	27.24	0.016516
85	27.45	0.016447
86	27.7	0.016404
87	27.91	0.016338
88	28.13	0.01628
89	28.36	0.016229
90	28.58	0.016173
91	28.81	0.016124
92	29.03	0.01607
93	29.24	0.016013
94	29.45	0.015956
95	29.6	0.015869
96	29.81	0.015815
97	30.03	0.015767
98	30.19	0.015689
99	30.4	0.015639
100	30.62	0.015595

ตารางที่ ก5 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 4 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.09	0.004586
2	0.18	0.004586
3	0.26	0.004416
4	0.3	0.003822
5	0.33	0.003363
6	0.44	0.003737
7	0.5	0.00364
8	0.61	0.003885
9	0.68	0.00385
10	0.72	0.003669
11	0.81	0.003752
12	0.88	0.003737
13	0.96	0.003763
14	1.03	0.003749
15	1.11	0.003771
16	1.22	0.003885
17	1.28	0.003837
18	1.39	0.003935
19	1.49	0.003996
20	1.58	0.004025

ตารางที่ ก5 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	1.67	0.004052
22	1.76	0.004076
23	1.84	0.004076
24	1.94	0.004119
25	2.04	0.004158
26	2.13	0.004174
27	2.21	0.004171
28	2.31	0.004204
29	2.37	0.004164
30	2.44	0.004144
31	2.55	0.004191
32	2.62	0.004172
33	2.71	0.004185
34	2.82	0.004226
35	2.91	0.004237
36	3.01	0.00426
37	3.08	0.004242
38	3.19	0.004278
39	3.29	0.004299
40	3.36	0.00428

ตารางที่ ก5 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	3.45	0.004288
42	3.55	0.004307
43	3.61	0.004278
44	3.68	0.004262
45	3.77	0.004269
46	3.87	0.004287
47	3.95	0.004282
48	4.03	0.004278
49	4.12	0.004284
50	4.22	0.004301
51	4.29	0.004286
52	4.39	0.004302
53	4.45	0.004278
54	4.55	0.004293
55	4.63	0.00429
56	4.73	0.004304
57	4.8	0.004291
58	4.91	0.004314
59	4.96	0.004284
60	5.08	0.004314

ตารางที่ ก5 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	5.15	0.004302
62	5.25	0.004315
63	5.32	0.004303
64	5.4	0.004299
65	5.49	0.004304
66	5.58	0.004308
67	5.65	0.004297
68	5.7	0.004271
69	5.79	0.004276
70	5.87	0.004273
71	5.96	0.004277
72	6.04	0.004275
73	6.13	0.004279
74	6.19	0.004262
75	6.24	0.004239
76	6.35	0.004257
77	6.44	0.004262
78	6.5	0.004246
79	6.61	0.004263
80	6.67	0.004248

ตารางที่ ก5 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UH030 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	6.76	0.004253
82	6.85	0.004257
83	6.92	0.004248
84	6.99	0.00424
85	7.09	0.00425
86	7.17	0.004248
87	7.25	0.004246
88	7.29	0.004221
89	7.36	0.004214
90	7.44	0.004212
91	7.54	0.004222
92	7.61	0.004215
93	7.69	0.004213
94	7.76	0.004207
95	7.84	0.004205
96	7.92	0.004204
97	7.99	0.004197
98	8.07	0.004196
99	8.16	0.0042
100	8.25	0.004204

ตารางที่ 6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 8 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.21	0.010701
2	0.44	0.01121
3	0.48	0.008153
4	0.66	0.008408
5	0.96	0.009783
6	1.31	0.011125
7	1.63	0.011865
8	2	0.012739
9	2.3	0.013022
10	2.66	0.013554
11	3.04	0.014082
12	3.43	0.014565
13	3.83	0.015012
14	4.27	0.015541
15	4.65	0.015796
16	5.03	0.016019
17	5.42	0.016246
18	5.83	0.016504
19	6.22	0.016681
20	6.66	0.016968

ตารางที่ 6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	7.06	0.017131
22	7.47	0.017302
23	7.86	0.017413
24	8.29	0.017601
25	8.67	0.017671
26	9.09	0.017815
27	9.5	0.017929
28	9.93	0.018071
29	10.35	0.018186
30	10.76	0.018276
31	11.19	0.018393
32	11.58	0.018439
33	12.02	0.01856
34	12.39	0.018569
35	12.8	0.018635
36	13.2	0.018684
37	13.62	0.018757
38	14.02	0.0188
39	14.42	0.01884
40	14.81	0.018866

ตารางที่ 6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	15.22	0.018916
42	15.61	0.018938
43	15.99	0.018948
44	16.38	0.018969
45	16.71	0.018921
46	17.09	0.018931
47	17.49	0.018962
48	17.9	0.019002
49	18.29	0.01902
50	18.69	0.019047
51	19.01	0.018993
52	19.39	0.019
53	19.78	0.019017
54	20.18	0.019042
55	20.58	0.019067
56	20.89	0.019008
57	21.27	0.019014
58	21.69	0.019056
59	22.05	0.019044
60	22.39	0.019015

ตารางที่ 6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	22.76	0.019012
62	23.15	0.019026
63	23.53	0.019031
64	23.87	0.019005
65	24.21	0.018979
66	24.62	0.019008
67	25	0.019013
68	25.34	0.018988
69	25.62	0.01892
70	26.03	0.018948
71	26.38	0.018932
72	26.78	0.018953
73	27.05	0.018881
74	27.43	0.018888
75	27.81	0.018894
76	28.11	0.018847
77	28.46	0.018834
78	28.82	0.018827
79	29.2	0.018834
80	29.5	0.01879

ตารางที่ 6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	29.83	0.018765
82	30.16	0.018742
83	30.53	0.018743
84	30.85	0.018714
85	31.18	0.018692
86	31.49	0.018658
87	31.84	0.018649
88	32.22	0.018657
89	32.56	0.018642
90	32.83	0.018587
91	33.17	0.018574
92	33.52	0.018565
93	33.86	0.018552
94	34.17	0.018523
95	34.55	0.018532
96	34.82	0.018482
97	35.18	0.018481
98	35.54	0.018479
99	35.89	0.018473
100	36.12	0.018405

ตารางที่ ก7 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 6 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.07	0.003567
2	0.12	0.003057
3	0.12	0.002038
4	0.17	0.002166
5	0.25	0.002548
6	0.3	0.002548
7	0.34	0.002475
8	0.39	0.002484
9	0.47	0.002661
10	0.54	0.002752
11	0.61	0.002826
12	0.67	0.002845
13	0.74	0.002901
14	0.8	0.002912
15	0.88	0.002989
16	0.91	0.002898
17	1.01	0.003027
18	1.09	0.003086
19	1.16	0.003111
20	1.24	0.003159

ตารางที่ ก7 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	1.32	0.003203
22	1.41	0.003266
23	1.49	0.003301
24	1.57	0.003333
25	1.64	0.003343
26	1.74	0.00341
27	1.82	0.003435
28	1.92	0.003494
29	2.02	0.003549
30	2.13	0.003618
31	2.24	0.003682
32	2.33	0.00371
33	2.43	0.003752
34	2.53	0.003792
35	2.63	0.003829
36	2.73	0.003864
37	2.83	0.003897
38	2.93	0.003929
39	3.06	0.003998
40	3.16	0.004025

ตารางที่ ก7 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	3.29	0.004089
42	3.42	0.004149
43	3.52	0.004171
44	3.62	0.004192
45	3.73	0.004224
46	3.84	0.004254
47	3.97	0.004304
48	4.1	0.004352
49	4.23	0.004399
50	4.36	0.004443
51	4.49	0.004486
52	4.62	0.004527
53	4.74	0.004557
54	4.87	0.004595
55	5	0.004632
56	5.12	0.004659
57	5.24	0.004684
58	5.36	0.004709
59	5.48	0.004733
60	5.6	0.004756

ตารางที่ ก7 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	5.73	0.004786
62	5.86	0.004816
63	5.9	0.004772
64	6.11	0.004865
65	6.23	0.004884
66	6.36	0.00491
67	6.49	0.004936
68	6.62	0.004961
69	6.74	0.004977
70	6.87	0.005001
71	6.99	0.005017
72	7.13	0.005046
73	7.27	0.005075
74	7.41	0.005102
75	7.54	0.005123
76	7.66	0.005136
77	7.79	0.005155
78	7.9	0.005161
79	8.04	0.005186
80	8.17	0.005204

ตารางที่ ก7 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 6 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	8.3	0.005221
82	8.43	0.005238
83	8.56	0.005255
84	8.68	0.005265
85	8.78	0.005263
86	8.91	0.005279
87	9.05	0.005301
88	9.18	0.005316
89	9.3	0.005325
90	9.43	0.005339
91	9.57	0.005359
92	9.71	0.005378
93	9.84	0.005391
94	9.96	0.005399
95	10.09	0.005412
96	10.23	0.00543
97	10.35	0.005437
98	10.48	0.005449
99	10.63	0.005471
100	10.75	0.005478

ตารางที่ ก8 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 4 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.03	0.001529
2	0.06	0.001529
3	0.06	0.001019
4	0.09	0.001146
5	0.12	0.001223
6	0.12	0.001019
7	0.12	0.000874
8	0.11	0.000701
9	0.12	0.000679
10	0.14	0.000713
11	0.13	0.000602
12	0.16	0.000679
13	0.16	0.000627
14	0.18	0.000655
15	0.21	0.000713
16	0.21	0.000669
17	0.25	0.000749
18	0.26	0.000736
19	0.26	0.000697
20	0.28	0.000713

ตารางที่ ก8 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	0.29	0.000704
22	0.32	0.000741
23	0.34	0.000753
24	0.34	0.000722
25	0.36	0.000734
26	0.38	0.000745
27	0.4	0.000755
28	0.39	0.00071
29	0.38	0.000668
30	0.37	0.000628
31	0.41	0.000674
32	0.42	0.000669
33	0.43	0.000664
34	0.46	0.000689
35	0.48	0.000699
36	0.48	0.000679
37	0.51	0.000702
38	0.53	0.000711
39	0.56	0.000732
40	0.56	0.000713

ตารางที่ ก8 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	0.59	0.000733
42	0.61	0.00074
43	0.61	0.000723
44	0.64	0.000741
45	0.65	0.000736
46	0.68	0.000753
47	0.68	0.000737
48	0.72	0.000764
49	0.74	0.00077
50	0.74	0.000754
51	0.76	0.000759
52	0.78	0.000764
53	0.79	0.00076
54	0.81	0.000764
55	0.85	0.000787
56	0.86	0.000783
57	0.89	0.000796
58	0.91	0.000799
59	0.93	0.000803
60	0.94	0.000798

ตารางที่ ก8 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	0.96	0.000802
62	0.99	0.000814
63	1.01	0.000817
64	1.04	0.000828
65	1.07	0.000839
66	1.09	0.000842
67	1.12	0.000852
68	1.14	0.000854
69	1.16	0.000857
70	1.19	0.000866
71	1.2	0.000861
72	1.22	0.000863
73	1.25	0.000873
74	1.26	0.000868
75	1.29	0.000876
76	1.32	0.000885
77	1.34	0.000887
78	1.36	0.000888
79	1.39	0.000897
80	1.41	0.000898

ตารางที่ ก8 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP010 ที่ความดัน 4 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	1.46	0.000918
82	1.49	0.000926
83	1.53	0.000939
84	1.53	0.000928
85	1.59	0.000953
86	1.61	0.000954
87	1.64	0.000961
88	1.66	0.000961
89	1.7	0.000973
90	1.74	0.000985
91	1.76	0.000986
92	1.8	0.000997
93	1.85	0.001014
94	1.87	0.001014
95	1.9	0.001019
96	1.94	0.00103
97	1.96	0.00103
98	2	0.00104
99	2.04	0.00105
100	2.07	0.001055

ตารางที่ 9 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 20 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.14	0.007134
2	0.23	0.00586
3	0.33	0.005605
4	0.4	0.005096
5	0.48	0.004892
6	0.55	0.004671
7	0.6	0.004368
8	0.6	0.003822
9	0.6	0.003397
10	0.6	0.003057
11	0.63	0.002918
12	0.64	0.002718
13	0.68	0.002665
14	0.7	0.002548
15	0.76	0.002582
16	0.81	0.00258
17	0.87	0.002608
18	0.91	0.002576
19	0.96	0.002575
20	1.01	0.002573

ตารางที่ ก9 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 20 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	1.06	0.002572
22	1.1	0.002548
23	1.16	0.00257
24	1.23	0.002611
25	1.27	0.002589
26	1.3	0.002548
27	1.34	0.002529
28	1.42	0.002584
29	1.47	0.002583
30	1.51	0.002565
31	1.57	0.002581
32	1.59	0.002532
33	1.64	0.002532
34	1.67	0.002503
35	1.71	0.00249
36	1.74	0.002463
37	1.74	0.002396
38	1.76	0.00236
39	1.8	0.002352
40	1.83	0.002331

ตารางที่ ก9 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 20 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	1.85	0.002299
42	1.91	0.002317
43	1.97	0.002334
44	2.02	0.002339
45	2.06	0.002333
46	2.11	0.002337
47	2.17	0.002353
48	2.19	0.002325
49	2.24	0.002329
50	2.26	0.002303
51	2.31	0.002308
52	2.36	0.002313
53	2.41	0.002317
54	2.46	0.002321
55	2.51	0.002325
56	2.58	0.002348
57	2.63	0.002351
58	2.68	0.002354
59	2.7	0.002332
60	2.79	0.002369

ตารางที่ ก9 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 20 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	2.81	0.002347
62	2.87	0.002359
63	2.92	0.002362
64	2.96	0.002357
65	2.99	0.002344
66	3.05	0.002355
67	3.12	0.002373
68	3.14	0.002353
69	3.21	0.002371
70	3.27	0.00238
71	3.3	0.002368
72	3.39	0.002399
73	3.41	0.00238
74	3.49	0.002403
75	3.52	0.002392
76	3.6	0.002414
77	3.62	0.002396
78	3.67	0.002398
79	3.72	0.002399
80	3.75	0.002389

ตารางที่ ก9 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 20 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	3.81	0.002397
82	3.84	0.002386
83	3.94	0.002419
84	3.99	0.00242
85	4.07	0.00244
86	4.12	0.002441
87	4.19	0.002454
88	4.25	0.002461
89	4.33	0.002479
90	4.4	0.002491
91	4.45	0.002492
92	4.5	0.002492
93	4.58	0.002509
94	4.64	0.002515
95	4.72	0.002532
96	4.8	0.002548
97	4.9	0.002574
98	4.99	0.002595
99	5.1	0.002625
100	5.21	0.002655

ตารางที่ ก10 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 15 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.06	0.003057
2	0.11	0.002803
3	0.12	0.002038
4	0.16	0.002038
5	0.21	0.00214
6	0.23	0.001953
7	0.25	0.00182
8	0.28	0.001783
9	0.28	0.001585
10	0.28	0.001427
11	0.3	0.00139
12	0.3	0.001274
13	0.32	0.001254
14	0.34	0.001237
15	0.34	0.001155
16	0.37	0.001178
17	0.37	0.001109
18	0.37	0.001047
19	0.37	0.000992
20	0.39	0.000994

ตารางที่ ก10 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 15 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	0.41	0.000995
22	0.41	0.00095
23	0.44	0.000975
24	0.44	0.000934
25	0.45	0.000917
26	0.47	0.000921
27	0.48	0.000906
28	0.51	0.000928
29	0.53	0.000931
30	0.53	0.0009
31	0.55	0.000904
32	0.58	0.000924
33	0.58	0.000896
34	0.6	0.000899
35	0.6	0.000874
36	0.62	0.000878
37	0.64	0.000881
38	0.64	0.000858
39	0.67	0.000875
40	0.67	0.000854

ตารางที่ ก10 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 15 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	0.67	0.000833
42	0.67	0.000813
43	0.69	0.000818
44	0.69	0.000799
45	0.72	0.000815
46	0.72	0.000798
47	0.72	0.000781
48	0.74	0.000786
49	0.74	0.00077
50	0.74	0.000754
51	0.77	0.000769
52	0.77	0.000755
53	0.79	0.00076
54	0.79	0.000745
55	0.79	0.000732
56	0.81	0.000737
57	0.81	0.000724
58	0.81	0.000712
59	0.81	0.0007
60	0.81	0.000688

ตารางที่ ก10 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 15 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	0.81	0.000677
62	0.83	0.000682
63	0.83	0.000671
64	0.86	0.000685
65	0.86	0.000674
66	0.89	0.000687
67	0.89	0.000677
68	0.89	0.000667
69	0.91	0.000672
70	0.91	0.000662
71	0.93	0.000667
72	0.93	0.000658
73	0.95	0.000663
74	0.95	0.000654
75	0.96	0.000652
76	0.98	0.000657
77	0.98	0.000649
78	0.98	0.00064
79	1.01	0.000651
80	1.01	0.000643

ตารางที่ ก10 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 15 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	1.03	0.000648
82	1.03	0.00064
83	1	0.000632
84	1.05	0.000637
85	1.07	0.000641
86	1.07	0.000634
87	1.08	0.000633
88	1.11	0.000643
89	1.11	0.000636
90	1.13	0.00064
91	1.13	0.000633
92	1.15	0.000637
93	1.15	0.00063
94	1.15	0.000623
95	1.18	0.000633
96	1.18	0.000626
97	1.21	0.000636
98	1.21	0.000629
99	1.21	0.000623
100	1.21	0.000617

ตารางที่ ก11 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 10 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0

ตารางที่ ก11 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 10 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0
25	0	0
26	0	0
27	0	0
28	0	0
29	0	0
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	0	0
34	0	0
35	0	0
36	0	0
37	0	0
38	0	0
39	0	0
40	0	0

ตารางที่ ก11 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 10 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	0	0
42	0	0
43	0	0
44	0	0
45	0	0
46	0	0
47	0	0
48	0	0
49	0	0
50	0	0
51	0	0
52	0	0
53	0	0
54	0	0
55	0	0
56	0	0
57	0	0
58	0	0
59	0	0
60	0	0

ตารางที่ ก11 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 10 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	0.01	8.35E-06
62	0.01	8.21E-06
63	0.01	8.08E-06
64	0.01	7.96E-06
65	0.01	7.84E-06
66	0.01	7.72E-06
67	0.01	7.6E-06
68	0.01	7.49E-06
69	0.01	7.38E-06
70	0.01	7.28E-06
71	0.01	7.17E-06
72	0.01	7.07E-06
73	0.01	6.98E-06
74	0.01	6.88E-06
75	0.01	6.79E-06
76	0.01	6.7E-06
77	0.01	6.61E-06
78	0.01	6.53E-06
79	0.01	6.45E-06
80	0.01	6.37E-06

ตารางที่ ก11 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน UP005 ที่ความดัน 10 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	0.01	6.29E-06
82	0.01	6.21E-06
83	0.01	6.14E-06
84	0.01	6.06E-06
85	0.01	5.99E-06
86	0.01	5.92E-06
87	0.01	5.85E-06
88	0.01	5.79E-06
89	0.01	5.72E-06
90	0.01	5.66E-06
91	0.01	5.6E-06
92	0.01	5.54E-06
93	0.01	5.48E-06
94	0.01	5.42E-06
95	0.01	5.36E-06
96	0.01	5.31E-06
97	0.01	5.25E-06
98	0.01	5.2E-06
99	0.01	5.14E-06
100	0.01	5.09E-06

ตารางที่ ก12 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 15 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.24	0.012229
2	0.5	0.012738
3	0.91	0.015456
4	1.33	0.016942
5	1.7	0.017324
6	2.18	0.018513
7	2.71	0.019727
8	3.28	0.020891
9	3.86	0.021854
10	4.42	0.022522
11	5	0.023161
12	5.52	0.023439
13	6.12	0.023988
14	6.7	0.024385
15	7.34	0.024934
16	7.98	0.025414
17	8.63	0.025867
18	9.26	0.026213
19	9.88	0.026496
20	10.46	0.026649

ตารางที่ ก12 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 15 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	11.1	0.026933
22	11.75	0.027214
23	12.41	0.027493
24	13.04	0.027685
25	13.67	0.02786
26	14.31	0.028045
27	14.98	0.028270
28	15.61	0.028407
29	16.23	0.028517
30	16.9	0.028704
31	17.56	0.028863
32	18.2	0.028980
33	18.85	0.029106
34	19.48	0.029194
35	20.1	0.029262
36	20.76	0.029384
37	21.39	0.029457
38	22.02	0.029527
39	22.65	0.029593
40	23.28	0.029656

ตารางที่ ก12 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 15 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	23.89	0.029690
42	24.52	0.029748
43	25.12	0.029767
44	25.73	0.029797
45	26.31	0.029791
46	26.92	0.029819
47	27.5	0.029814
48	28.08	0.029808
49	28.66	0.029803
50	29.21	0.029768
51	29.72	0.029694
52	30.26	0.029652
53	30.74	0.029554
54	31.25	0.029488
55	31.74	0.029405
56	32.2	0.029299
57	32.68	0.029214
58	33.11	0.029088
59	33.54	0.028966
60	33.94	0.028823

ตารางที่ ก12 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 15 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	34.3	0.028651
62	34.65	0.028477
63	34.97	0.028284
64	35.25	0.028065
65	35.51	0.027837
66	35.61	0.027492
67	35.84	0.027257
68	36.07	0.02702
69	36.24	0.02676
70	36.44	0.026525
71	36.63	0.026288
72	36.81	0.026050
73	36.98	0.025812
74	37.16	0.025587
75	37.33	0.025362
76	37.49	0.025135
77	37.64	0.024908
78	37.82	0.024706
79	37.98	0.024497
80	38.13	0.024286

ตารางที่ ก12 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 15 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	38.28	0.024081
82	38.44	0.023886
83	38.59	0.023691
84	38.74	0.023500
85	38.89	0.023313
86	39.04	0.023131
87	39.2	0.022959
88	39.35	0.022785
89	39.5	0.022615
90	39.65	0.022448
91	39.8	0.022285
92	39.94	0.022121
93	40.08	0.02196
94	40.23	0.021807
95	40.38	0.021658
96	40.56	0.021528
97	40.67	0.021364
98	40.82	0.02122
99	40.97	0.021087
100	41.1	0.020942

ตารางที่ ก13 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 10 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.11	0.005605096
2	0.21	0.005350318
3	0.35	0.005944798
4	0.53	0.006751592
5	0.67	0.006828025
6	0.82	0.006963907
7	0.99	0.007206551
8	1.22	0.007770701
9	1.44	0.008152866
10	1.64	0.008356688
11	1.87	0.00866242
12	2.09	0.008874735
13	2.31	0.009054385
14	2.54	0.009244768
15	2.67	0.009070064
16	2.73	0.008694268
17	2.98	0.008932184
18	3.23	0.009143666
19	3.46	0.009279249
20	3.7	0.009426752

ตารางที่ ก13 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 10 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	3.96	0.009608735
22	4.21	0.009751013
23	4.45	0.009858765
24	4.7	0.009978769
25	4.96	0.010109554
26	5.2	0.010191083
27	5.43	0.0102477
28	5.68	0.01033667
29	5.93	0.010419504
30	6.14	0.010428875
31	6.39	0.01050339
32	6.63	0.010557325
33	6.88	0.010623432
34	7.13	0.01068565
35	7.34	0.010686078
36	7.57	0.010714791
37	7.81	0.010755724
38	8.05	0.010794502
39	8.31	0.010857423
40	8.53	0.010866242

ตารางที่ ก13 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 10 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	8.78	0.010911915
42	9.05	0.010979678
43	9.26	0.010973189
44	9.54	0.01104806
45	9.79	0.011085633
46	10.04	0.011121573
47	10.29	0.011155983
48	10.54	0.01118896
49	10.8	0.011230989
50	11.05	0.011261146
51	11.28	0.011270139
52	11.54	0.011308182
53	11.81	0.011354405
54	12.07	0.011389479
55	12.29	0.011386219
56	12.56	0.011428571
57	12.61	0.011272768
58	12.91	0.011341972
59	13.15	0.011357012
60	13.39	0.01137155

ตารางที่ ก13 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 10 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	13.64	0.011393965
62	13.87	0.011399219
63	14.1	0.011404307
64	14.33	0.011409236
65	14.58	0.011429691
66	14.81	0.011434086
67	15.03	0.011430744
68	15.22	0.011405021
69	15.49	0.011439121
70	15.7	0.011428571
71	15.94	0.011439849
72	16.16	0.01143666
73	16.43	0.011468458
74	16.67	0.01147874
75	16.89	0.011475159
76	17.12	0.011478377
77	17.36	0.01148813
78	17.6	0.011497632
79	17.86	0.011519794
80	18.07	0.011509554

ตารางที่ ก13 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 10 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	18.29	0.011505858
82	18.5	0.011496039
83	18.73	0.011498734
84	18.87	0.01144677
85	19.06	0.011426002
86	19.32	0.011447193
87	19.55	0.011450326
88	19.78	0.011453387
89	20	0.011450655
90	20.16	0.011414013
91	20.37	0.011406173
92	20.6	0.011409582
93	20.83	0.011412917
94	21.02	0.011394498
95	21.22	0.01138183
96	21.44	0.011380042
97	21.66	0.011378291
98	21.89	0.011381776
99	22.06	0.011354307
100	22.28	0.011352866

ตารางที่ ก14 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 8 บาร์

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
1	0.08	0.004076433
2	0.13	0.003312102
3	0.18	0.003057325
4	0.23	0.002929936
5	0.27	0.002751592
6	0.35	0.002972399
7	0.42	0.003057325
8	0.46	0.002929936
9	0.54	0.003057325
10	0.58	0.002955414
11	0.65	0.003011002
12	0.73	0.003099788
13	0.8	0.003135718
14	0.87	0.003166515
15	0.96	0.003261146
16	1.04	0.003312102
17	1.14	0.00341701
18	1.24	0.003510262
19	1.32	0.00354006
20	1.39	0.003541401

ตารางที่ ก14 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
21	1.47	0.003566879
22	1.55	0.003590041
23	1.66	0.003677652
24	1.76	0.00373673
25	1.88	0.003831847
26	1.99	0.003900049
27	2.09	0.003944326
28	2.21	0.004021838
29	2.32	0.004076433
30	2.4	0.004076433
31	2.51	0.004125745
32	2.62	0.004171975
33	2.73	0.004215402
34	2.86	0.00428625
35	2.98	0.00433849
36	3.11	0.004401982
37	3.23	0.00444827
38	3.35	0.004492122
39	3.49	0.004559856
40	3.64	0.004636943

ตารางที่ ก14 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

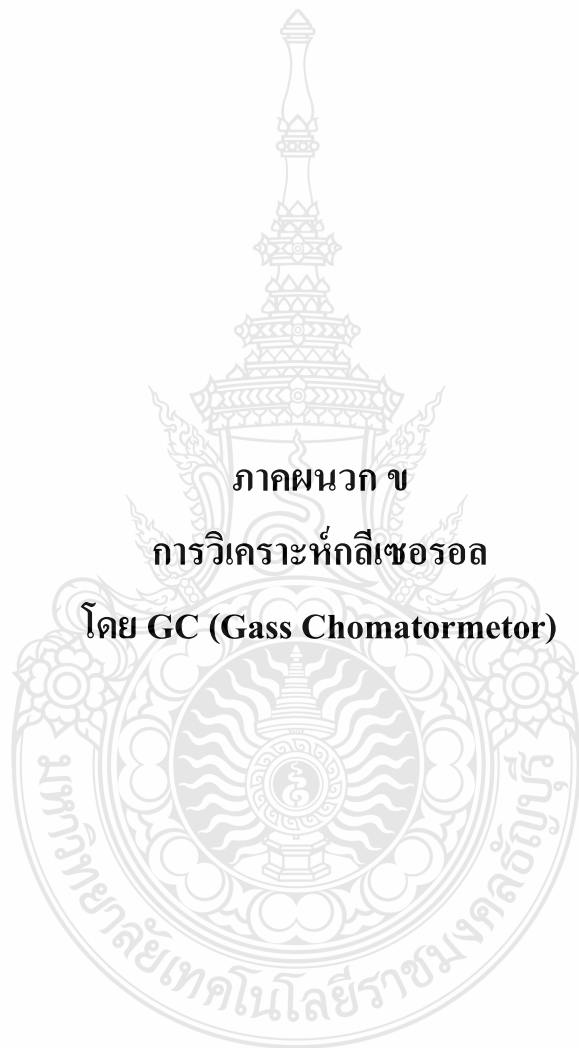
เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
41	3.78	0.004697841
42	3.93	0.004767971
43	4.05	0.004799289
44	4.21	0.004875507
45	4.34	0.004914367
46	4.49	0.004973691
47	4.64	0.005030492
48	4.75	0.005042463
49	4.88	0.005074743
50	5	0.005095541
51	5.15	0.005145498
52	5.28	0.005173934
53	5.44	0.005230141
54	5.57	0.005255957
55	5.69	0.005271569
56	5.8	0.005277525
57	5.92	0.005292211
58	6.06	0.005323962
59	6.2	0.005354637
60	6.33	0.005375796

ตารางที่ ก14 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
61	6.47	0.005404615
62	6.61	0.005432505
63	6.77	0.005475685
64	6.92	0.005509554
65	7.04	0.005518863
66	7.18	0.005543331
67	7.31	0.005559464
68	7.41	0.005552641
69	7.55	0.005575556
70	7.7	0.005605096
71	7.86	0.00564098
72	8.01	0.00566879
73	8.16	0.005695838
74	8.31	0.005722155
75	8.41	0.0057138
76	8.53	0.005719075
77	8.67	0.005737447
78	8.83	0.005768414
79	8.96	0.005779247
80	9.11	0.005802548

ตารางที่ ก14 ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ระดับการกรองอัลตราฟิลเตรชัน NP010 ที่ความดัน 8 บาร์ (ต่อ)

เวลาการกรอง (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอท (g)	ฟลักซ์ (g/min.cm ²)
81	9.27	0.005831564
82	9.39	0.005835016
83	9.55	0.005862942
84	9.67	0.005865939
85	9.83	0.005892844
86	9.96	0.005901348
87	10.07	0.005897943
88	10.22	0.005917776
89	10.33	0.005914263
90	10.46	0.005922151
91	10.63	0.005952264
92	10.77	0.005965107
93	10.88	0.005961236
94	11.01	0.005968288
95	11.14	0.005975193
96	11.31	0.006003185
97	11.44	0.006009587
98	11.57	0.006015859
99	11.74	0.006042592
100	11.89	0.006058599



ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ก๊าสเซอรอด

โดย GC (Gass Chomatormeter)

การวิเคราะห์ก๊าสโครอลด้วยชุดเครื่องมือวิเคราะห์ GC Perkin



1. สารเคมี

1.1 สารละลายเฮปเทน

1.2 Methyl heptadecanoate (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99) ความเข้มข้น 10 มก./มล. ชั่ง Methyl heptadecanoate ปริมาณ 500 กรัม ละลายด้วยเฮปเทนในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มล.

1.3 สารละลายมาตรฐาน : สารละลายมาตรฐานเมทิลเอสเทอร์ที่มีคาร์บอนตั้งแต่ C_8 - C_{24}

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกรี ดีเทคเตอร์ชนิดเฟลมไอออไนเซชัน

2.2 Capillary column

1) Stationary phase : polyethylene glycol

2) ความยาว 30 ม.

3) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มม.

4) ความหนา 0.25 ไมโครเมตร

2.3 Inject

1) อัตราการไหลแบบ Split (Split flow rate) 20 มล./นาที่ ถึง 100 มล./นาที่

2) อุณหภูมิ 250°C

2.4 Carrier gas ใช้ไฮโดรเจนหรือฮีเลียม

1) ความดัน 20 kPa ถึง 100 kPa

2) อัตราการไหล 1 มล./นาที่ ถึง 2 มล./นาที่

2.5 Detector

1) อุณหภูมิ 250° ซ

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ไบโอดีเซล แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงสภาวะในการวิเคราะห์

Injector		
ปริมาณตัวอย่างที่ฉีด 1 ไมโครลิตร		
Column Temperature Program		
Initial Temperature	150° ซ	ทิ้งไว้ 5 นาที
Rate 1	3° ซ/ นาที ถึง 190° ซ	ทิ้งไว้ 5 นาที
Rate 2	3° ซ/ นาที ถึง 220° ซ	ทิ้งไว้ 5 นาที

3. วิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมสารตัวอย่าง

ชั่งสารตัวอย่าง 250 มก. ลงในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 10 มล. เติมสารละลาย Methyl heptadecanoate 5 มล. ด้วยปิเปต

3.2 การวิเคราะห์ผล

วิเคราะห์ผลของสารตัวอย่าง ด้วยการเทียบค่า retention time ของสารตัวอย่างกับ retention time ของสารมาตรฐาน เพื่อใช้ในการระบุว่าเป็นที่พีคใดที่จะนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณเอสเทอร์

3.3 การคำนวณ

ปริมาณเอสเทอร์ C หน่วยเป็นสัดส่วนร้อยละของน้ำหนัก คำนวณได้ดังนี้

$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\%$$

เมื่อ	ΣA	คือ	ผลรวมพื้นที่ผิวของเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ C_{14} - C_{24}
	A_{EI}	คือ	พื้นที่ผิวของ Methyl heptadecanoate
	C_{EI}	คือ	ความเข้มข้นของสารละลาย Methyl heptadecanoate ที่ใช้, มิลลิลิตร
	V_{EI}	คือ	ปริมาตรของสารละลาย Methyl heptadecanoate ที่ใช้, มิลลิลิตร
	M	คือ	น้ำหนักของสารตัวอย่าง, มิลลิลิตร





ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์กัมมิเซอรอลและกรดไขมันอิสระ

โดยเครื่องไตเตรตอัตโนมัติยี่ห้อ Metrohm รุ่น 848 Titrino Plus

1. วิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอลด้วยเครื่องไตเตทอัตรโนมิติ

การวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอล ด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 848 Titrino Plus โดยใช้มาตรฐาน มอก.336 (2553)

1.1 อุปกรณ์

- 1) ขวดลูกชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 2) บีกเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3) กระจกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 4) ปิเปต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 5) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 6) แมกเนติกสเตอร์
- 7) ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 8) ขวดเก็บสารสีชา ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 9) ฟอย

1.2 สารเคมี

- 1) น้ำมันพืชที่ต้องการวิเคราะห์
- 2) น้ำกลั่น
- 3) โซดาไฟโซดาไฟ (NaOH) ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์ (Analytical Reagent (A.R.)) มีความเข้มข้น 99 เปอร์เซ็นต์
- 4) อีเทนไดออล
- 5) โบรโมไทมอลบลูอินดิเคเตอร์
- 6) โซเดียมเปอร์ไอโอเดต
- 7) กรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์ (Analytical Reagent (A.R.)) มีความเข้มข้น 96 เปอร์เซ็นต์

1.3 การเตรียมสารเคมี

- 1) โซดาไฟ (NaOH) 0.125 โมล/ลิตร: ชั่งโซดาไฟ 5.05 กรัม เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร

- 2) โซดาไฟ (NaOH) 0.05 โมล/ลิตร: ชั่งโซดาไฟ 2.02 กรัม เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร
- 3) โซดาไฟ (NaOH) 0.01 โมล/ลิตร: ชั่งโซดาไฟ 0.404 กรัม เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร
- 4) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 0.1 โมล/ลิตร: คุดรกรดซัลฟูริก 5.55 ลูกบาศก์เซนติเมตร เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร
- 5) ชั่งโซเดียมเปอร์ไอโอเดต 60 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร (3.4) จำนวน 60 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร (ละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต โคนไม่ต้องใช้ความร้อน) ถ่ายใส่ขวดบรรจุสีน้ำตาลพร้อมจุกปิดสนิท แล้วเก็บในที่มืด ห้ามโดนแสงแดด
- 6) ผสมอีเทนไดออกไซด์กับน้ำ ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 (โดยปริมาตร)
- 7) ชั่งโบรโมไทมอลบลูที่แห้ง 0.1 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 โมลต่อลิตร จำนวน 16 มิลลิลิตร เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำจนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

1.4 วิธีใช้เครื่องดีเทรทนต์ โนมัตติ

- 1) ชั่งตัวอย่าง 0.1000 กรัม ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 2) ถ่ายตัวอย่างลงขวดลูกผสมฟู เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร หยด โบรโมไทมอลบลู อินดิเคเตอร์ 5-7 หยด
- 3) ทำให้เป็นกรดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.1 โมลต่อลิตร โดยสีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง บันทึกปริมาณสารละลายกรดที่ใช้
- 4) ทำสารละลายให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลต่อลิตร อย่างระมัดระวังจนได้สารละลายสีฟ้าไม่มีสีเขียวปนอยู่เลย บันทึกปริมาณสารละลายด่างที่ใช้
- 5) ทำแบลنگก์โดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แทนตัวอย่าง แล้วปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 2) ข้อ 3) และ ข้อ 4)

6) ใช้ปิเปตดูดสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอดेटมาครั้งละ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารละลายตัวอย่างและเบลนก์แก้วชวดลูกชมพู่เบาๆ แล้วปิดด้วยฟอยให้สนิท ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

7) หลังจากนั้นเติมสารละลายอีเทนไดออล 10 มิลลิลิตร แก้วชวดลูกชมพู่เบาๆ แล้วตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที

8) เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวม 300 มิลลิลิตร (น้ำกลั่นที่เติม เท่ากับ 300 (ปริมาตรน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร + ปริมาณโซเดียมเปอร์ไอโอดेट + ปริมาณอีเทนไดออล + ซัลฟูริก 0.1 โมล/ลิตร + สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมล/ลิตร)) หยดสารละลายโบรโมไทมอลบลูอินดิเคเตอร์ 5-7 หยด สีสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้า

9) นำไปติเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.125 โมลต่อลิตร) ด้วยเครื่องติเตรทอัตโนมัติ โดย

10) เปิดเครื่อง นำบีกเกอร์เปล่าไปวาง

11) นำสารเคมีที่เป็นตัวติเตรทใส่ลงในขวดสารละลาย หรือส่วนที่เราเรียกว่า Exchange Unit จากนั้นเตรียม burette โดย

11.1) เลือก Menu > manual control กด OK จากนั้นให้เลือก PREP กด OK

11.2) จากนั้นเครื่องจะถามว่า burette tip อยู่ใน vessel หรือไม่ ถ้าใช่ให้ กด OK

11.3) เครื่องจะทำการ fill สารเคมีเข้ามาใน burette ให้อัตโนมัติ

11.4) สร้าง method ต้องมีการระบุชื่อสารละลาย (Titrant) ที่ใช้ โดย

11.5) เลือก Menu > System > Solutions กด OK

11.6) หน้าจอจะแสดง Edit, New และ Delete ให้เลือก New แล้วกด OK ใส่รายละเอียดของสารละลาย (Titrant) ที่ใช้แล้วเลือก accept

11.7) ติเตรทด้วย สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.125 โมลต่อลิตร)

11.8) ใส่โพลบลลงในขวดลูกชมพู่ให้สัมผัสสารตัวอย่างแต่ไม่ให้ถึงเมกเนติก กดเลือกใช้ Method ที่สร้างไว้ โดย เลือก Method > เลือก Methodที่ต้องการ > Load หน้าจอจะแสดง Method ที่จะใช้งาน

11.9) กด start เพื่อเริ่มทำงาน

12) รอจนหน้าจอแสดงจุดยุติและสารละลายเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูอ่อน ให้กด Stop เป็นการหยุดการติเตรท

13) บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

1.5 วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณกลีเซอรอล ร้อยละของน้ำหนัก} = \{ 9.209 \times N(T_1 - T_2) \} / W$$

เมื่อ	N	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร
	T ₁	คือ	ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการติเตรทกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
	T ₂	คือ	ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการติเตรทกับแบลนก์ (มิลลิลิตร)
	W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ (กรัม)

2. การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 848 Titrino Plus โดยใช้มาตรฐาน AOCS Cd 3a-63 รายละเอียดดังนี้

2.1 อุปกรณ์

- 1) ขวดลูกชมฟู
- 2) บีกเกอร์
- 3) กระบอกตวง
- 4) ปิเปต
- 5) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 6) แมกเนติกสเตอร์

2.2 สารเคมี

- 1) น้ำมันพืชที่ต้องการวิเคราะห์
- 2) น้ำกลั่น
- 3) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
- 4) โทลูอิน
- 5) โพพานอล
- 6) ฟีนอล์ฟทาลีน

2.3 การเตรียมสารละลาย

1) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำกลั่น ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล สามารถเตรียมได้โดยชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5.61 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น

2) สารผสมโพพานอลกับโทลูอินในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร และทำให้เป็นกลางต่อฟีนอล์ฟทาลีนด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

3) สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ ละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 กรัม ในสารโพพานอล ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

2.4 วิธีใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ

- 1) เปิดเครื่อง นำบีกเกอร์เปล่าไปวาง

2) นำสารเคมีที่เป็นตัวติเตรทใส่ลงในขวดสารละลาย หรือส่วนที่เราเรียกว่า Exchange Unit จากนั้นเตรียม burette โดย

2.1) เลือก Menu > manual control กด OK จากนั้นให้เลือก PREP กด OK

2.2) จากนั้นเครื่องจะถามว่า burette tip อยู่ใน vessel หรือไม่ ถ้าอยู่ให้กด OK เครื่องจะทำการ fill สารเคมีเข้ามาใน burette ให้อัตโนมัติ

2.3) สร้าง method ต้องมีการระบุชื่อสารละลาย (Titrant) ที่ใช้ โดย

2.4) เลือก Menu > System > Solutions กด OK

2.5) หน้าจอจะแสดง Edit, New และ Delete ให้เลือก New แล้วกด OK

2.6) ใส่รายละเอียดของสารละลาย (Titrant) ที่ใช้แล้วเลือก accept

3) ชั่งน้ำมันพืชที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาณดังแสดงในตารางด้านล่าง ใส่ในขวดลูกชมพู่ พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักน้ำมันพืช

ค่าของกรด	น้ำมันพืช ($\pm 10\%$) กรัม	ความละเอียดในการชั่ง \pm กรัม
0-1	20	0.05
1-4	10	0.02
4-15	2.5	0.01
15-75	0.5	0.001
มากกว่า 75	0.1	0.0002

4) เติมสารผสมโพพานอลกับโทลูอิน (3.2) ปริมาณ 125 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง ใช้แมกเนติกสเตอร์เรอร์ทำให้น้ำมันละลาย อาจใช้ความร้อนในกรณีที่น้ำมันไม่ละลายในสารละลาย

5) เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอินอินดิเคเตอร์ ปริมาณ 2 มิลลิลิตร

6) ติเตรตด้วย สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์โดย

6.1) ใส่โพลบลลงในขวดลูกชมพู่ให้สัมผัสสารตัวอย่างแต่ไม่ให้ถึงแมกเนติก

6.2) กดเลือกใช้ Method ที่สร้างไว้ โดย เลือก Method > เลือก Method ที่ต้องการ > Load หน้าจอจะแสดง Method ที่จะใช้งาน

6.3) กด start เพื่อเริ่มทำงาน

7) รอจนหน้าจอแสดงจุดยุติและสารละลายเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูอ่อน ให้กด Stop เป็นการหยุดการไตเตรท

8) บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

2.5 วิธีการคำนวณ

1) ค่าของกรด (AV)

$$AV = \frac{56.1 \times N \times V}{m}$$

เมื่อ AV คือ ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมน้ำมัน

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มัล)

V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรต (มิลลิลิตร)

m คือ น้ำหนักน้ำมันพืช (กรัม)

2) ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA, Free Fatty Acid)

ปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์กรดปาล์มมิติก ใช้สำหรับน้ำมันพืชที่มีกรดปาล์มมิติกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มโอลีน ปาล์มสเตียริน

$$\%FFA (\text{palmitic acid}) = \frac{AV}{2.19}$$

ปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์กรดลอริก ใช้สำหรับน้ำมันพืชที่มีกรดลอริกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันเมล็ดในปาล์ม

$$\%FFA (\text{lauric acid}) = \frac{AV}{2.81}$$

ปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์กรดโอเลอิก ใช้สำหรับน้ำมันพืชที่มีกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง เช่น น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันรำข้าว น้ำมันเมล็ดเรพ

$$\% \text{FFA (oleic acid)} = \frac{AV}{1.99}$$



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวสุดปรารถนา ธีรชาติ
วัน-เดือน-ปี เกิด วันที่ 19 มีนาคม 2537
ที่อยู่ 191/79 หมู่ 1 ตำบลบางกระบือ อำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี 16000
การศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2558
ประสบการณ์การทำงาน ตำแหน่ง Project Engineer บริษัท Accesstech Engineering Pte Ltd. ประเทศสิงคโปร์ พ.ศ. 2561 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ +65 83327279
อีเมล Sudpratthana_t@mail.rmutt.ac.th

