

การแยกเซลลูโลสและกลูโคสจากสารละลายไฮโดรไลเซทของหญ้าเนเปียร์
ด้วยการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

CELLULASE AND GLUCOSE SEPERATION FROM NAPIER
GRASS HYDROLYZATE BY ULTRAFILTRATION AND
NANOFILTRATION

มณฑิตา พิเชฐพงศ์วิมุติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การแยกเซลล์และกลูโคสจากสารละลายไฮโดรไลเซทของหญ้าเนเปียร์
ด้วยการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

มณฑิตา พิเชฐพงศ์วิมุติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การแยกเซลล์และกลูโคสจากสารละลายไฮโดรไลเซทของหญ้าเนเปียร์
ด้วยการกรองระดับอัตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

มณฑิตา พิเชฐพงศ์วิมุติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแยกเซลลูโลสและกลูโคสจากสารละลายไฮโดรไลเซทของหญ้าเนเปียร์
ด้วยการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน
Cellulase and Glucose Separation from Napier Grass Hydrolyzate by
Ultrafiltration and Nanofiltration

ชื่อ – นามสกุล นางสาวมินทิศา พิเชฐพงศ์วิมุติ


สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ, Ph.D.

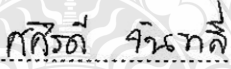
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย, วศ.ค.


ปีการศึกษา 2561


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์วีราภรณ์ ผิวสะอาด, D.Eng.)



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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิธรดี จันทลี, วศ.ค.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย, วศ.ค.)


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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 13 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกเซลล์และกลูโคสจากสารละลายไฮโดรไลเซทของ หญ้าเนเปียร์ด้วยการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวมิณฑิตา พิเชฐพงษ์วิมุติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย, วศ.ค.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกเอนไซม์เซลล์ด้วยการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน (UF) แบบไหลขวางและการกักกันน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน (NF) แบบปิดตายจากสารละลายไฮโดรไลเซทของหญ้าเนเปียร์ ผลการทดลองแสดงบนฐานของฟลักซ์เพอร์มิเอตความสามารถการกักกัน โมเดลฟาล์วลิ่งแบบเฮอร์เมียร์และฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้

การทดลองประกอบด้วยเมมเบรน 6 ชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง (MWCO) ต่างกัน การกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน ประกอบด้วยเมมเบรน PES0.2, PES500, PES100 และ PES10 สำหรับการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน ประกอบด้วยเมมเบรน NP010 และ NP030 การทดลองเริ่มจากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันแบบไหลขวางที่อัตราการไหล 3 ค่า คือ 30, 50 และ 75 ml/min โดยสารละลายเพอร์มิเอตของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าสู่การกรองนาโนฟิลเตรชันแบบปิดตายที่ความดันคร่อมเมมเบรน (TMP) 4 ค่า คือ 10, 15, 20 และ 25 บาร์

ผลการทดลองพบว่า ฟลักซ์เพอร์มิเอตสัมพันธ์กับอัตราการไหลและ TMP อย่างมีนัยสำคัญ เมมเบรน PES100 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงสุดของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน สำหรับค่าการกักกันเซลล์และกลูโคส และเอทานอลของการกรองระดับ UF และ NF สัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่า MWCO ฟาล์วลิ่งแบบผันกลับบนฐานโมเดลเฮอร์เมียร์ให้ค่า R^2 สูงสุด สำหรับฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ (IF) พบว่าเมมเบรน PES100 ให้ค่า IF ต่ำที่สุด ณ อัตราการไหลต่ำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่ลดลง นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ค่า IF สัมพันธ์กับขนาดรูพรุนและ TMP

คำสำคัญ : ไฮโดรไลเซท อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน ฟาล์วลิ่ง

Thesis Title	Cellulase and Glucose Separation from Napier Grass Hydrolyzate by Ultrafiltration and Nanofiltration
Name - Surname	Miss Mintita Pichadpongwimut
Program	Chemical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Juraivan Rattanapisit, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Assistant Professor Thirawat Mueansichai, D.Eng.
Academic Year	2018

ABSTRACT

This research aimed to study the separation of cellulase enzymes using cross-flow filter ultrafiltration (UF) and rejection of reducing sugar with dead-end filter system nanofiltration (NF) from the Napier grass hydrolyzate. The experimental results were discussed in terms of permeate flux, percentage of rejection, Hermia fouling model and irreversible fouling.

The experiment consisted of 6 types of membranes with different molecular weight cut off (MWCO). For ultrafiltration, the studied membranes included PES0.2, PES500, PES100 and PES10. For nanofiltration, the studied membranes were NP010 and NP030. Experiments started from cross-flow ultrafiltration at three flow rates of 30, 50 and 75 ml /min. The permeates of all ultrafiltration processes were fed into the nanofiltration by dead-end filter of 4 trans membrane pressure (TMP) at 10, 15, 20 and 25 bars.

The results showed that the permeate flux was significantly related to the flow rate and TMP. The PES100 yielded the best flux for UF. Also the rejection of cellulase, glucose and ethanol in both UF and NF significantly depended on MWCO. Fouling by cake layer formation provided the highest R^2 based on the Hermia fouling model. The low flow rate of PES100 gave the lowest irreversible fouling (IF) and this related to the declining of the permeate flux. In addition, the IF was influenced by the MWCO and TMP with the higher flow rate.

Keywords: hydrolyzate, ultrafiltration, nanofiltration, fouling



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์แบบ ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ ของ ผศ.ดร.จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.ธีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วมที่เสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ดร.วีราภรณ์ ผิวสะอาด ประธานกรรมการสอบ ผศ.ดร.ศศิริดี จันทสี กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์ กรรมการสอบผู้ทรงคุณวุฒิจาก มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัยตลอด คำแนะนำ รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยเงินงบประมาณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และ สุดท่ายนี้ ขอขอบคุณและมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัวและพี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและ คุณครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้

มินชิตา พิเชฐพงศ์วิมุตติ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	11
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 หลักำเนิดเปียร์.....	15
2.2 จุลินทรีย์.....	15
2.3 กระบวนการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซต.....	17
2.4 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน.....	23
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	39
3.2 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการใช้งาน.....	40
3.3 การปรับสภาพหลักำเนิดเปียร์.....	43
3.4 การผลิตสารละลายไฮโดรไลเซต.....	44
3.5 การทดลองการกรอง.....	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	49
4.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน.....	49
4.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพเมมเบรนในการแยกสารละลายไฮโดรไลเซทภาพรวม.....	56
4.4 ประสิทธิภาพการกักกันสารละลายไฮโดรไลเซท.....	58
4.5 กลไกการเกิดฟอสล์ิ่งด้วยแบบจำลองเซอร์เมียร์.....	59
4.6 ฟอสล์ิ่งแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling, IF).....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	63
5.2 ผลข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	163



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ลักษณะของเมมเบรนและกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน.....	23
ตารางที่ 2.2	ระดับน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักไว้ไม่ให้ผ่านเมมเบรนต่างๆ.....	23
ตารางที่ 2.3	ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของโมเลกุลบางชนิด.....	24
ตารางที่ 2.4	ค่าคงที่ของแต่ละชนิดกลไลฟาล์ว.....	29
ตารางที่ 3.1	คุณลักษณะของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง.....	43
ตารางที่ 3.2	คุณลักษณะของเมมเบรนชนิดแผ่น.....	43
ตารางที่ 4.1	ค่าการกักกันของสารละลายไฮโดรไลเซท.....	59
ตารางที่ 4.2	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่อแบบจำลองเซอร์เมียร์.....	62



สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1.....	15
รูปที่ 2.2	ราไตรโคเดอร์มา รีลีสี.....	16
รูปที่ 2.3	ยีสต์แซคคาโรมายซิส ซีรีวิลีสี.....	16
รูปที่ 2.4	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสที่ประกอบโมเลกุลของกลูโคสและ เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก.....	17
รูปที่ 2.5	โครงสร้างไซเลน.....	18
รูปที่ 2.6	สูตรโครงสร้างของ (a) trans-coniferyl alcohol (b) trans-p-sinapyl alcohol และ (c) tran-p-coumaryl alcohol.....	18
รูปที่ 2.7	การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตรประเภท ต่างๆ.....	19
รูปที่ 2.8	การทำงานของเอนไซม์ย่อยสลายเซลลูโลส.....	22
รูปที่ 2.9	กระบวนการกรองแบบไหลขวางและปิดตาย.....	26
รูปที่ 2.10	complete blocking filtration model (CBM).....	29
รูปที่ 2.11	intermediate blocking filtration model (IBM).....	29
รูปที่ 2.12	standard blocking filtration model (SBM).....	30
รูปที่ 2.13	cake filtration model (CFM).....	31
รูปที่ 3.1	หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 ที่ผ่านการลดขนาด.....	39
รูปที่ 3.2	ผงจุลินทรีย์ผสม RT-P3.....	39
รูปที่ 3.3	แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบไหลขวาง.....	40
รูปที่ 3.4	ชุดการกรองแบบไหลขวาง.....	41
รูปที่ 3.5	แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบปิดตาย.....	42
รูปที่ 3.6	ชุดการกรองแบบปิดตาย.....	42
รูปที่ 3.7	ชุดเครื่องวิเคราะห์สเปคโตรโฟโตมิเตอร์.....	42
รูปที่ 3.8	เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซต.....	45
รูปที่ 3.9	สารละลายไฮโดรไลเซตก่อนและหลังเหวี่ยงแยก.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1	49
ฟลักซ์เพอร์มิเอตของสารละลายไฮโดรไลเซทที่เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.2 μm (PES0.2).....	
รูปที่ 4.2	50
ฟลักซ์เพอร์มิเอตของสารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง 500 kDa (PES500).....	
รูปที่ 4.3	50
ฟลักซ์เพอร์มิเอตของสารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง 100 kDa (PES100).....	
รูปที่ 4.4	51
ฟลักซ์เพอร์มิเอตของสารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง 10 kDa (PES10)	
รูปที่ 4.5	52
ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่อัตราการไหล 30 ml/min.....	
รูปที่ 4.6	53
ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่อัตราการไหล 50 ml/min.....	
รูปที่ 4.7	54
ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่อัตราการไหล 75 ml/min.....	
รูปที่ 4.8	55
ฟลักซ์สารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนชนิด NP010 ที่ความดัน 10, 15, 20 และ 25 bar.....	
รูปที่ 4.9	56
ฟลักซ์สารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนชนิด NP030 ที่ความดัน 10, 15, 20 และ 25 bar.....	
รูปที่ 4.10	57
ฟลักซ์เพอร์มิเอตสำหรับการกรองระดับไมโครและอัลตราฟิลเตรชันภาพรวม.....	
รูปที่ 4.11	58
ฟลักซ์เพอร์มิเอตสำหรับการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันภาพรวม.....	
รูปที่ 4.12	60
ฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน.....	
รูปที่ 4.13	61
ฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้ของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน.....	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการผลิตเอทานอลจากวัสดุเซลลูโลสอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและไม่ส่งผลกระทบต่อวงจรอาหารของมนุษย์ [1] แต่การใช้วัสดุเซลลูโลสยังมีข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเอนไซม์ เพราะเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในกระบวนการเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลมีราคาสูง โดยเฉพาะเอนไซม์บริสุทธิ์ และที่ผ่านมามีการใช้เอนไซม์มักเป็นแบบใช้แล้วทิ้ง ไม่มีการนำกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งถือว่าไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [2] จึงมีการนำเสนอวิธีการนำกลับเซลลูเลสต่างๆ เช่น วิธีการดูดซับ-คายซับของเอนไซม์ [3], การตรึงเอนไซม์เซลลูเลสบนแม่เหล็กอนุภาคนาโน [4], การใช้ไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน [5] และการกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันในระบบการกรองแบบปิดตาย [6] ซึ่งพบว่าหลายวิธีการนำกลับมีศักยภาพในการนำไปใช้งานได้

วัสดุลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยลิกนินอยู่ส่วนนอกสุดของโครงสร้างและเป็นตัวขัดขวางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาล ดังนั้นจึงต้องทำการกำจัดลิกนินโดยวิธีการปรับสภาพ [7] ดังนี้ การปรับสภาพทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์, การปรับสภาพทางกายภาพ เช่น การตัด และการรีด และการปรับสภาพทางเคมี เช่น การปรับสภาพด้วยกรดหรือเบส [8] ในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับสภาพโดยการตัดร่วมกับการปรับสภาพด้วยเบสเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถลดปริมาณลิกนินได้สูงภายในระยะเวลาอันสั้น และเลือกใช้หญ้าเนเปียร์เป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซท เพราะหญ้าเนเปียร์เป็นหญ้าที่เติบโตเร็ว ให้ผลผลิตต่อไร่สูง เก็บเกี่ยวต้นได้ตลอดทั้งปี และให้ปริมาณน้ำตาลและเอทานอลสูงเมื่อนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน [9] ดังนั้นงานวิจัยนี้นำหญ้าเนเปียร์ปรับสภาพด้วยเบส และทำการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซทด้วยการใช้จุลินทรีย์ผสมที่สามารถให้ผลผลิตคือ น้ำตาลและเอทานอลภายในขั้นตอนเดียว จากนั้นสารละลายไฮโดรไลเซทที่ได้จะนำเข้ามาสู่กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนต่อไป

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมีจุดเด่นด้านการใช้พลังงานต่ำ สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนไหวต่อความร้อน และทำให้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นขึ้น จึงเป็นการแยกและทำให้บริสุทธิ์ได้

พร้อมกัน กระบวนการนี้สามารถจำแนกได้ตามน้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้นได้หลายระดับและหนึ่งในนั้นคือ ระดับไมโครฟิลเตรชัน, อัลตราฟิลเตรชัน (เหมาะสำหรับใช้แยกจุลินทรีย์, แบคทีเรีย, คอลลอยด์ และโปรตีน) และนาโนฟิลเตรชัน (เหมาะสำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาล) โดยกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคหรือตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1,000-500,000 ดัลตัน สามารถดำเนินการได้ในสภาวะอุณหภูมิห้องและที่ความดันไม่สูงมาก [10] จึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจในการแยกเซลล์ออกจากส่วนละลายไฮโดรไลเซท เพื่อนำเซลล์กลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากเมมเบรนระดับนี้มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักโมเลกุลเซลล์

การใช้เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน (NF) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ถือเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจากในกระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอลใช้ยีสต์เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล ปริมาณยีสต์และความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่มากพอมีผลต่อปริมาณเอทานอลและคุณภาพของเอทานอล [11] ซึ่งหลังจากกระบวนการแยกเซลล์ในระดับอัลตราฟิลเตรชันจะได้สารละลายที่ประกอบไปด้วย น้ำตาลรีดิวซ์, สารละลายและเซลล์บางส่วนที่ลอดผ่านเมมเบรนออกมา [12] ถ้าหากทำการกรองสารละลายดังกล่าวในขั้นที่สองโดยใช้เมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองที่เล็กลง (นาโนฟิลเตรชัน) จะสามารถแยกน้ำตาลรีดิวซ์ออกจากสารละลายได้ และหลังจากกระบวนการแยกจะได้น้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงพร้อมที่จะเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลกับสารละลายที่สามารถนำกลับเข้ามาสู่ในกระบวนการหมักตอนเริ่มต้นได้อีกครั้ง [13] อย่างไรก็ตามกระบวนการเมมเบรนยังมีข้อจำกัดของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและฟาล์วลิ้ง ทำให้ ฟลักซ์มีค่าลดลง ปัญหานี้สามารถบรรเทาได้หากเข้าใจกลไกฟาล์วลิ้ง ซึ่งแบบจำลองเฮอร์เมียร์ถูกนำมาใช้เพื่อหาชนิดฟาล์วลิ้งของระบบ การปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินการมีผลฟาล์วลิ้งแบบผันกลับได้ ในขณะที่ฟาล์วลิ้งแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling) เกิดจากการอุดตันของอนุภาคทั้งภายในและภายนอกของรูพรุน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถกำจัดออกได้โดยการล้างด้วยสารเคมี [14]

ถึงแม้ว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกเซลล์ด้วยเมมเบรน แต่กระบวนการที่ใช้ระบบการกรองต่อเนื่องแบบไหลขวาง ยังไม่มีผลการศึกษามากนัก อีกทั้งการศึกษากักกันน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ในขั้นตอนที่ 2 นั้นก็มีการศึกษาอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษากลไกฟาล์วลิ้งจากสารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนทั้ง UF และ NF

ที่มีอยู่น้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาฟลักซ์เพอร์มิเอตและความสามารถการกักกันของ เซลลูเลส น้ำตาลรีดิซ และ เอทานอล โดยมีขนาดรูพรุนเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกันทั้งระดับ ไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งจะถูกดำเนินการด้วยชุดเครื่องมือแบบไหลขวางที่อัตราการ ไหลของสารป้อนต่างกัน และการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันดำเนินการด้วยชุดเครื่องมือแบบปิดตาย ที่ความดันของระบบต่างกัน รวมทั้งศึกษาการลดลงของฟลักซ์เพอร์มิเอตเทียบกับเวลา เพื่อหากลไก ฟาล์วลิ่งด้วยแบบจำลองเฮอร์เมียร์และฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ โดยใช้สารละลายไฮโดรไลเซทจาก หญ้าเนเปียร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาสภาวะการแยกเอนไซม์เซลลูเลสด้วยเมมเบรนเกรดการค้าระดับ ไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันด้วยระบบการกรองแบบไหลขวาง ณ ความอัตราการไหลต่างๆ และนาโนฟิลเตรชันด้วยระบบการกรองแบบปิดตาย ณ ความดันต่างๆ บนฐานของค่าฟลักซ์และ ความสามารถการกักกัน

1.2.2 วิเคราะห์กลไกการเกิดฟาล์วลิ่งจากกระบวนการเมมเบรนด้วยแบบจำลองเฮอร์เมียร์ และวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เตรียมสารละลายป้อนของการกรองด้วยเมมเบรน โดยผลิตสารละลายไฮโดรไลเซท จากหญ้าเนเปียร์ สภาวะการผลิตอ้างอิงจากงานวิจัยของรุ่งตะวัน ศรีวิเศษและคณะ [15]

1.3.2 ทำการทดลองการกรองระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันด้วยชุดกรอง แบบไหลขวางและใช้เมมเบรนเกรดการค้า โดยศึกษาขนาดรูพรุนเมมเบรน 4 ขนาด (PES0.2, PES500, PES100, PES10) และอัตราการไหล 3 ค่า (30, 50, 75 ml/min)

1.3.3 ทำการทดลองการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันด้วยชุดกรองแบบปิดตาย และใช้ เมมเบรนเกรดการค้า โดยศึกษาขนาดรูพรุนเมมเบรน 2 ขนาด (NP030, NP010) และความดันคร่อม เมมเบรน 4 ค่า (10, 15, 20, 25 bar)

1.3.4 ประเมินการลดลงของฟลักซ์และความสามารถการกักกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ต่อการทำงาน

1.3.5 วิเคราะห์กลไกฟาล์วของกระบวนการเมมเบรน โดยใช้แบบจำลองเฮอเมียร์ และวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาล์วแบบผันกลับไม่ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รับความรู้ด้านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนแยกจุลินทรีย์ผสมเพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการหมัก

1.4.2 เป็นทางเลือกต่อการพัฒนาการแยกผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม

1.4.3 เป็นพื้นฐานข้อมูลเพื่อพัฒนาชุดกรอง เพื่อเพิ่มคุณภาพการแยก, ค่าฟลักซ์ และลดการเกิดฟาล์ว เพื่อนำไปพัฒนาสร้างเครื่องมือต้นแบบ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์เป็นหญ้าอาหารสัตว์ที่นิยมปลูกมาก เนื่องจากลำต้นและใบมีขนาดใหญ่ คุณค่าทางอาหารสัตว์สูง สามารถเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตต่อไร่สูง และเก็บเกี่ยวได้ตลอดทั้งปี หญ้าชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดในแถบประเทศของแอฟริกา ปัจจุบันพบการปลูกแพร่กระจายทั่วโลกในแถบประเทศอบอุ่น มีหลากหลายสายพันธุ์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 แสดงดังรูป 2.1 เพราะเป็นหญ้าที่นิยมปลูกและเจริญเติบโตได้ดีในแถบทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีประโยชน์หลากหลาย เช่น ใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยเฉพาะโคเนื้อ โคนม และกระบือ, ใช้เป็นชีวมวลสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า, ใช้ปลูกเป็นพืชคลุมดิน, เป็นวัตถุดิบผลิตกระดาษ เป็นต้น [16]

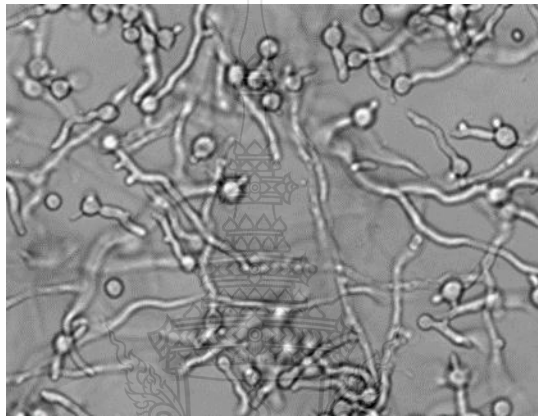


รูปที่ 2.1 หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 [16]

2.2 จุลินทรีย์

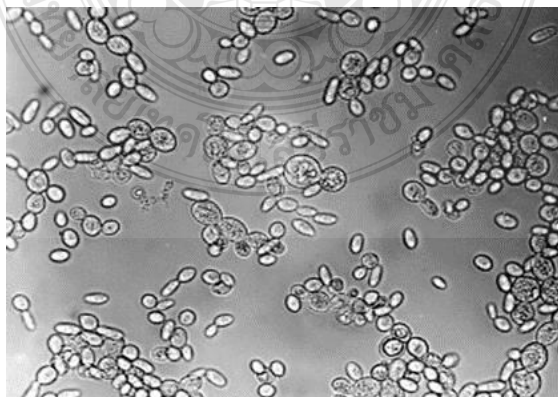
จุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นจุลินทรีย์ผสมระหว่างจุลินทรีย์ราไตรโคเดอร์มา รีลีสอี (*Trichoderma reesii*) ที่มีความสามารถในการย่อยสลายเส้นใยพืชให้ได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และยีสต์แซคคาโรมายซิส ซีรีวีลีสอี (*Saccharomyces cerevisiae*) มีความสามารถในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล คุณสมบัติของไตรโคเดอร์มา รีลีสอี และแซคคาโรมายซิส ซีรีวีลีสอี มีดังนี้

2.2.1 ไตรโคเดอร์มา รีลีอี เป็นเชื้อราที่มีความสามารถในการหลั่งเอนไซม์สำหรับย่อยเซลลูโลสจำนวนมาก ตัวอย่างเอนไซม์กลุ่มนี้ ได้แก่ เซลลูเลส, เฮมิเซลลูเลส เป็นต้น เอนไซม์ชนิดนี้ใช้ในการย่อยเส้นใยของพืชไปเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือโมโนแซคคาไรด์ ในภาคอุตสาหกรรมเชื้อราชนิดนี้สามารถนำมาใช้โดยให้มันหลั่งเอนไซม์ แล้วนำเอนไซม์นั้นมาทำให้บริสุทธิ์ จากนั้นเติมลงในน้ำหมักเซลลูโลส (เปลือกไม้ เศษหนังสือพิมพ์ หญ้า ฯลฯ) เพื่อผลิตน้ำตาล แล้วจึงใช้ยีสต์มาหมักเพื่อให้เกิดแอลกอฮอล์ต่อไป



รูปที่ 2.2 ราไตรโคเดอร์มา รีลีอี [17]

2.2.2 แซคคาโรมายซิส สิริวิลีอี เป็นยีสต์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก เพื่อทำการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล จุลินทรีย์ชนิดนี้มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว, สามารถทนต่อเอทานอล และมีการใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อการหมัก (fermentation) เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น เบียร์ ไวน์ ใช้เป็นสารให้ขึ้นฟู ในขนมปัง และใช้ผลิตสารสกัดจากยีสต์ (yeast extract)



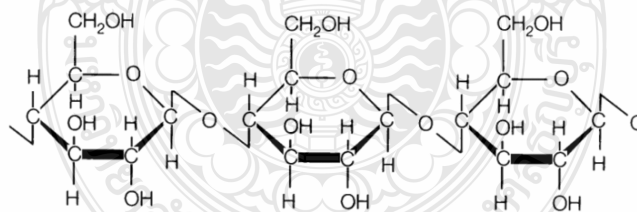
รูปที่ 2.3 ยีสต์แซคคาโรมายซิส สิริวิลีอี [18]

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เชื้อจุลินทรีย์ผสม RT-P3 ที่ได้มาจากเชื้อราไตรโคเดอร์มา ริลีสอี RT-P1 (*T.reesei* RT-P1) และยีสต์แซคคาโรมายซีส RT-P2 (*S.cerevisiae* RT-P2) ที่ผ่านกระบวนการหมักแข็งและอบแห้งได้ผลิตภัณฑ์คือผงจุลินทรีย์ผสม RT-P3 ทั้งนี้เพราะเชื้อจุลินทรีย์ผสมชนิดนี้สามารถทำการหมักได้เสร็จภายในขั้นตอนเดียว คือ สามารถผลิตทั้งน้ำตาลและเอทานอลได้ในการหมักเพียงครั้งเดียว

2.3 กระบวนการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซท

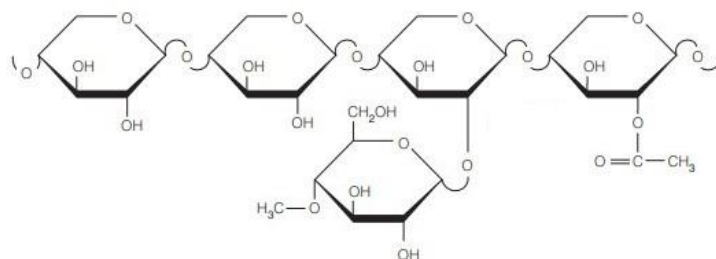
2.3.1 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต ในกลุ่มลิกโนเซลลูโลสซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส 40-60%, เฮมิเซลลูโลส 20-30% และลิกนิน 15-30% คุณลักษณะของแต่ละองค์ประกอบมีดังนี้

2.3.1.1 เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ของพืช อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ปริมาณที่พบแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ เบต้า-D-กลูโคไพราโนส (β -D-Glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก (β -1,4-glycosidic bond) เกิดเป็นโพลิเมอร์กลูแคน (glucan) มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย โดยทั่วไปในธรรมชาติพบเซลลูโลส 2 แบบ คือ ผลึกเซลลูโลสและอสัณฐานเซลลูโลส โดยส่วนของผลึกเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ยากกว่าอสัณฐานเซลลูโลส สำหรับโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส แสดงในรูปที่ 2.4



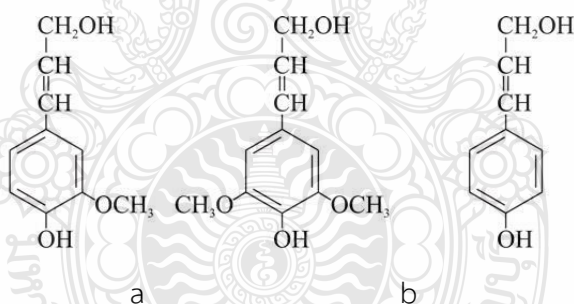
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสที่ประกอบโมเลกุลของกลูโคสและเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก [19]

2.3.1.2 เฮมิเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ของน้ำตาลชนิดต่างๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ไซโลส และอะราบินอส ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน แมนแนน กาแลกแตน และอะราบินแนน มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของไซแลน แสดงในรูปที่ 2.5



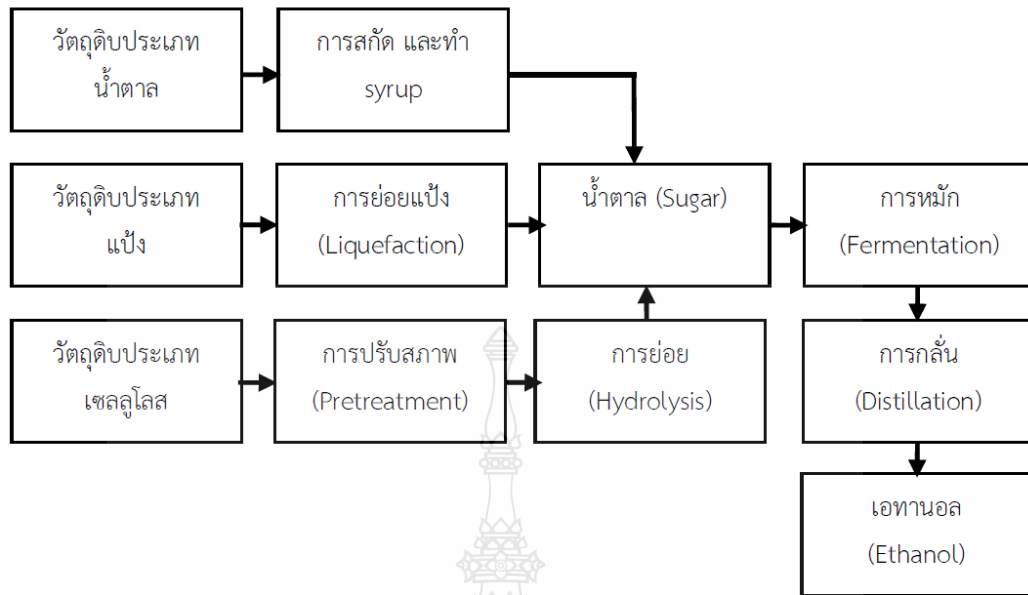
รูปที่ 2.5 โครงสร้างไซแลน [19]

2.3.1.3 ลิกนิน เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช พบในปริมาณที่แตกต่างไปตามชนิดของพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลล์ไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ลิกนินเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ไม่แตกสีก ประกอบด้วย สารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด ประกอบด้วย *trans-p-coumaryl alcohol*, *trans-coniferyl alcohol* และ *trans-p-sinapyl alcohol* นอกจากนี้ โมเลกุลของลิกนินยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่น เช่น *vanillin* และ *syringaldehyde* สูตรโครงสร้างของ *trans-p-coumaryl alcohol*, *trans-coniferyl alcohol* และ *trans-p-sinapyl alcohol* แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของ (a) *trans-coniferyl alcohol* (b) *trans-p-sinapyl alcohol* และ (c) *trans-p-coumaryl alcohol* [19]

2.3.2 การเปลี่ยนวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสไปเป็นเอทานอล มีขั้นตอนที่ค่อนข้างยุ่งยาก ซับซ้อนมากกว่าการใช้วัตถุดิบกลุ่มน้ำตาลและแป้ง โดยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การปรับสภาพวัตถุดิบ (pretreatment) การย่อยวัตถุดิบหรือไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการหมัก (fermentation) ดังแสดงรายละเอียดขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทต่าง ๆ ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตรประเภทต่างๆ [19]

2.3.2.1 การปรับสภาพวัตถุดิบ การปรับสภาพวัตถุดิบมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดลิกนินซึ่งมีสมบัติไปห่อหุ้มหรือเคลือบ โครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินจึงเป็นเหมือนผนังป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดรูพรุนของตัววัตถุดิบและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส (cellulose crystallinity) ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับใช้เอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลส กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ ดังนี้

1) การปรับสภาพทางกายภาพ (physical pretreatment) การใช้เครื่องมือหรือเครื่องจักรในการหั่นสับ และบด (mechanical comminution) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและลดขนาดอนุภาคของลิกโนเซลลูโลส นอกจากนี้ยังเป็นการลดผลึกของเซลลูโลสด้วย โดยทั่วไปควรลดขนาดวัตถุดิบหลังจากหั่นแล้วให้มีขนาดประมาณ 1-3 cm และให้มีขนาด 0.2-2 mm หลังจากการบดละเอียดแล้ว พลังงานที่ต้องใช้ในการบดวัตถุดิบขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของชีวมวลที่ต้องการ โดยส่วนใหญ่วิธีการปรับสภาพทางกายภาพจะใช้ร่วมกับกระบวนการปรับสภาพอื่นๆด้วย

2) การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี (physicochemical pretreatment) ได้แก่ การระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion) ชีวมวลที่ผ่านการหั่นและบดแล้วจะถูก

ปรับสภาพต่อด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันสูง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยส่วนใหญ่จะควบคุม อุณหภูมิที่ 160-260 °C ที่ความดัน 0.69-4.83 MPa วัระยะหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลงให้เหลือ เท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและการเปลี่ยนรูปลิกนิน เนื่องจากอุณหภูมิสูงและเป็นการเพิ่มศักย์ภาพในการย่อยเซลลูโลสด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดด้วย ไอน้ำ ได้แก่ ระยะเวลา อุณหภูมิ และขนาดของชิ้นชีวมวล ข้อดีของการปรับสภาพด้วยวิธีนี้ คือใช้ พลังงานต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบดด้วยเครื่องจักรเพียงอย่างเดียวอย่างเดียวนั้น มีความคุ้มค่าเมื่อใช้ในการปรับสภาพไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แต่มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้กับไม้เนื้ออ่อน ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ การทำลายส่วนประกอบของไซแลน ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่พบอยู่ในผนัง เซลล์ของพืชและก่อให้เกิดสารองค์ประกอบที่อาจไปขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ใน กระบวนการต่อจากนี้

3) การปรับสภาพทางเคมี ได้แก่ การปรับสภาพด้วยโอโซน (ozonolysis) โอโซนสามารถย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสได้ เช่น ฟางข้าวสาทิ ชานอ้อย หญ้า พืชถั่ว ไม้สน ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่ดีสามารถละลายน้ำได้ สามารถเข้าไปแตกโครงสร้างของลิกนินและปลดปล่อยสารประกอบที่ละลายน้ำได้และมีน้ำหนัก โมเลกุลน้อย เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ประสิทธิภาพการย่อยสลายชีวมวลด้วยเอนไซม์จะเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยโอโซน ข้อดีของการปรับสภาพด้วยวิธีนี้คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน, ไม่ผลิตสารตกค้างที่เป็นพิษต่อกระบวนการต่อไป และปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้ ภายใต้อุณหภูมิและความดันห้อง อย่างไรก็ตาม ต้องใช้โอโซนปริมาณมากในกระบวนการ ปรับสภาพทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง สำหรับการปรับสภาพด้วยกรด (acid hydrolysis) กรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเดิมเคยใช้กรดเข้มข้นในการย่อยลิกโนเซลลูโลส แต่เนื่องจาก กรดเข้มข้นมีฤทธิ์กัดกร่อน มีความเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องใช้ถึง ปฏิกิริยาที่ทนทานต่อการกัดกร่อนและมีค่าใช้จ่ายในการคืนสภาพของกรดนั้นสูงมาก ดังนั้นจึงใช้การ เจือจางกรดใน การปรับสภาพและพบว่าเมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อย เซลลูโลสได้ การปรับสภาพด้วยการเจือจางกรดแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ การเจือจางกรดที่อุณหภูมิสูง (> 160 °C) และการเจือจางกรดที่อุณหภูมิต่ำ (< 160 °C) ถึงแม้ว่าการปรับสภาพด้วยกรดจะสามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้ แต่ถ้าพิจารณาในเรื่องค่าใช้จ่ายพบว่าค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการปรับ สภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี นอกจากนี้จำเป็นต้องปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนหลังจากทำการปรับ สภาพ เพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นต่อไป สำหรับการปรับสภาพด้วยค่า

(alkaline hydrolysis) โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาวเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการปรับสภาพด้วยด่าง ซึ่งด่างเหล่านี้สามารถแตกโครงสร้างของลิกนินและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส การปรับสภาพด้วยด่างเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ต้องใช้พลังงานมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับสภาพด้วยกรด การกำจัดลิกนินโดยการออกซิเดชัน (oxidative delignification) การปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในขั้นต่อไปได้

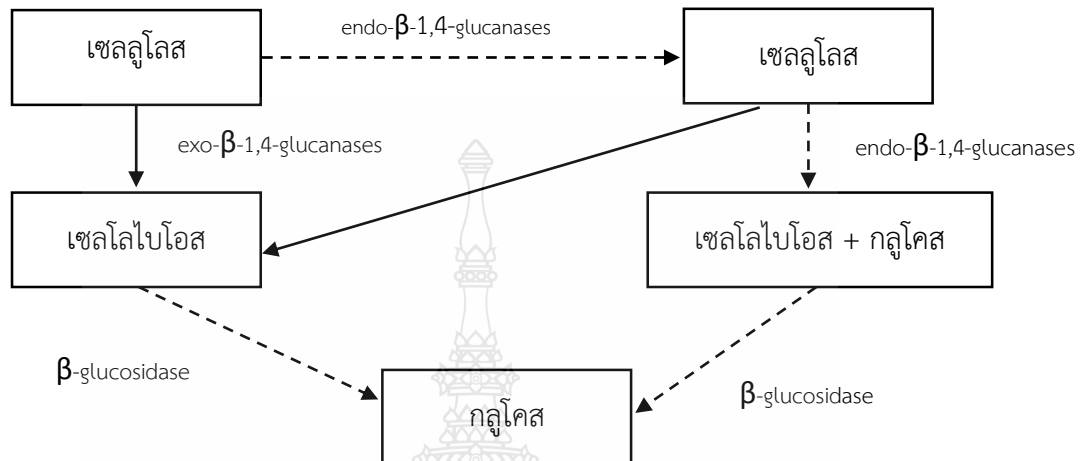
4) การปรับสภาพทางชีวภาพ เป็นการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส เช่น เชื้อราสีน้ำตาล, เชื้อราสีขาว ข้อดีของกระบวนการนี้คือใช้พลังงานน้อย ไม่ใช้สารเคมีในกระบวนการทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไรก็ตาม อัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำทำให้ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายและใช้พื้นที่ในการผลิตมาก

2.3.2.2 การย่อยหรือไฮโดรไลซิส เป็นขั้นตอนสำคัญในการเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว การไฮโดรไลซิสทำได้หลายวิธีคือ

1) การไฮโดรไลซิสด้วยสารเคมี (chemical hydrolysis) คือการนำวัสดุลิกนินเซลลูโลสมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีโดยใช้เวลาที่อุณหภูมิเฉพาะเพื่อให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากสายโซ่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ในกระบวนการย่อยสลายด้วยสารเคมีนี้อาจจะเป็นการปรับสภาพเบื้องต้นควบคู่กับการย่อยในขั้นตอนเดียว ส่วนมากใช้กรดซึ่งอาจเป็นกรดเจือจางหรือเข้มข้น

2) การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (enzymatic hydrolysis) สามารถนำมาใช้ย่อยสลายเซลลูโลสให้ได้น้ำตาลกลูโคสได้ดีกว่าการย่อยสลายด้วยกรด ถึงแม้การย่อยสลายด้วยเอนไซม์เกิดขึ้นได้อย่างช้าๆ เพราะปัจจัยโครงสร้างของสับสเตรทที่เป็นอุปสรรคขัดขวางการเข้าถึงของเอนไซม์ ได้แก่ ปริมาณของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส พื้นที่ผิวและความเป็นผลึกของเซลลูโลส ต้นทุนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรดหรือด่าง เพราะการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ใช้สภาวะอ่อน ไม่รุนแรง (pH 4.8) และอุณหภูมิไม่สูงมากนัก (318-323 °K) และไม่มีปัญหาการกัดกร่อน ผลการได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์สูง (75-85%) และมีการพัฒนางานวิจัยอย่างต่อเนื่อง การย่อยสลายด้วยเอนไซม์มีเป้าหมายคือสลายพันธะพอลิเมอร์ของพอลิแซคคาไรด์ในน้ำที่มีอยู่ในส่วนของแข็งที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากการปรับสภาพเบื้องต้น ผลิตภัณฑ์พอลิแซคคาไรด์ที่ได้ส่วนใหญ่หลังจากการปรับสภาพเบื้องต้น คือ เซลลูโลส เอนไซม์ที่สามารถย่อยเซลลูโลสแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ endo- β -1,4-glucanases เข้าไปจับส่วนในของสายโซ่เซลลูโลส, exo- β -1,4-glucanases เข้าไปจับส่วนปลายสุดของสายโซ่พอลิเมอร์ แตกพันธะสายโซ่ปลดปล่อยเซลโลไบโอส

และ เบต้า-กลูโคสิดีส หรือเซลโลไบโอเอส เข้าไปย่อยเซลโลไบโอสได้เป็นกลูโคสสองโมเลกุล แสดง
 ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 การทำงานของเอนไซม์ย่อยสลายเซลลูโลส [20]

การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ เซลลูโลสถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ เรียกว่าเซลลูเลสเอนไซม์เหล่านี้ได้จากจุลินทรีย์หลายสายพันธุ์ ได้แก่ แบคทีเรียและรา ซึ่งมีทั้งสายพันธุ์ที่ต้องการอากาศหรือไม่ต้องการอากาศ ทนอุณหภูมิปานกลางหรือสูง แบคทีเรียที่ผลิตเซลลูเลสอย่างมีประสิทธิภาพ คือ *Clostridium*, *Bacillus*, *Thermomonospora*, *Ruminococcus*, *Bacteriodes*, *Erwinia*, *Acetovibrio*, *Microbispora*, และ *Streptomyces* ส่วนราที่นำมาใช้ผลิตเซลลูเลส ได้แก่ *Sclerotium rolfsii*, *P.chrysosporium*, และ สายพันธุ์ของ *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Schizophyllum* และ *Penicillium* ราสายพันธุ์ไตรโคเดอร์มาถูกทำให้กลายเป็นพันธุ์ (*T. viride*, *T. reesei*, *T. longibrachiatum*) ได้รับการยอมรับว่าสามารถทำลายเซลลูโลสผลึกได้ดี ผลิตภัณฑ์เซลลูเลสทางการค้าแยกมาจากไตรโคเดอร์มา วิธีที่ถูกใช้มานานตั้งแต่อดีตในอาหารสัตว์พืช อุตสาหกรรมเหล้า เบียร์ ผลไม้และผัก ปัจจุบันได้นำมาใช้ผลิตเอทานอลชีวภาพ *T. reesei* ผลิตเอนไซม์ได้ในปริมาณสูงถึง 100 g/L

2.3.2.3 การหมัก การหมักเอทานอลจากกลีโคเซลลูโลส น้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสหรือการย่อยสลายเซลลูโลสคือโมเลกุลน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (hexose) ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส (glucose), แมนโนส (mannose), กาแลคโทส (galactose) และ โมเลกุลน้ำตาลคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ น้ำตาลเพนโทส (pentose) ไซโลส (xylose) และอะราบินโนส (arabinose) ผสมกันอยู่

ในสารยับยั้ง ได้แก่ กรดอ่อน ฟอรั่มัลดีไฮด์ และฟีนอลิก ยีสต์ขนมปังแซคคาโรมายซิส สิริวิชิอิ ใช้ในการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลเหล่านี้

2.4 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมีจุดเด่นสำคัญในแง่ใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้น (ยกเว้นกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน ซึ่งใช้วิธีการลดความดันทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส) จึงไม่ต้องการความร้อนเพื่อการเปลี่ยนเฟส นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการแยกผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียสมบัติหรือสภาพได้เมื่อได้รับความร้อนเนื่องจากกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนส่วนใหญ่ดำเนินการที่สภาวะปกติ (อุณหภูมิห้อง) เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นขึ้น แยกลำดับส่วน และทำให้บริสุทธิ์ได้พร้อมกัน โดยประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนสามารถจำแนกตามลักษณะของเมมเบรนและกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของเมมเบรนและกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน [21]

กระบวนการ	ขนาดรู (Å)	กลไกการแยก	แรงขับ
ไมโครฟิลเตรชัน	500-20,000	การคัดขนาด	ความดัน
อัลตราฟิลเตรชัน	30-1000	การคัดขนาด	ความดัน
นาโนฟิลเตรชัน	10-50	การคัดขนาด	ความดัน
เพอร์เวปอเรชัน	< 5	การละลาย-การแพร่	ความดันย่อย
แยกแก๊สด้วยเมมเบรน	< 5	การละลาย-การแพร่	ความดันย่อย
ออสโมซิสผันกลับ	5-20	การคัดขนาด	ความดัน
	< 5	การละลาย-การแพร่	

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษากระบวนการแยกด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน, อัลตราฟิลเตรชัน และนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งทั้ง 3 ประเภทนี้สามารถจำแนกตามน้ำหนักโมเลกุลได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ระดับน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักไว้ไม่ให้ผ่านเมมเบรนต่างๆ [21]

ประเภทของเมมเบรน	ขนาดอนุภาค (μm)	น้ำหนักโมเลกุล (Da)
ไมโครฟิลเตรชัน	> 0.1	> 500,000
อัลตราฟิลเตรชัน	0.01-0.1	1,000-500,000
นาโนฟิลเตรชัน	0.001-0.01	100-1,000

2.4.1 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการเพื่อแยกอนุภาคคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยในช่วง 500-20,000 Å แสดงดังตาราง 2.1 ออกจากของเหลวหรือแก๊ส โดยเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบ่งออกเป็น 2 แบบตามลักษณะโครงสร้างของรู คือ screen filter และ depth filter โดย screen filter มีโครงสร้างรูเป็นทรงกระบอกตรง มีกลไกการกักอนุภาค คือ อนุภาคที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดรูของ screen filter จะถูกกักไว้โดยตรงบนผิวหน้าของเมมเบรน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูของเมมเบรนสามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ถ้าไม่มีการอัดติดเนื่องจากความเฉื่อย (inertial impaction) และการซึม (diffusion) บนผนังรู แต่ depth filter มีโครงสร้างของรูบิดไปบิดมา มีกลไกการกักอนุภาคคือ การดูดซับ (adsorption) และการดักติด (entrapment) อนุภาคส่วนใหญ่ถูกจับไว้อยู่ภายในซอกของเมมเบรนยกเว้นอนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากความสามารถในการกักอนุภาคของ depth filter ขึ้นอยู่กับความคลเคลี้ยวของเส้นทางการไหล เมมเบรนแบบนี้จึงสามารถกักอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่ารูที่คิดได้ด้วย นอกจากนี้ depth filter ยังมีพื้นที่ผิวใช้ประโยชน์ได้ (available surface area) มากกว่า screen filter อย่างมาก ดังนั้น depth filter จึงสามารถกักอนุภาคไว้เป็นปริมาณมากกว่า screen filter และมีตำแหน่งให้โปรตีนและไวรัสยึดเหนี่ยวเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามในแง่ของอัตราการไหลจากเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันทั้งสองแบบมีค่าเท่ากันโดยประมาณถึงแม้ว่า depth membrane จะมีรูเปิดมากกว่าแต่ screen membrane มีความบางกว่า[8] การประยุกต์การใช้งานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เนื่องจากมีขนาดรูใหญ่สุดในบรรดากระบวนการแยกด้วยเมมเบรนจึงมักใช้แยกโปรตีนขนาดใหญ่ แยกจุลินทรีย์ทั้งไวรัส แบคทีเรีย และประเภทอื่นๆ ในการผลิตโปรตีนสังเคราะห์ ใช้กรองเบียร์หรือไวน์ แยกของแข็งแขวนลอยที่เป็นสาเหตุของความขุ่นในน้ำ เป็นต้น ตารางที่ 2.3 เห็นได้ว่าเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสามารถกักคอลลอยด์ หรือแบคทีเรีย หรือยีสต์และเราได้สมบูรณ์ แต่ไม่สามารถกักโปรตีนหรือพอลิแซ็กคาไรด์บางชนิดได้ [21]

ตารางที่ 2.3 ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของโมเลกุลบางชนิด [21]

ชนิดของโมเลกุล	ขนาด (nm)	น้ำหนักโมเลกุล
ยีสต์และรา	1,000-10,000	-
แบคทีเรีย	300-10,000	-
คอลลอยด์	100-1,000	-
โปรตีน/พอลิแซ็กคาไรด์	2-10	10^4 - 10^6
เอ็นไซม์	2-5	10^4 - 10^5
สารอินทรีย์	0.3-0.8	30-500
ไฮออนอนินทรีย์	0.2-0.4	10-100
น้ำ	0.2	18

2.4.2 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูบนเมมเบรนในช่วง 30-1,000 Å แสดงดังตาราง 2.1 ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้เพื่อแยกอนุภาคหรือตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 1,000-500,000 ดัลตัน ไม่ให้ผ่านเมมเบรนออกไป โดยสามารถทำงานที่ความดันในช่วง 2-10 บาร์ เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันมักทำให้มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร โดยมีขนาดรู 30-400 อังสตรอม อยู่ที่ผิวหน้าเพียง 0.1-1.5 ไมครอน ส่วนขนาดรูของชั้นรองรับมีขนาดใหญ่กว่าชั้นผิวอย่างมาก อนุภาคที่สามารถผ่านรูขนาดเล็กที่ชั้นผิวไปได้ก็จะผ่านรูชั้นรองรับไปได้โดยง่าย การประยุกต์ใช้งานเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันได้แก่ การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียของอิมัลชันน้ำมัน การแยกหางนมออกจากนมเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของนมในอุตสาหกรรมทำนม การเพิ่มความเข้มข้นของแมคโครโมเลกุลชีวภาพ การแยกโมเลกุลสีเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ การเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนที่สูญเสียสมบัติเมื่อได้รับความร้อนในสารเติมแต่งอาหาร และการแยกโปรตีน จากพืช หรือแพลงก์ตอน เป็นต้น [21]

2.4.3 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน การกรองในระดับนาโนฟิลเตรชันมีลักษณะพื้นฐานส่วนใหญ่คล้ายกับ 2 แบบข้างต้น แต่ต่างกันที่ขนาดรูพรุนของเมมเบรนซึ่งจะอยู่ในช่วง 10^{-3} - 10^{-2} ไมโครเมตร โดยความดันที่เหมาะสมอยู่ที่ช่วง 20-40 bar มีความสามารถในการแยกอออนบางชนิดและสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ ชนิดของเมมเบรนที่ใช้กัน โดยทั่วไป เช่น polyvinyl alcohol เป็นต้น เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันส่วนมากเป็นเยื่อกรองเชิงประกอบ ซึ่งประกอบด้วยชั้นผิวที่มีโครงสร้าง

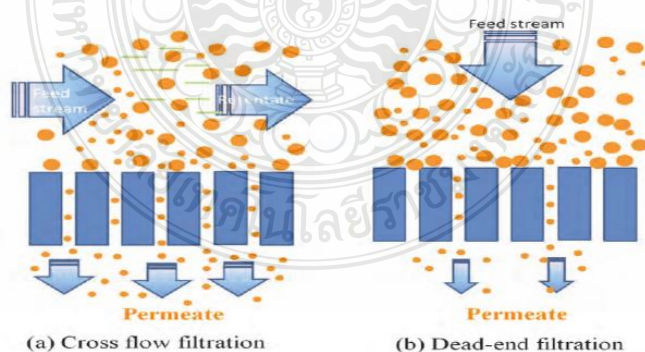
แน่นอยู่บนชั้นรองรับที่มีรูพรุนใหญ่กว่าความสามารถในการกักกันเกลือประจุเดี่ยว (เช่น NaCl) ต่ำกว่าเมมเบรนออสโมซิสผันกลับได้ การประยุกต์การใช้งานนาโนฟิลเตรชัน ได้แก่ ทำน้ำอ่อน (water softening) เนื่องจากกำจัดไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมได้ ทำน้ำตาลให้เข้มข้นขึ้นในอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันสามารถทำให้น้ำเชื่อมเข้มข้นขึ้นจาก 12 Brix เป็น 30 Brix แยกสารอินทรีย์ในอุตสาหกรรมอาหารและเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น

2.4.4 ลักษณะการดำเนินการกรอง

กระบวนการกรองสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทขึ้นกับเกณฑ์พิจารณา ซึ่งหากใช้เกณฑ์การพิจารณาเป็นลักษณะการไหลของสารป้อน จะแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การกรองแบบปิดตาย (dead-end filtration) และการกรองแบบไหลขวาง (crossflow filtration)

2.4.4.1 การกรองแบบปิดตาย เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางตั้งฉากกับเมมเบรน ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวหน้าของเมมเบรน เรียกว่า เค้ก (cake) ที่ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ (flux) ลดลงทันทีและมีค่าความต้านทานของการกรองเพิ่มขึ้น การกรองแบบนี้จะเหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นไม่มากนัก หรืออาจใช้ในการแยกสารละลายในปริมาณน้อยเพื่อการวิเคราะห์

2.4.4.2 การกรองแบบไหลขวาง เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางขนานกับเมมเบรน หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอร์มิเอต การกรองแบบไหลขวางสามารถลดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ มีความเหมาะสมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง และนิยมใช้กันมากในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถลดความเข้มข้นสะสมหรือโพลาริเซชันความเข้มข้น (concentration polarization) และการเกิดเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน และใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมาก



รูปที่ 2.9 กระบวนการกรองแบบไหลขวางและปิดตาย [22]

2.4.5 ฟลักซ์และความสามารถในการแยก

ประสิทธิภาพกระบวนการเมมเบรนขึ้นกับลักษณะสมบัติของเมมเบรน การระบุลักษณะของเมมเบรนชนิดมีรูพรุนทั้งเมมเบรนไมโครและอัลตราฟิลเตรชัน มักแสดงในทอมของฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน (trans-membrane flux) ขนาดรูพรุน การกระจายขนาดรู และค่าน้ำหนักโมเลกุลตัด (molecular weight cutoff, MWCO) สมบัติความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ ความแข็งแรงเชิงกล เสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน และการทำความสะอาด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการหาฟลักซ์ที่ผ่าน เมมเบรน ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของเมมเบรน และค่าการกักกัน (rejection)

การหาฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน โดยปกติทดสอบที่ค่าความดันต่างๆ กับน้ำสะอาดเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการอุดตันของรู ฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนมักลดลงตามระยะเวลาที่ดำเนินการทดสอบ เนื่องจากเกิดการอัดตัว (compaction) ของโครงสร้างเมมเบรนภายใต้แรงดัน หน่วยของฟลักซ์มีได้หลายแบบ เช่น ฟลักซ์เชิงปริมาตรมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา ฟลักซ์เชิงโมลมีหน่วยเป็น โมลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา ฟลักซ์เชิงมวลมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา เป็นต้น โดยพื้นที่ที่ใช้คำนวณ คือพื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับความหนาของเมมเบรน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือตั้งฉากกับทิศทางการไหล [23] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$J = \frac{Q}{A\Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ J = ฟลักซ์เพอร์มิเอต
 Q = ปริมาณเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน
 A = พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล
 Δt = เวลาที่เก็บเพอร์มิเอต

สำหรับองค์ประกอบที่ต้องการแยกออกจากสารละลายคือโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ ซึ่งอาจนำส่วนนี้มาใช้ประโยชน์ใหม่ เช่น โมเลกุลของโปรตีน หรือของจุลินทรีย์ การคำนวณความสามารถในการกักกันสาร (Rejection, R) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 โดยค่าการกักกันอาจเรียกว่าค่าการไม่ยอมรับ หรือค่าการคงอยู่ (Retention, R_F) [24]

$$R = R_F = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2)$$

เมื่อ C_p = ความเข้มข้นของตัวละลายในเพอร์มิเอต

C_f = ความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลายป้อน

C_r = ความเข้มข้นของตัวละลายในรีเทนเนต

2.4.6 ฟาล์วลิงและโพลาไรเซชันความเข้มข้น (fouling and concentration polarization)

โพลาไรเซชันความเข้มข้นเป็นปรากฏการณ์ปกติของกระบวนการที่ดำเนินการภายใต้แรงดัน คือ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เมื่อตัวละลายเกิดการสะสมกันอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายที่ไม่ผ่านเมมเบรนออกไปสูงกว่าความเข้มข้นในเนื้อสารละลาย ก่อให้เกิดชั้นขอบ (boundary layer) ขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าฟาล์วลิง ซึ่งทำให้สมรรถนะของเมมเบรนกล่าวคือฟลักซ์ (flux) และสมรรถนะการเลือก (selectivity) ลดลง การเกิดฟาล์วลิงหรือการตกสะสมของสารบนเมมเบรนมี 3 ลักษณะ คือ บนผิวด้านนอกของเมมเบรนเป็นชั้นเค้ก (cake layer), ที่ช่องเปิดของรู (pore blocking) หรือภายในรูของเมมเบรน (interior pore fouling) โดยเฉพาะการเกิดฟาล์วลิงแบบภายในรูของเมมเบรนจะทำให้ขนาดรูเล็กลง กีดขวางการไหล และล้างทำความสะอาดได้ยาก หากชั้นอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวเมมเบรนเกิดโครงสร้างเป็นโครงข่ายสามมิติพองตัวมากแล้ว เรียกชั้น fouling layer นั้นว่า “ชั้นเจล (gel layer)” [25] สำหรับวิธีการป้องกันหรือควบคุมการเกิดฟาล์วลิง มีดังนี้

2.4.6.1 การบำบัดเบื้องต้น (pretreatment) ในกรณีสารป้อนมีสารแขวนลอยมากนั้น การป้องกันการเกิดฟาล์วลิงจำเป็นต้องมีการบำบัดเบื้องต้น โดยทำให้สารป้อนมีการตกตะกอน หรือการกรองเบื้องต้น

2.4.6.2 การดัดแปลงผิวหน้าของเมมเบรน (membrane surface modification) การปรับแต่งคุณสมบัติของเมมเบรนให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมกับสารป้อน เช่น การเติมหมู่ชอบน้ำ หรือหมู่ที่มีประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรน

2.4.6.3 การออกแบบอุทกพลศาสตร์ของโมดูลให้เหมาะสม (hydrodynamic optimization of the membrane module) โดยออกแบบให้เกิดแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของสารป้อนที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงๆ จะทำให้อนุภาคที่ผิวหน้าลดน้อยลง

2.4.6.4 การล้างเมมเบรนด้วยสารเคมี (membrane cleaning) เมื่อฟลักซ์ลดลงจนถึงระดับหนึ่ง จำเป็นต้องล้างเมมเบรนเพื่อให้ค่าฟลักซ์กลับคืนมาบางส่วนหรือให้ได้เท่าเดิม สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด ได้แก่ กรดไนตริก, โซเดียมไฮดรอกไซด์, สารเชิงซ้อน EDTA (ethylene – diamine – tetra – acetic – acid), สารซักฟอก (detergent) และสารฆ่าเชื้อ (disinfectant) เป็นต้น

2.4.7 แบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่

แบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่ (constant pressure filtration model) ที่นำเสนอโดยเฮอเมียร์ (Hermia, 1982) [26] สำหรับของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน (non-newtonian fluid) และระบบมีความดันคงที่เพื่ออธิบายกลไกการลดลงของค่าฟลักซ์นั้น แสดงได้ดังสมการ (3)

$$\frac{d^2t}{dV^2} = K \left(\frac{dt}{dV} \right)^n \quad (3)$$

โดย t คือ เวลา หน่วย วินาที
 V คือ ปริมาตรเพอร์มิเอต หน่วย ลูกบาศก์เมตร
 K คือ ค่าคงที่ หน่วยขึ้นกับค่า n
 n คือ ค่าคงที่ ขึ้นกับชนิดกลไกการเกิดฟลัวลิ่ง มีค่าดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของแต่ละชนิดกลไกฟลัวลิ่ง

constant pressure filtration model	n
Complete	2
Standard	3/2
Intermediate	1
Cake	0

รายละเอียดแนวคิดฟลัวลิ่งแต่ละแบบมีดังนี้

2.4.7.1 complete blocking filtration model (CBM) มีสมมติฐานว่า โมเลกุลหรืออนุภาคที่จะเข้าไปอุดตันรูพรุนโดยทุก ๆ โมเลกุลหรืออนุภาคมีส่วนในการอุดตันรูพรุนโดยไม่ซ้อนทับกัน แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 complete blocking filtration model (CBM) [26]

ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอตมีการเปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ 4

$$\ln J_v = \ln J_{v,0} - K_c t \quad (4)$$

โดย	J_v	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาใดๆ หน่วย ($m^3/m^2.s$)
	$J_{v,0}$	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตตอนเริ่มต้น หน่วย ($m^3/m^2.s$)
	t	คือ	เวลา (s)
	K_c	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง CBM หน่วย (s^{-1})

2.4.7.2 intermediate blocking filtration model (IBM) จะมีความคล้ายคลึงกันกับ CBM คือการเกิดการอุดตันของโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งทับซ้อนบนอนุภาคอื่น แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 intermediate blocking filtration model (IBM) [26]

ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอตมีการเปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ 5

$$\ln J_v = \ln J_{v,0} - K_i V \quad (5)$$

โดย	J_v	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาใดๆ หน่วย ($m^3/m^2.s$)
	$J_{v,0}$	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตตอนเริ่มต้น หน่วย ($m^3/m^2.s$)
	V	คือ	ปริมาตรของเพอร์มิเอต (m^3)
	K_i	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง IBM หน่วย (m^{-1})

2.4.7.3 standard blocking filtration model (SBM) เป็นแบบจำลองที่อธิบายในการกรองสารละลายขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน โดยอนุภาคสามารถผ่านรูพรุนไปได้และมีอนุภาคบางส่วนถูกคุดซบอยู่ภายในรูพรุน ทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของเมมเบรนเท่านั้น และไม่เกิดขึ้นสะสมบนผิวหน้าของเมมเบรน แสดงดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 standard blocking filtration model (SBM) [26]

ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอตมีการเปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ 6

$$(J_v)^{1/2} = (J_{v,0})^{1/2} - (K_s/2) AV \quad (6)$$

โดย	J_v	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาใดๆ หน่วย ($m^3/m^2.s$)
	$J_{v,0}$	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตตอนเริ่มต้น หน่วย ($m^3/m^2.s$)
	V	คือ	ปริมาตรของเพอมีเอต (m^3)
	A	คือ	พื้นที่ตัดขวางของเมมเบรน (m^2)
	K_s	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง SBM หน่วย (m^3)

2.4.7.4 cake filtration model (CFM) เป็นแบบจำลองที่อธิบายการกรองอนุภาคที่มีขนาดต่าง ๆ กัน คือ

- 1) ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน อนุภาคจะถูกสะสม และ เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน
- 2) ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน อนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมอยู่ในรูพรุนและต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน จนในที่สุดเมมเบรนสามารถกักโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กไว้เกิดเป็นชั้นบางบนเมมเบรน (กรณีถ้าเป็น โมเลกุลเรียกเจล และถ้าเป็นอนุภาคเรียกเค้ก) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 cake filtration model (CFM) [26]

สมการอธิบายเพอร์มิเอตแสดงได้ดังสมการที่ 7

$$t/V = 1/J_0 + (K_s A^2 V)/2 \quad (7)$$

โดย	J_v	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาใดๆ หน่วย ($m^3/m^2.s$)
	$J_{v,0}$	คือ	ฟลักซ์เพอร์มิเอตตอนเริ่มต้น หน่วย ($m^3/m^2.s$)
	t	คือ	เวลา (s)
	V	คือ	ปริมาตรของเพอมีเอต (m^3)

A คือ พื้นที่ตัดขวางของเมมเบรน (m^2)

K_c คือ ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่งตามแบบจำลอง CFM หน่วย (s/m^{-6})

2.4.7.5 กลไกการเกิดฟาวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ เกิดจากการอุดตันภายในรูพรุนซึ่งไม่สามารถทำความสะอาดได้จากการชะล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ สามารถอธิบายกลไกการเกิดได้จากสมการที่ 8 และ 9

$$L_p = J / TMP \quad (8)$$

$$IF = (L_{pb} - L_{pa}) / L_{pb} \quad (9)$$

โดย L_p คือ ค่าการซึมผ่านของน้ำบริสุทธิ์ ($g/cm^2 \text{ min bar}$)
 J คือ ฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ ($g/cm^2 \text{ min}$)
 TMP คือ ความดันที่คร่อมเมมเบรน (bar)
 IF คือ ฟาวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้
 L_{pb} และ L_{pa} คือ ค่าการซึมผ่านของน้ำบริสุทธิ์ก่อนและหลังการกรอง

2.4.8 การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวแปร ในลักษณะเชิงเส้น (linear) โดยมีสมการถดถอยในรูป $y = \alpha + \beta X$ เมื่อนำค่า X และ Y ทั้งหมดไปพล็อตกราฟบนแกน X และ Y ซึ่งจะได้เส้นกราฟถดถอย (regression Line) จากสมการเส้นตรงค่า α และ β เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจึงจะต้องประมาณค่าโดยใช้ข้อมูลตัวอย่าง วิธีที่นิยมใช้ในการประมาณค่า α และ β จะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (the least squares method) โดยแทนค่าของ α และ β ในรูปของ a และ b โดยที่ค่า a เป็นค่าคงที่ที่เกิดจากจุดตัดของแกน Y ส่วน b เป็นค่าความชัน

สมการถดถอยอย่างง่ายสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Y = a + bX \quad (10)$$

เมื่อ Y คือ ตัวแปรตาม (เนื่องจากค่าขึ้นกับค่า X)
X คือ ตัวแปรต้น
a คือ ค่าคงที่เป็นค่าที่ตัดแกน Y

b คือ ความชัน

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) พิจารณาได้จากค่า b โดยสรุปได้ดังนี้

1. $b > 0$ คือ X และ Y มีความสัมพันธ์ทิศทางเดียวกัน
2. $b < 0$ คือ X และ Y มีความสัมพันธ์ทิศทางตรงข้ามกัน
3. b เข้าใกล้ 0 กล่าวคือ X และ Y มีความสัมพันธ์น้อยมาก
4. $b = 0$ กล่าวคือ X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์

สำหรับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม ซึ่งสมการถดถอยจะสามารถพยากรณ์ได้ดีเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเป็นผลมาจากอิทธิพลของตัวแปรต้นมากน้อยเพียงใด สมการถดถอยสามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ซึ่งเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ใช้สัญลักษณ์คือ R^2 แสดงได้ดังสมการที่ 9

$$R^2 = \frac{(\sum XY - N\bar{X}\bar{Y})^2}{(\sum X^2 - N\bar{X}^2)(\sum Y^2 - N\bar{Y}^2)} \quad (11)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าใกล้เคียง 1 หมายถึงตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมาก หากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าใกล้เคียง 0 กล่าวคือตัวแปรต้นกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเอทานอลจากวัสดุเซลลูโลสอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและไม่ส่งผลกระทบต่อวงจรอาหารของมนุษย์ แต่การใช้วัสดุเซลลูโลสยังมีข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเอนไซม์ เพราะเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในกระบวนการเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลมีราคาสูงและที่ผ่านมการใช้เอนไซม์มักเป็นแบบใช้แล้วทิ้ง ไม่มีการนำกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งถือว่าไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จึงมีการนำเสนอวิธีการนำกลับเซลลูเลสหลากหลายวิธี และพบว่าหลายวิธีการนำกลับมีศักยภาพในการนำไปใช้งานได้ ดังนี้

Mitsuro Ishihara และคณะ (1991) [27] ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของเซลลูเลส *Trichoderma viride* บนเนื้อไม้ โดยทำการศึกษาอัตราส่วนสารตั้งต้น/เอนไซม์, เวลาในการไฮโดรไล

เซทและการมีหรือไม่มีลิกนินในสารตั้งต้นโดยศึกษาจากการนั่งไม้เพื่อลคลิกนินและนำกลับเซลลูเลส ซึ่งทั้งหมดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเอนไซม์ ปริมาณลิกนินในไม้มีแนวโน้มที่จะลดการดูดซับของเอนไซม์ การไฮโดรไลซิสเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเอนไซม์ ในระหว่างการไฮโดรไลซิสถูกวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค fast protein liquid chromatography พบว่าปริมาณลิกนินส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการไฮโดรไลซิส การกำจัดลิกนินออกจากไม้โดยการนั่งก่อนการไฮโดรไลซิสพบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อรีไซเคิลเอนไซม์เซลลูโลส

Kamyar Khoshnevisan และคณะ (2017) [4] เอนไซม์เซลลูโลสถือเป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในด้านเทคโนโลยีชีวภาพและการใช้ทางการเกษตร เช่น อาหาร สารเคมีผงซักฟอก เครื่องสำอาง และกระดาษ การใช้งานส่วนใหญ่ใช้ความร้อนและเซลลูเลสต่ำ ผลิตภัณฑ์จากเอนไซม์ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการไม่เหมาะสมในมุมมองทางเศรษฐกิจ การตรึงเซลลูเลสบนวัสดุนาโนได้รับความสนใจอย่างมากในการนำกลับเซลลูเลส งานวิจัยนี้ศึกษาโดยการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรึงเอนไซม์เซลลูเลสบน MNP ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของเอนไซม์และวิธีการนำกลับเซลลูเลสอย่างง่าย พบว่า การตรึงเอนไซม์เซลลูเลสบน MNP เป็นวิธีที่ดีที่สุด

Guoqiang Chen (2013) [5] งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการรีไซเคิลเซลลูเลสด้วยกระบวนการอิเล็กโทรฟิลเตรชัน (EUF) ซึ่งเป็นกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันที่ปรับปรุงโดยสนามไฟฟ้าเพื่อลดต้นทุนของการเปลี่ยนแปลงเอนไซม์ ผลของสนามไฟฟ้าภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นของบัฟเฟอร์, ความเข้มข้นของฟางข้าวสาลีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด, กระแสและอุณหภูมิ) ต่อฟลักซ์ระหว่าง EUF ผลการวิจัยพบว่า EUF มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของโพลาริเซชัน (CP) และเพิ่มฟลักซ์การกรองในการรีไซเคิลเซลลูเลส การปรับปรุงฟลักซ์โดยสนามไฟฟ้าสามารถเสริมที่ความเข้มข้นบัฟเฟอร์ต่ำ (5 mM) และอุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) และกระแสสูง (150 mA) ฟลักซ์สำหรับ 2% (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น, w/v) lignocellulosic hydrolyzate เพิ่มขึ้น 4.4% ที่ 836 V m และอุณหภูมิห้องเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่มีสนามไฟฟ้า งานนี้แสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสม EUF สามารถรีไซเคิลเซลลูเลสได้อย่างมีประสิทธิภาพจากเซลลูลอส ไฮโดรไลเซต และลดค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสลงมาก

Benkun Qi และคณะ (2012) [6] ศึกษาการประยุกต์ใช้การกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันทดสอบการนำกลับเซลลูเลสและน้ำตาลกลูโคสที่มีอยู่ในไฮโดรไลเซตจากชีวมวล

ด้วยเมมเบรน PES10 ดำเนินการที่ 25.6 l/m²h, 73.9% ของเซลลูโลส โพรตีนที่มีอยู่ในไฮโดรไลเซทจะสามารถนำกลับได้ แต่ไม่สามารถแยกน้ำตาลกลูโคส กระแสเพอร์มิ-เอตที่ได้จาก UF แล้วถูกทำให้เข้มข้นโดย NF โดยใช้เมมเบรน NF270 ดำเนินการที่ 13.3 l/m²h ความเข้มข้นของกลูโคสในไฮโดรไลเซทที่ผ่านกระบวนการนี้จะเพิ่มขึ้นจาก 30.2 เป็น 110.2 g/l การนำกลับเซลลูโลสโดย UF สามารถลดต้นทุนการย่อยสลายของวัสดุคิกโนเซลลูโลสได้ ขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคสโดย NF สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการหมักของไฮโดรไลเซทของวัสดุคิกโนเซลลูโลส และลดต้นทุนการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์หมัก ดังนั้นการใช้ UF และ NF ในการปรับปรุงกระบวนการไฮโดรไลเซทจากชีวมวลเป็นอีกแนวทางที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นในการหมักผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้วัสดุคิกโนเซลลูโลสเป็นสารตั้งต้น

ธนวัฒน์ ลิพันธ์ และคณะ (2014) [28] ศึกษาการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคสและแยกกรดเซลลูโลสออกจากสารละลายไฮโดรไลเซทโดยศึกษาบนพื้นฐานของความดันลดต่อฟลักซ์, ความสามารถการกักกันกรดเซลลูโลส, น้ำตาลกลูโคสและเอทานอล การทดลองใช้ชุดการกรองแบบปิดตายด้วยเมมเบรนเกรดการค้าชนิดพอลิเอเธอร์ซัลโฟน NP010 และ NP030 ที่ความดัน 20 บาร์ โดยการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกกรองสารละลายสังเคราะห์ด้วยเมมเบรนชนิด NP010 (สารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 20% สารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้น 3 brix, 4 brix และ 5 brix) ส่วนที่สองกรองสารละลายไฮโดรไลเซทด้วยเยื่อแผ่นเมมเบรนชนิด NP010 และ NP030 ผลการวิจัยพบว่า กลไกการกรองของ NP010 และ NP030 เป็นแบบ cake filtration model ส่วนร้อยละการกักกันของสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 20% เท่ากับ 0, 0 และ 5 ตามลำดับ และสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้น 3 brix, 4 brix และ 5 brix ได้ร้อยละการกักกันเท่ากับ 0, 2.6 และ 4 ตามลำดับ ส่วนน้ำหมักเมมเบรน NP030 กักกันได้มากกว่า NP010 โดยมีค่าร้อยละการกักกันของ เซลลูโลสแอกติวิตี น้ำตาลรีดิวซ์ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ และปริมาณเอทานอลเท่ากับ 30.46, 54.18, 100 และ 15.21 ตามลำดับ

Jianquan Luo และคณะ (2012) [29] ได้ศึกษากระบวนการกรองแบบสองขั้นตอนของอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน (UF / NF) ในระบบบำบัดน้ำเสียจากนมเพื่อนำกลับสารอาหารและน้ำ พบว่าเมมเบรน Ultracel PLGC และ NF270 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับจุดประสงค์นี้ ในขั้นตอนแรกโปรตีนและไขมันถูกทำให้เข้มข้นขึ้นโดยเมมเบรน Ultracel PLGC UF ซึ่งสามารถ

นำมาใช้กับสารภายในการผลิตไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงชีวภาพ และกระแสเพอร์มิเอตจาก UF ถูกทำให้เข้มข้นโดยเมมเบรน NF270 ในขั้นตอนที่สองจะได้แอลกอฮอล์ในกระแสรีเทนเนต และน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ในกระแสเพอร์มิเอต ขณะที่กระแสรีเทนเนตสามารถนำมาใช้ในระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยวิธีนี้น้ำเสียจากนมส่วนใหญ่จึงถูกนำมารีไซเคิลเพื่อนำมาผลิตน้ำที่ใช้ฆ่าและวัสดุสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ NF แบบขั้นตอนเดียวและ UF / NF แบบสองขั้นตอน UF / NF นี้มีประสิทธิภาพสูงและความสกปรกน้อย

K.V. Reddy และคณะ (2005) [30] ได้ศึกษาการทำน้ำมะพร้าวให้ปลอดเชื้อโดยใช้กระดาษกรองธรรมดา (Whatman No. 4) สำหรับการกำจัดอนุภาคแขวนลอยและการกรองด้วยเซลลูโลสในเตรทเมมเบรน (รูพรุน $0.2 \mu\text{m}$) สำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ การทดสอบการกรองของระบบได้รับการทดสอบที่ความแตกต่างของความดัน 3 ระดับ 5.33, 10.67 และ 16.00 kPa วิเคราะห์ความต้านทานทั้งในกระบวนการกรองและการอัดตัวของเค้ก ค่าความต้านทานของตัวกลางกรอง (R_m) และความต้านทานของเค้ก (α) เพิ่มขึ้นเมื่อความแตกต่างของความดันที่ใช้เพิ่มขึ้น ทั้งระบบกรอง ค่า R_m มีค่าระหว่าง 3.497×10^9 และ $5.042 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$, และ 1.979×10^{10} และ $3.076 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ สำหรับกระดาษและแผ่นกรองเมมเบรนตามลำดับสำหรับช่วงความดันที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของ α เท่ากับ 2.162×10^{12} - $4.280 \times 10^{12} \text{ m} / \text{kg}$ สำหรับกระดาษกรองและ 2.144×10^{12} - $3.942 \times 10^{12} \text{ m} / \text{kg}$ สำหรับแผ่นกรองเมมเบรน แม้ว่าค่า R_m ของค่าความแตกต่างของความดันจะสูงมากสำหรับเมมเบรน แต่ค่า α มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองระบบ ชั้นเค้กมีการบีบอัดเท่ากับ 0.4

จิรพัฒน์ กิจสุวรรณ (2014) [31] ได้ทำการศึกษาการแยกเอนไซม์เซลลูเลสและจุลินทรีย์โดยการกรองไหลขวางระดับอัลตราฟิลเตรชันบนฐานของฟลักซ์เพอร์มิเอต กลไกการกรอง และความสามารถการกักกันสาร โดยใช้สารป้อนจากสารละลายสังเคราะห์ (น้ำตาลและเอทานอล) และน้ำหมัก การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ (1) การแยกสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 40, 120 และ 360 g/l และสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 30, 40 และ 50 g/l (2) การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกรองโดยใช้สารป้อนคือน้ำหมัก ณ ความเร็วไหลขวาง 0.13, 0.19 และ 0.25 m/s และความเข้มข้นอาหารเหลว 0, 30 และ 40 g/l (3) การประยุกต์เพื่อนำไปใช้โดยใช้สภาวะกรองที่เหมาะสม พร้อมรีไซเคิลรีเทนเนตสู่ถังปฏิกรณ์และศึกษากลไกการกรองควบคู่โปรไฟล์ระหว่างกระบวนการหมัก ผลการวิจัยพบว่า การกรองด้วยเมมเบรนไม่สามารถแยกสารละลายสังเคราะห์ได้

N. Nguyen และคณะ (2015) [34] ศึกษากระบวนการไฮโดรไลซิสของวัสดุลิกโนเซลลูโลส สำหรับการผลิตเอทานอล โดยใช้กระบวนการกรองแบบนาโนฟิลเตรชัน (NF) และรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองต่ำ (150 - 400 g/mol) มาศึกษาความสามารถในการแยกน้ำตาล C5 และ C6 ออกจาก กรดอะซิติก, furfural, 5-hydroxymethyl furfural พบว่า RO สามารถกักกันปริมาณน้ำตาลได้สูงสุด (>97%) แต่การยับยั้งการแพร่ต่ำ ในขณะที่ NF270, NF- และ NF245 (Dow) และ DK (GE Osmonics) พบว่าสามารถกักกันกลูโคสได้ >94% และยับยั้งการแพร่ >80% NF270 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงสุด (20 L/hr.m²) ตามมาด้วย DK, NF- และ NF245 อย่างไรก็ตาม DK และ NF- ยังคงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจเนื่องจากการสูญเสียปริมาณน้ำตาลต่ำ

Koel Saha และคณะ (2017) [35] ศึกษาการปรับสภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ การหมัก และการคายน้ำ การปรับสภาพด้วย Ionic liquid พบว่ามีเซลลูโลสมากกว่า 80% จาก lignocelluloses ซึ่งโดยทั่วไปมีเซลลูโลส 30-46% และลิกนิน 18-25% การแปรสภาพเซลลูโลสก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอเอทานอลโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสเอนไซม์ซึ่งให้น้ำตาลรีดิคซ์ 76% การใช้การกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันในสารไฮโดรไลซิสเข้มข้น 27% ช่วยเพิ่มน้ำตาลรีดิคซ์ และการนำกลับเอนไซม์มากกว่า 73% กักกันยีสต์ได้ 100% และยังสามารถผลิตเอทานอลได้ 15 กรัม/ลิตร/ชม. นอกจากนี้การคายน้ำสามารถทำได้โดยวิธีการใช้เมมเบรนเพอร์เวปอราชันสามารถผลิตเอทานอลได้ 99.8 %wt ขอบเขตของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่วิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนสำหรับการผลิตเอทานอล วิธีการในงานวิจัยจะช่วยเหลือปัญหาในด้านเทคโนโลยีต่างๆ และตระหนักถึงการใช้อีทานอลจากวัสดุลิกโนเซลลูโลสในเชิงพาณิชย์เป็นหลัก

Paripok Phitsuwan และคณะ (2016) [36] ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ด้วยเบส ได้แก่ NaOH, Ca(OH)₂, NH₃ และ alkaline H₂O₂ (aH₂O₂) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลกลูโคสในกระบวนการไฮโดรไลซิส การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพโครงสร้างก่อนและหลังการปรับโครงสร้างโดยใช้ SEM, FTIR, XRD และ TGA รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้กับการไฮโดรไลซิสของเอนไซม์เซลลูโลส พบว่าสามารถกำจัดลิกนิน (84%) เมื่อปรับสภาพด้วย NaOH อัตราการเปลี่ยนกลูแคนสูง (94%) โดยการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ในขณะที่เมื่อปรับสภาพด้วย Ca(OH)₂, NH₃ และ aH₂O₂ ได้เท่ากับ 60 %, 51% และ 42% ตามลำดับ การละลายของลิกนินทำให้เกิดความพรุนทำให้เอนไซม์เซลลูเลสสามารถเข้าถึงเซลลูโลสได้ดีขึ้นในหญ้าที่ปรับสภาพด้วย NaOH

Chi-Ruei He และคณะ (2017) [37] ได้ทำการเปรียบเทียบการปรับสภาพกรดและด่างพบว่า ขั้นตอนการปรับสภาพด้วยด่างที่ดีที่สุดสำหรับหญ้าเนเปียร์ ให้ผลกลูโคสโดยรวมเท่ากับ 0.82 g/g-glucose_{total} (2.5 wt% NaOH, 8 wt% ตัวอย่าง, 121 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที) และการย่อยด้วยเอนไซม์ (40 FPU/g-substrate) การหมักแบบ saccharification แบบ semi-simultaneous ดำเนินการโดยการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์และการหมัก ABE พบว่าหลังจากไฮโดรไลซิส 24 ชั่วโมงตามด้วยการหมัก 96 ชั่วโมงบิวทานอลและอะซิโตนมีความเข้มข้นอยู่ที่ 9.45 และ 4.85 กรัม/ลิตรตามลำดับ ผลผลิตบิวทานอลมีค่าเท่ากับ 0.22 g/gsugar_{glucose + xylose} ประสิทธิภาพในการผลิตบิวทานอลจากหญ้าเนเปียร์ 31%



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 หญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์ พันธุ์ปากช่อง 1 จากจังหวัดพระนครศรีอยุธยา นำมาลดขนาดจนมีอนุภาคอยู่ในช่วง 1-2 เซนติเมตร ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 ที่ผ่านการลดขนาด

3.1.2 จุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ผสม RT-P3 ได้มาจากเชื้อราไตรโคเดอร์มา ริสอี RT-P1 (*T.reesei* RT-P1) และยีสต์แซคคาโรมายซิส RT-P2 (*S.cerevisiae* RT-P2) ผ่านกระบวนการหมักแข็งและอบแห้งได้ผลิตภัณฑ์คือผงจุลินทรีย์ผสม RT-P3 ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้รับความอนุเคราะห์ผงจุลินทรีย์ผสม RT-P3 จากห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชีวเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตัวอย่างของผงจุลินทรีย์ผสมแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผงจุลินทรีย์ผสม RT-P3

3.1.3 สารเคมี

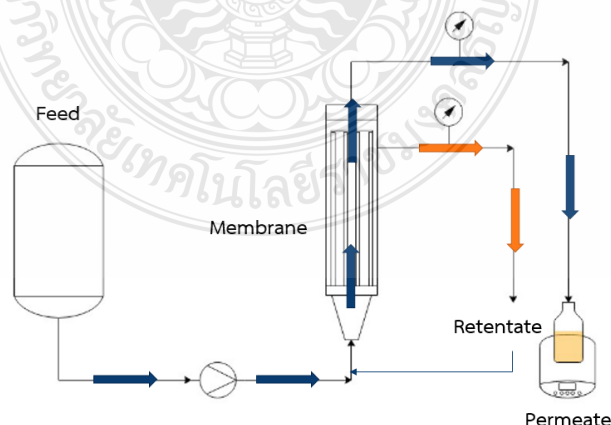
- 3.1.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรด AR. บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.1.3.2 เอทานอล เกรด AR. บริษัท Rci Labscan Limited
- 3.1.3.3 โปแทสเซียมไดโครเมต เกรด AR. บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.1.3.4 กรดซัลฟูริกเข้มข้น 98% เกรด AR. บริษัท QReC
- 3.1.3.5 กรดไดโนโตรซาลิกไซคลิก เกรด AR. บริษัท SIGMA-ALDRICH
- 3.1.3.6 โซเดียมโปแทสเซียมคาร์เตรท เกรด AR. บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.1.3.7 แคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เกรด AR. บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.1.3.8 แมกนีเซียมซัลเฟต เกรด AR. บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.1.3.9 โปแทสเซียมซัลเฟต เกรด AR. บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd

3.2 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการใช้งาน

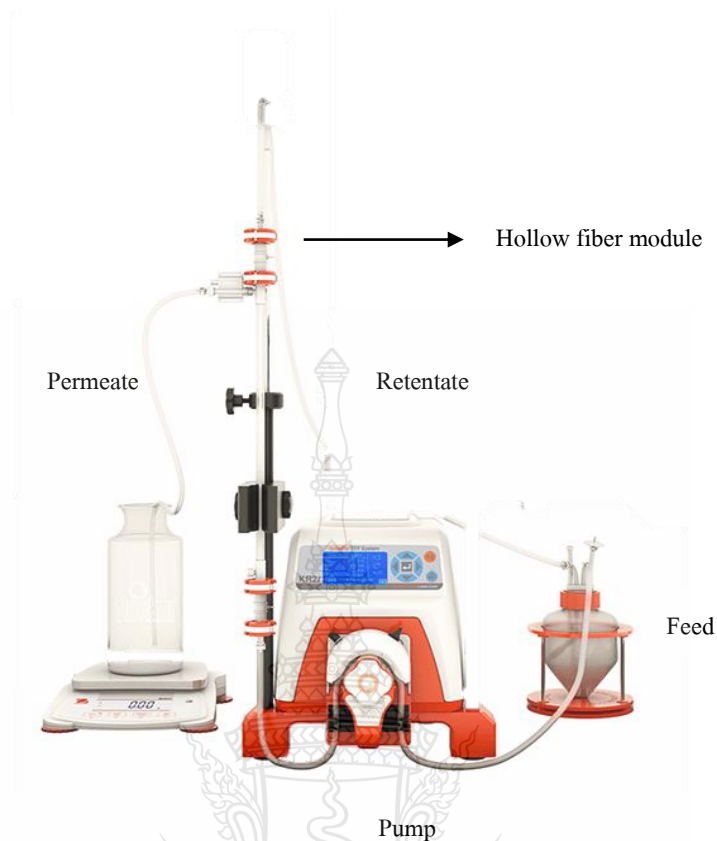
3.2.1 ชุดการกรอง

3.2.1.1 ชุดการกรองแบบไหลขวาง (บริษัท Spectrum Lab, USA) ชุดเครื่องมือการกรองแบบไหลขวางแสดงดังรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2 ประกอบด้วย

- 1) บั๊มเป็นแรงขับเพื่อให้สารป้อนเคลื่อนที่ผ่านสายยางเข้าสู่โมดูล
- 2) ขวดบรรจุสารเป็นขวดเก็บสารสามารถเปลี่ยนขนาดความจุได้ตามต้องการ (ไม่เกิน 2000 ml)
- 3) เครื่องชั่งตวงน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น PGW 3502i) ใช้ในการเก็บน้ำหนักเพอร์มิเอตที่ทางออก



รูปที่ 3.3 แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบไหลขวาง



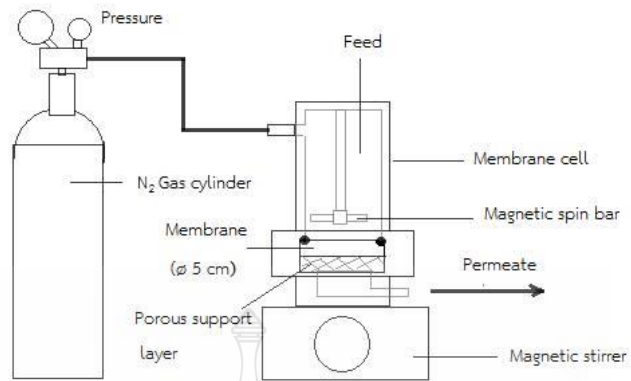
รูปที่ 3.4 ชุดการกรองแบบไหลขวาง (บริษัท Spectrum Lab, USA)

3.2.1.2 ชุดเครื่องมือการทดลองการกรองแบบปิดตายแสดงดังรูปที่ 10.3

1) ถังแก๊สไนโตรเจนใช้เป็นแรงขับเพื่อให้สารป้อนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน ด้านบนติดชุดอุปกรณ์วัดความดันเพื่อปรับค่าให้ได้ตามต้องการ พร้อมระบบท่อสแตนเลสนำแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ชุดกรอง

2) ถังบรรจุสารป้อนทำจากสแตนเลสสตีล ขนาดความจุ 170 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภายในของถังจะติดตั้งแท่งแม่เหล็ก และด้านล่างของถังเป็นที่ติดตั้งเมมเบรน โดยเมมเบรนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร วางบนแผ่นรองรับสแตนเลส ถังบรรจุสารป้อนติดตั้งบนเครื่องกวนยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7 ปรับความเร็วได้ 6 ระดับ และด้านบนติดตั้งเกจวัดความดัน

3) เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น PGW 3502i) ใช้ในการเก็บน้ำหนักเพอร์มิเอตที่ทางออก



รูปที่ 3.5 แผนภาพชุดเครื่องมือการกรองแบบปิดตาย



รูปที่ 3.6 ชุดการกรองแบบปิดตาย

3.2.1.3 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)



รูปที่ 3.7 ชุดเครื่องวิเคราะห์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.2.2 เมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (Spectrum Lab, USA) และ ชนิดแผ่นแบน (Microdyn-Nadir, Germany) ซึ่งในการทดลองจะใช้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสำหรับการกรองแบบไหลขวางและเมมเบรนชนิดแผ่นแบนสำหรับการกรองแบบปิดตาย คุณลักษณะของเมมเบรนแสดงดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (Spectrum Lab, USA)

เมมเบรน	ไมโครฟิลเตรชัน		อัลตราฟิลเตรชัน	
	PES0.2	PES10	PES100	PES500
น้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง	0.2 μm	10 kDa	100 kDa	500 kDa
ความดัน (psig)	30	30	30	30
พื้นที่ผิวการกรอง (cm^2)	180	155	155	245
วัสดุเมมเบรน	PES	PES	PES	PES

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะของเมมเบรนชนิดแผ่น (Microdyn-Nadir, Germany)

เมมเบรน	NP010	NP030
ค่าการกักกัน Na_2SO_4 (%)	35-75	80-95
ฟลักซ์การไหล [ลิตร/(ตารางเมตร.ชั่วโมง)]	> 200	> 40
วัสดุเมมเบรน	PES	PES
พื้นที่ผิวการกรอง (cm^2)	196.3	196.3

3.3 การปรับสภาพหุ้มนเปียร์

3.3.1 หุ้มนเปียร์

หุ้มนเปียร์ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ หุ้มนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 จากเกษตรกรจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งในการทดลองจะนำหุ้มนเปียร์ดังกล่าวมาทำการลดขนาดให้มีขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร จากนั้นทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-12 ชั่วโมง ทำการวัดค่าความชื้นจนมีความชื้นไม่มากกว่า 12%

3.3.2 การปรับสภาพ

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับสภาพด้วยด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ อ้างอิงวิธีการทดลองจากงานวิจัยของ Paripok Phitsuwan และคณะ; 2016 [36] พบว่าขั้นตอนการล้างด้วยน้ำกลั่นสามารถทำได้ง่ายและสะดวกรวดเร็วกว่า โดยใช้เวลาเพียง 2-3 ชั่วโมงในการล้างด่างออกจากหุ้เนเปียร์เพื่อให้หุ้เนเปียร์มีสภาพเป็นกลาง โดยมีรายละเอียดวิธีการปรับสภาพดังนี้ หุ้เนเปียร์ที่ผ่านการลดขนาดและอบแห้งปริมาณ 50 กรัม มาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2% (w/v) ปริมาตร 300 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:6 w/v) จากนั้นนำไปเข้า autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำออกจาก autoclave ตั้งให้เย็น ณ อุณหภูมิห้องแล้วดำเนินการล้างด้วยน้ำกลั่นจนหุ้เนเปียร์มีสภาพเป็นกลาง (pH=7) โดยหุ้เนเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพจะถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซตต่อไป

3.4 การผลิตสารละลายไฮโดรไลเซต

การผลิตสารละลายไฮโดรไลเซตในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของรุ่งตะวัน ศรีวิเศษและคณะ [15] มีรายละเอียดดังนี้ หุ้เนเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว ปริมาณ 300 กรัม และอาหารเหลวปลอดเชื้อ LM-pH5 สูตรไม่มีน้ำตาลปริมาตร 6 ลิตร (สูตรอาหารเหลวปลอดเชื้อแสดงดังภาคผนวก ก) ผสมกับผงจุลินทรีย์ RT-P3 ปริมาตร 300 กรัม (ได้รับการอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการชีวเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี) ทำการหมักในถังปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร ปิดถังหมักให้สนิท จากนั้นทำการกวนผสมให้เข้ากันโดยใช้ใบกวนที่ความเร็วรอบ 220-230 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง รอกะทั่งสารตกตะกอนและเก็บตัวอย่างสารละลายส่วนใสปริมาณ 10 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณเอทานอล และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบเท่าเดิมอีกครั้งเป็นเวลา 15 นาที เก็บตัวอย่างปริมาณ 20 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และเซลล์แลสแอคทีวิตี จากนั้นทำการวิเคราะห์และกวนทุกวันวันละ 3 ชั่วโมงจนกระทั่งวันที่มีปริมาณเซลล์แลสแอคทีวิตีสูงสุดจึงยุติการหมัก (โดยนับวันแรกที่ทำการหมักเป็นวันที่ 0) ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซตแสดงดังภาคผนวก ง หลังจากนั้นนำสารละลายไฮโดรไลเซตมาแยกของแข็งออกจากของเหลวโดยใช้ผ้าขาวบาง เก็บส่วนของเหลวไว้ในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสสำหรับทำการทดลองในขั้นต่อไป



ด้านบนเชื่อมต่อกับ
ไบอแกซ

รูปที่ 3.8 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซท

อย่างไรก็ตามสารละลายไฮโดรไลเซทที่ได้จากขั้นตอนนี้มีสภาพ ขุ่น มีตะกอน ไม่สามารถที่จะนำเข้าเครื่องกรองได้ทันทีเนื่องจากสภาพดังกล่าวมีผลต่อเครื่องและเมมเบรน (ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง เนื่องจากมีตะกอนสูงเกิดการอุดตันภายในเครื่องทำให้ความดันสูงเกินกำหนดที่เครื่องรับไหวและอาจส่งผลให้เมมเบรนมีการฉีกขาดได้) ดังนั้นจึงหาวิธีปรับสารละลายดังกล่าวให้เหมาะสมกับการกรองด้วยเมมเบรน โดยได้ทำการศึกษาตามงานวิจัยของกิตติศักดิ์ ครอบพุ่มวิจิตรและคณะ [38] พบว่าวิธีการเหวี่ยงแยกโดยใช้ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยทำการเหวี่ยงต่อเนื่อง 2 ครั้งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เนื่องจากมีความสะดวกและรวดเร็วให้สารละลายที่มีความใสในระดับที่พร้อมจะเข้ากระบวนการกรองได้ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.9 สารละลายไฮโดรไลเซทก่อนและหลังเหวี่ยงแยก

3.5 การทดลองการกรอง

3.5.1 การปรับสภาพเมมเบรนก่อนการใช้งาน

3.5.1.1 การปรับสภาพเมมเบรนระบบไหลขวาง

ในการใช้งานครั้งแรกของเมมเบรนจะทำการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น และในการใช้งานในครั้งต่อไปของเมมเบรนจะต้องล้างและปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นเนื่องจากเมมเบรนถูกทำความสะอาดและเก็บรักษาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 N จำเป็นที่จะต้องล้างสารละลายที่ติดค้างอยู่ภายในเมมเบรนออกโดยน้ำกลั่น การล้างจะดำเนินไปจนกระทั่งได้ค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นใกล้เคียงกับค่า ฟลักซ์ของน้ำกลั่นที่ได้จากการวัดในการใช้งานครั้งแรกของเมมเบรน

3.5.1.2 การปรับสภาพเมมเบรนระบบปิดตาย

ในการใช้งานครั้งแรกของเมมเบรนจะทำการตัดเมมเบรนเป็นวงกลมให้พอดีกับแท่นรองรับเมมเบรน จากนั้นนำเมมเบรนที่ตัดไปแช่น้ำกลั่นเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมงก่อนทำการกรอง เพื่อเป็นการปรับสภาพเมมเบรน

3.5.2 การทดลองการกรองในระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

3.5.2.1 ใช้สารป้อนสารละลายไฮโดรไลเซตที่ได้จากข้อ 3.4 โดยสารละลายป้อนจะถูกนำไป วิเคราะห์คุณภาพสารป้อนก่อนเข้าเครื่องกรองทุกครั้ง คุณภาพสารป้อนประกอบด้วยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, เซลลูโลส แอคติวิตี และเอทานอล

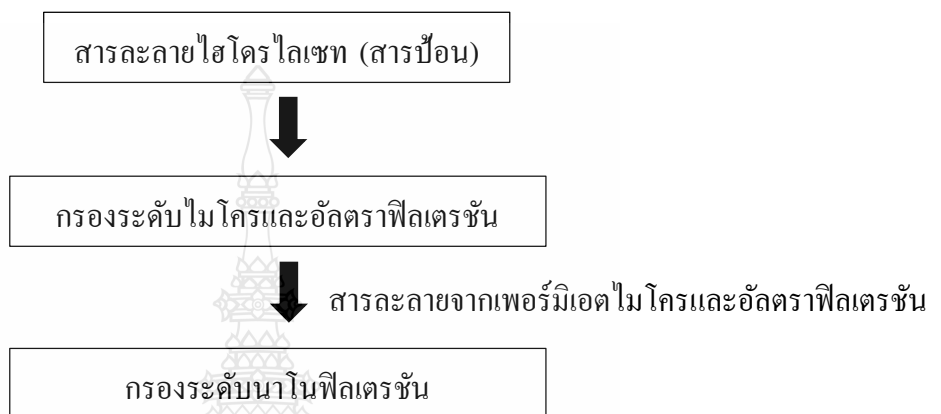
3.5.2.2 ดำเนินการทดลองการกรองแบบไหลขวาง โดยใช้เมมเบรนที่ระดับการกรอง ดังนี้

1) สำหรับไมโครฟิลเตรชัน: โดยใช้เมมเบรน PES0.2 และทำการทดลอง ณ อัตราการไหลต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 30, 50, 75, 100 และ 200 ml/min โดยทำการวัดค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาต่างๆ และเก็บตัวอย่างของกระแสเพอร์มิเอตและรีเทนเทตเพื่อวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, เซลลูโลส แอคติวิตี, เอทานอล (ทำการทดลองขั้นตอนนี้เพื่อทดสอบอัตราการไหลที่เหมาะสมต่อกระบวนการ)

2) สำหรับอัลตราฟิลเตรชัน: โดยใช้เมมเบรน 3 ชนิด คือ PES10, PES100 และ PES500 และทำการทดลอง ณ อัตราการไหล 3 ค่า ได้แก่ 30, 50 และ 75 ml/min โดยทำการวัดค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาต่างๆ และเก็บตัวอย่างของกระแสเพอร์มิเอตและรีเทนเทตเพื่อวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, เซลลูโลส แอคติวิตี, เอทานอล

3) ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่ได้ในทุกการกรอง ถูกนำไปศึกษากลไก ฟาล์วล้างตามแบบจำลองเฮอริเมียร์และกลไกฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling)

4) กระแสเพอร์มิเอตที่ได้หลังจากการกรองในระดับอัลตราฟิลเตรชัน ถูก นำมาใช้เป็นสารป้อนในระดับนาโนฟิลเตรชันต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนผังกระบวนการกรอง

3.5.2.3 ดำเนินการทดลองระดับการกรองนาโนฟิลเตรชัน โดยใช้การกรองแบบปิดตาย ดังนี้

- 1) สารป้อนจากกระแสเพอร์มิเอตของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันจะถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, เซลลูโลส แอคติวิตี และเอทานอล
- 2) เมมเบรนที่ใช้ในการศึกษามี 2 ขนาดคือ NP030 และ NP010 โดยทำการทดลอง ณ ความดันคงที่ต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 10, 15, 20 และ 25 บาร์ ผลการทดลองแสดงในทอมของฟลักซ์เพอร์มิเอตที่เวลาต่างๆ และเก็บตัวอย่างของกระแสเพอร์มิเอตและรีเทนเนตเพื่อวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, เซลลูโลส แอคติวิตี, เอทานอล

3.5.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาสมรรถนะของการกรองแสดงในทอมต่างๆ ดังนี้

- 1) ฟลักซ์เพอร์มิเอตและการลดลงของฟลักซ์ โดยพิจารณากราฟฟลักซ์เทียบกับเวลาและ ค่าฟลักซ์ ณ สภาวะคงตัว
- 2) ความสามารถการกักกันเซลลูโลสและความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส เพื่อประเมินความสามารถการกักกันของเมมเบรนแต่ละขนาด

3) กลไกฟาล์วลิ้ง: การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาล์วลิ้งด้วยแบบจำลอง
เฮอเมียร์โดยใช้ Microsoft excel 2013 และวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาล์วลิ้งแบบผันกลับไม่ได้จาก
ฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ก่อนและหลังการใช้งานเมมเบรน

3.5.3 การทำความสะอาดเมมเบรนหลังการใช้งาน

3.5.1.1 การปรับสภาพเมมเบรนระบบไหลขวาง

ในการใช้งานในครั้งต่อไปของเมมเบรนจะต้องล้างด้วยสารละลาย
โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 N และล้างสารละลายที่ติดค้างอยู่ภายในเมมเบรนออกโดยน้ำกลั่น
การล้างจะดำเนินไปจนกระทั่งได้ค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นใกล้เคียงกับค่า ฟลักซ์ของน้ำกลั่นที่ได้จากการ
วัดในการใช้งานครั้งแรกของเมมเบรน

3.5.1.2 การปรับสภาพเมมเบรนระบบปิดตาย

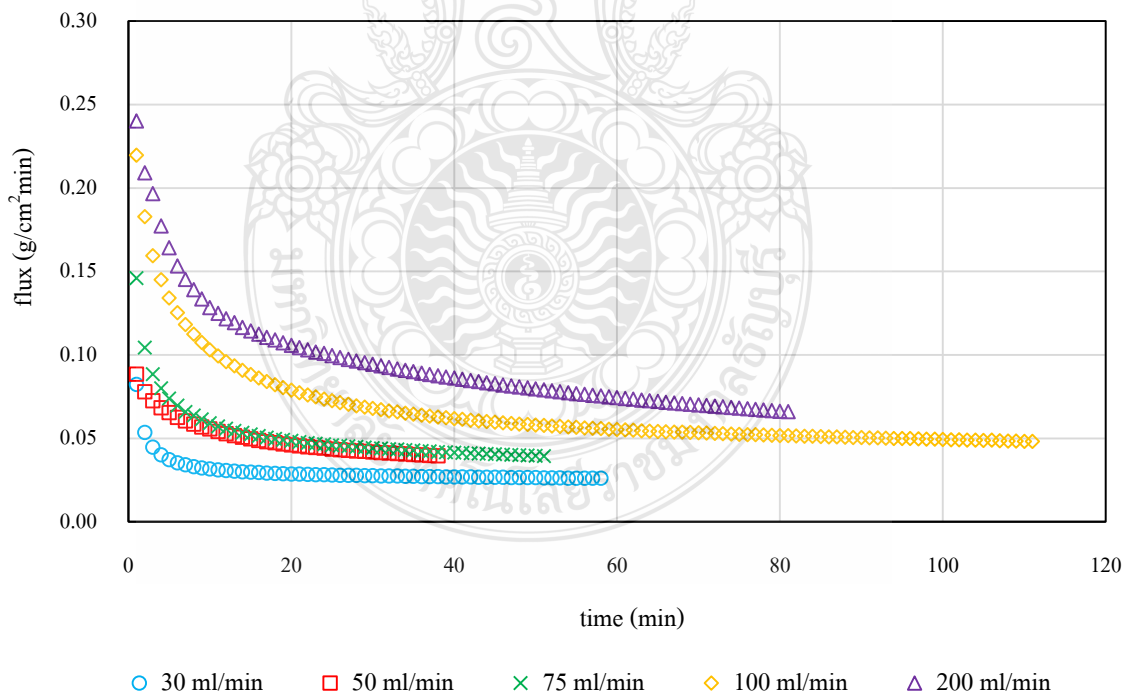
ปิดเรกกูเรเตอร์ที่หัวท่อในโตรเจน โดยการหมุนเรกกูเรเตอร์ทวนเข็มนาฬิกา
จนแน่น คลายเกลียวด้านบนของถังสารป้อนที่เชื่อมไปยังท่อในโตรเจน ให้ทำเบาๆ จะได้ยินเสียงแก๊ส
รั่วออกมาในระยะเวลาสั้นๆ ให้รอจนเสียงหยุดลง แสดงว่าแก๊สที่อยู่ในท่อออกไปจนหมดแล้ว
จากนั้นไขน็อตทุกตัวออก ทำความสะอาดซินเทอเมมเบรนด้วยเครื่อง โซดิเคต ล้างชุดการกรองด้วยน้ำ
สะอาด เพื่อกำจัดสารแขวนลอย จุลินทรีย์ และอื่นๆที่ติดค้างอยู่ภายในเมมเบรน

บทที่ 4

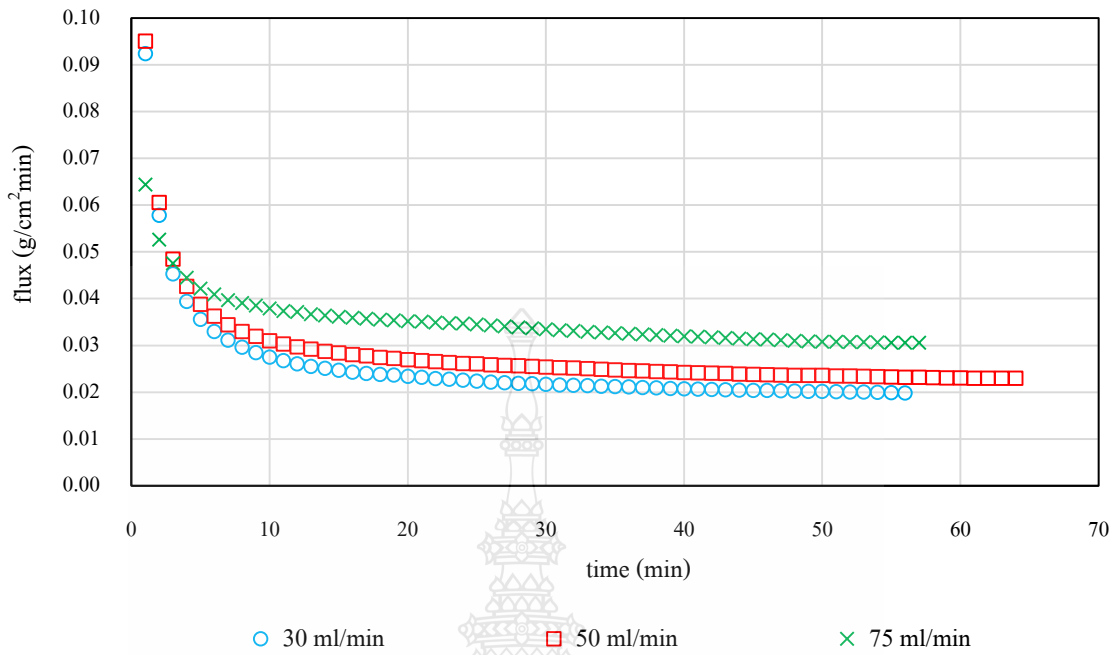
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

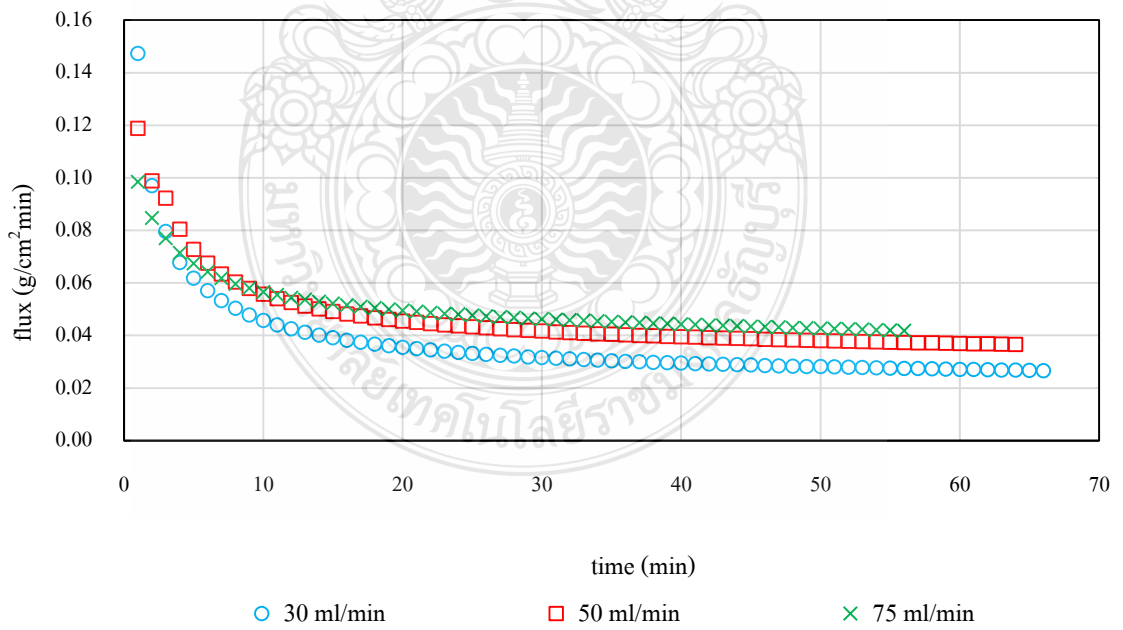
จากรูปที่ 4.1-4.4 แสดงค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตของเมมเบรนชนิดเดียวกัน อัตราการไหลต่างกัน พบว่าเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ฟลักซ์เพอร์มิเอตมีค่าสูงขึ้นตามไป ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการไหลสูง สามารถกวาดอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนได้มากกว่า ความต้านทานการไหลที่ผิวหน้าเมมเบรนจึงลดลง ซึ่งเป็นเช่นนี้ทั้งเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ผลการทดลองดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ F. Javier Benitez (2006) [39] และคณะที่ได้ทำการทดลองการกรองน้ำเสีย โดยใช้เมมเบรนสองระดับคือไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความดันตกคร่อมเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตของระบบเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



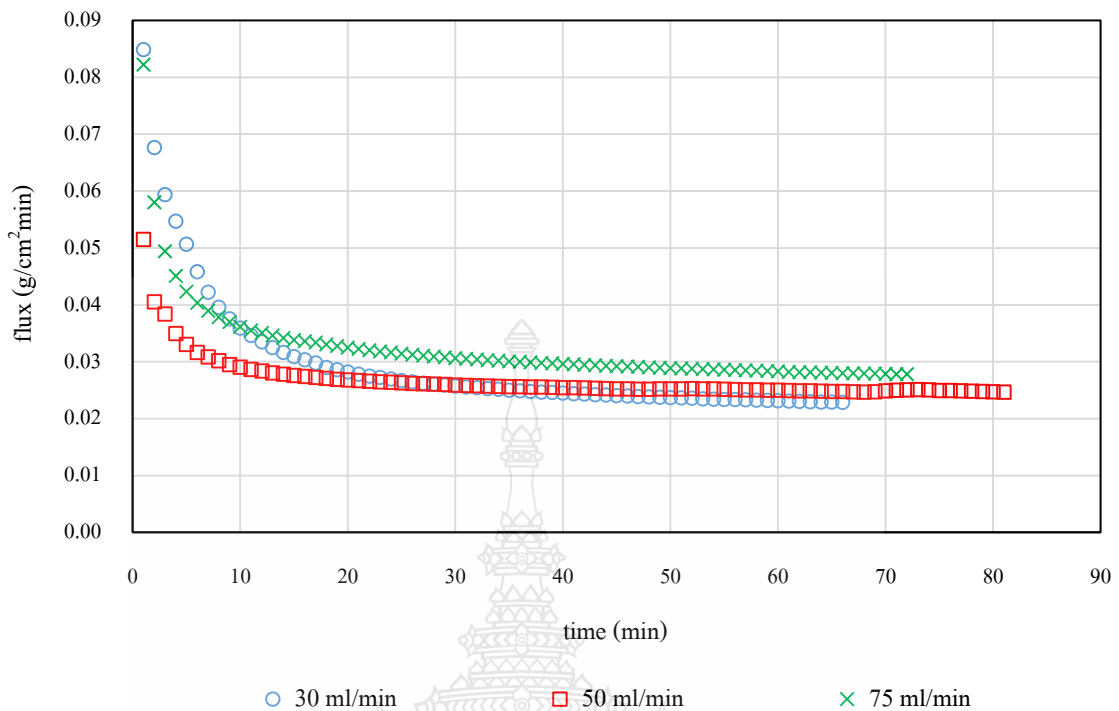
รูปที่ 4.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของสารละลายไฮโดรไลเซตที่เมมเบรนขนาดรูพรุน $0.2 \mu\text{m}$ (PES0.2)



รูปที่ 4.2 พลิกซ์เพอร์มิเอตของสารละลายไฮโดรไลเซตของเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง 500 kDa (PES500)

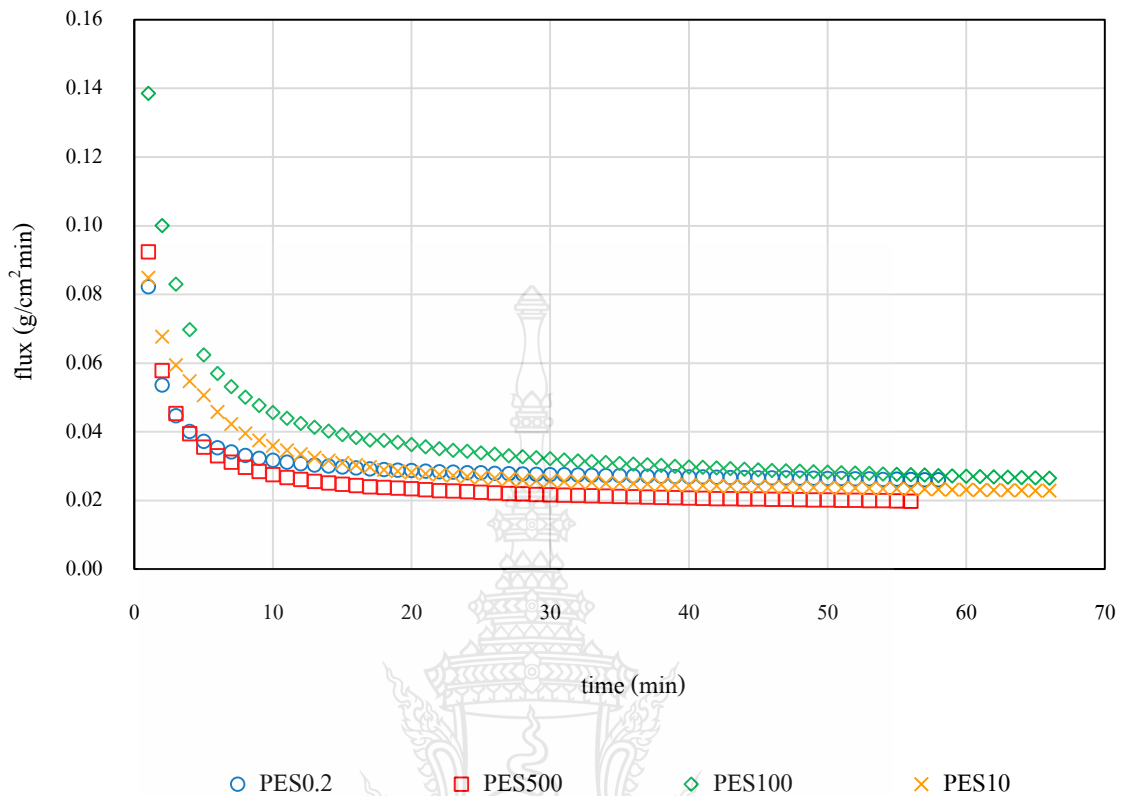


รูปที่ 4.3 พลิกซ์เพอร์มิเอตของสารละลายไฮโดรไลเซตของเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง 100 kDa (PES100)



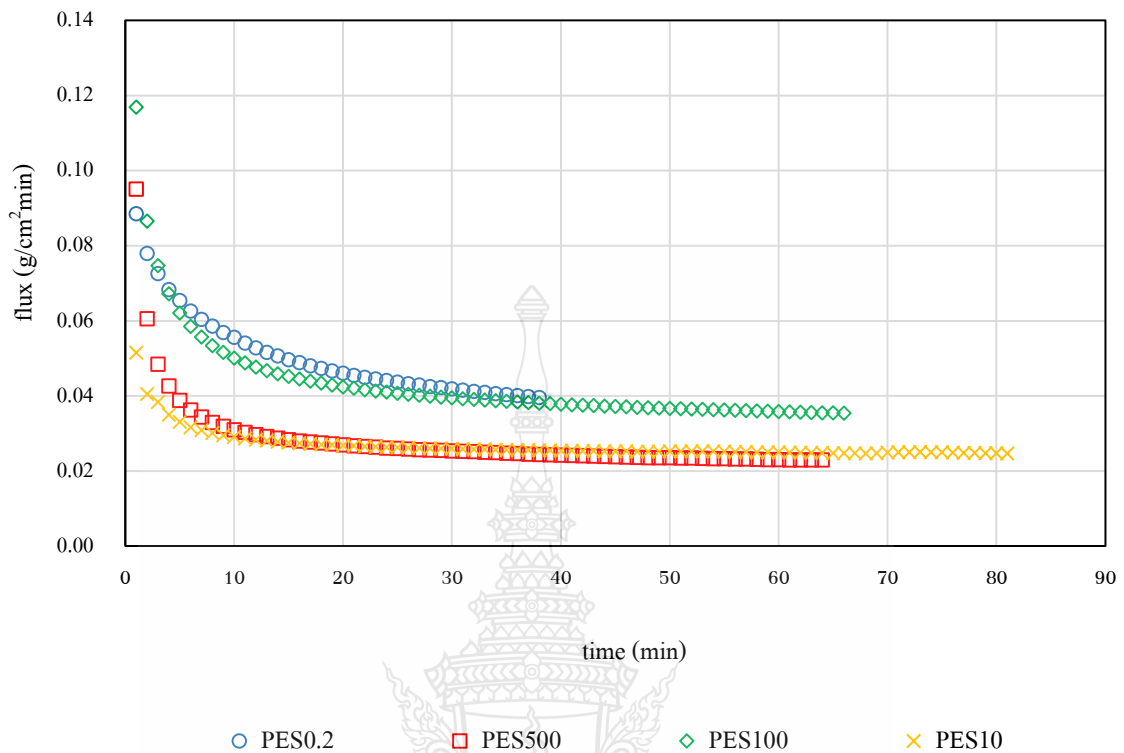
รูปที่ 4.4 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของสารละลายไฮโดรไลเซตของเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง 10 kDa (PES10)

เมื่อพิจารณาฟลักซ์เพอร์มิเอตของเมมเบรนต่างชนิดกัน อัตราการไหลเดียวกัน ผลการทดลองที่อัตราการไหล 30 ml/min พบว่าค่าฟลักซ์ของเมมเบรน PES100 ให้ค่าฟลักซ์สูงสุด รองลงมาคือ PES0.2, PES10 และต่ำที่สุดคือ PES500 (แสดงดังรูปที่ 4.5) ทั้งนี้เนื่องจาก PES100 กลไกการเกิดฟลัวลิ่งของอนุภาคส่วนใหญ่จะมีสาเหตุมาจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรน ความต้านทานการไหลจึงมีค่าน้อยส่งผลให้ค่าฟลักซ์ที่ PES100 สูงที่สุด ในขณะที่ PES500 มีขนาดรูพรุนสูงกว่าจึงมีโอกาสเกิดการอุดตันภายในรูพรุนของอนุภาคมากกว่าส่งผลให้เกิดการต้านทานการไหล ประกอบกับอัตราการไหลที่มีค่าต่ำความต้านทานการไหลจึงมีค่าสูงเมื่อเทียบกับเมมเบรน PES10 ที่มีรูพรุนเล็กกว่าแต่ความต้านทานอนุภาคเกิดขึ้นเพียงแค่ว่าที่ผิวหน้าค่าฟลักซ์ของ PES10 จึงมีค่าสูงกว่า และเมื่อพิจารณาที่เมมเบรน PES0.2 ที่มีขนาดรูพรุนเมมเบรนใหญ่ที่สุดจึงทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปนรูพรุนได้อย่างสะดวก ทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อยแต่น้อยกว่าที่ PES500



รูปที่ 4.5 ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่อัตราการไหล 30 ml/min

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนที่ต่างกันที่อัตราการไหล 50 มิลลิตร/นาที่พบว่าเมมเบรนชนิด PES100 และ PES0.2 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่สูงใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมมเบรน PES500 ให้ค่าฟลักซ์ที่ต่ำใกล้เคียงกับ PES10 (แสดงดังรูปที่ 4.6) ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรน PES500 น่าจะเกิดการอุดตันภายในรูพรุนเช่นเดียวกันกับที่อัตราการไหล 30 มิลลิตร/นาที่ จึงเกิดการต้านทานการไหล ซึ่ง PES100 มีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าฟาล์วสิ่งส่วนใหญ่ น่าจะมาจากการเกาะตัวของผิวหน้าเมมเบรนมากกว่าการอุดตันภายในรูพรุน ความต้านทานการไหลจึงน้อยกว่าส่งผลให้ค่าฟลักซ์มีค่าสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเมมเบรน PES500 และ PES0.2 ที่มีรูพรุนใหญ่ที่สุดอนุภาคจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนไปได้สะดวกทำให้การเกาะที่ผิวและภายในรูพรุนเกิดขึ้นได้น้อยกว่า และเมื่อเทียบกับเมมเบรน PES10 ซึ่งมีขนาดรูพรุนเล็กที่สุด ดังนั้นความต้านทานการไหลจึงสูงกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ ดังนั้นค่าฟลักซ์เมมเบรนจึงมีค่าต่ำเช่นกัน

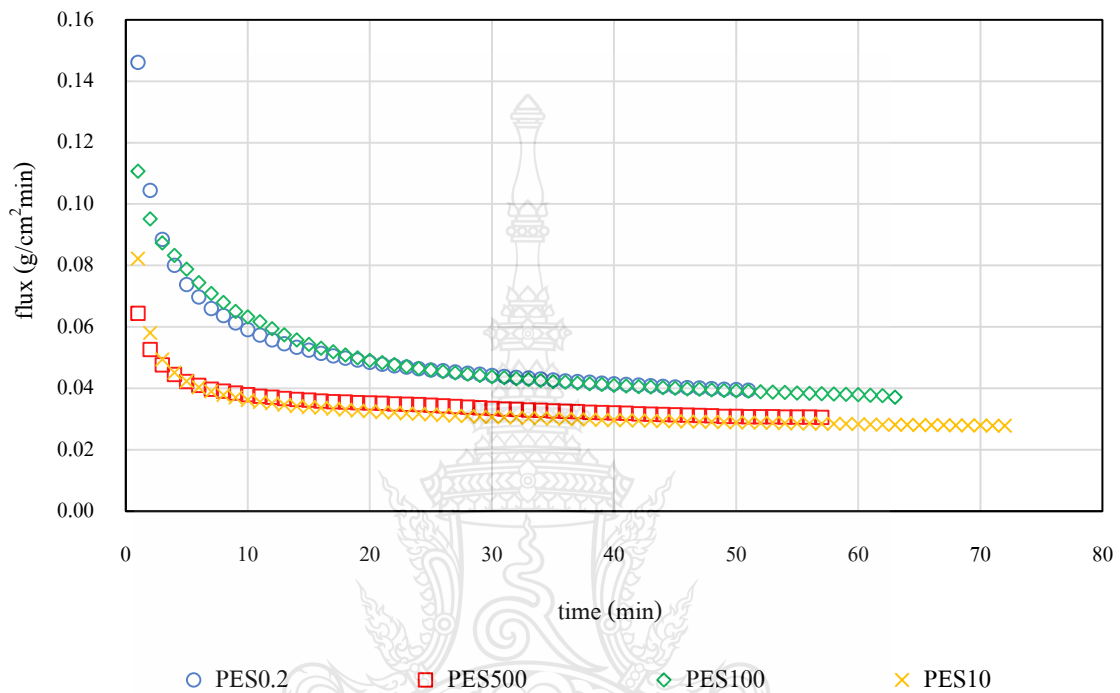


รูปที่ 4.6 ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่อัตราการไหล 50 ml/min

ที่อัตราการไหล 75 มิลลิเมตร/นาที จากกราฟรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า PES100 ให้ค่าฟลักซ์สูงสุดใกล้เคียงกับ PES0.2 เนื่องจากอัตราการไหลสูงขึ้นทำให้ความต้านทานการไหลลดลง กล่าวได้ว่า อัตราไหลเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PES500 และ PES10 ที่ PES10 มีค่าฟลักซ์ต่ำกว่า PES500 เนื่องจากอัตราการไหลสูงทำให้ชั้นฟอสฟอรัสลดลงทำให้อนุภาคถูกกวาดจากผิวหน้าเมมเบรนได้เร็ว ความต้านทานการไหลจึงลดลง สำหรับเมมเบรน PES10 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตต่ำสุดทั้งนี้ก็เป็นเพราะขนาดรูพรุนที่เล็กสุดนั่นเอง

จากผลการทดลองในข้อที่ 4.2.1-4.2.3 ก่อนข้างเป็นไปในทิศทางเดียวกันและได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Carlos Carbonell-Alcaina และคณะ (2018) [40] ที่ได้ทำการทดลองกรองน้ำมันโดยใช้เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ UH030 และ UP005 ตามลำดับ (30 และ 5 kDa) พบว่าที่ความดัน 1 bar เมมเบรน UH030 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตต่ำกว่า UP005 ถึงแม้ว่าน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองจะมากกว่าทั้งนี้เป็นเพราะกลไกการเกิดฟอสฟอรัส

ของ UH030 เป็นแบบการอุดตันภายในรูพรุนเมมเบรนซึ่งส่งผลให้ความต้านทานการไหลของเมมเบรนสูง จึงทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าต่ำลง ในขณะที่กลไกการเกิดฟาล์วของ UP005 เป็นเพียงการอุดตันที่ผิวหน้าของเมมเบรน

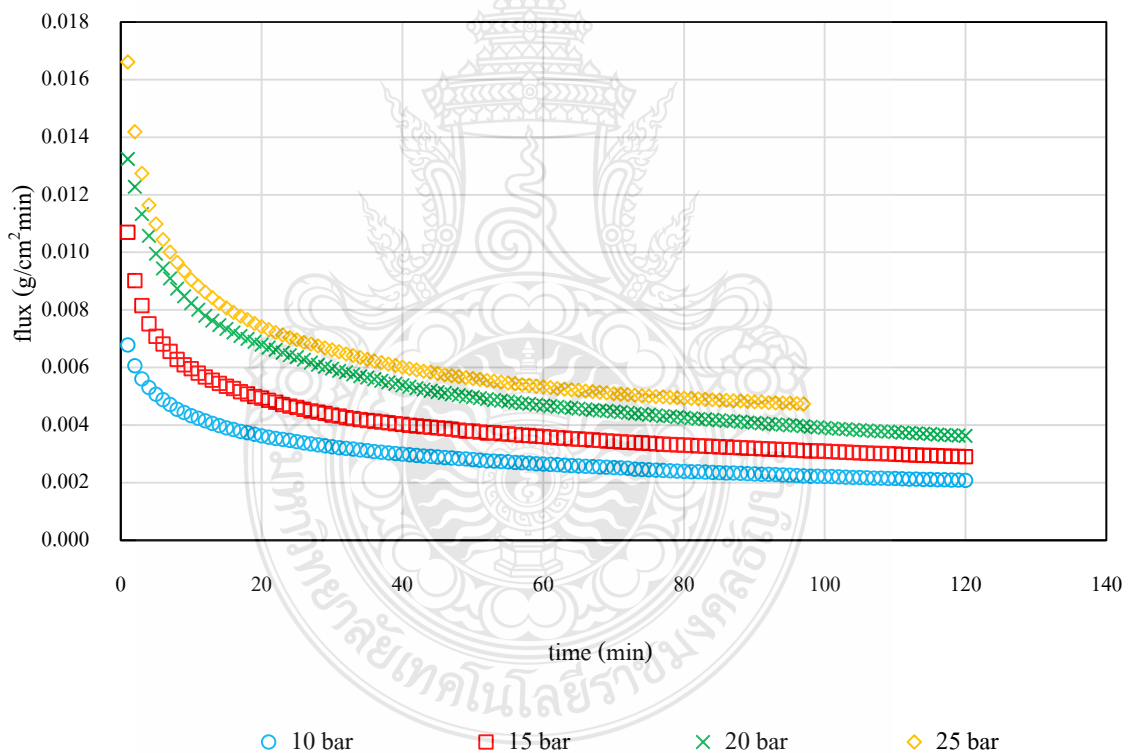


รูปที่ 4.7 ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่อัตราการไหล 75 ml/min

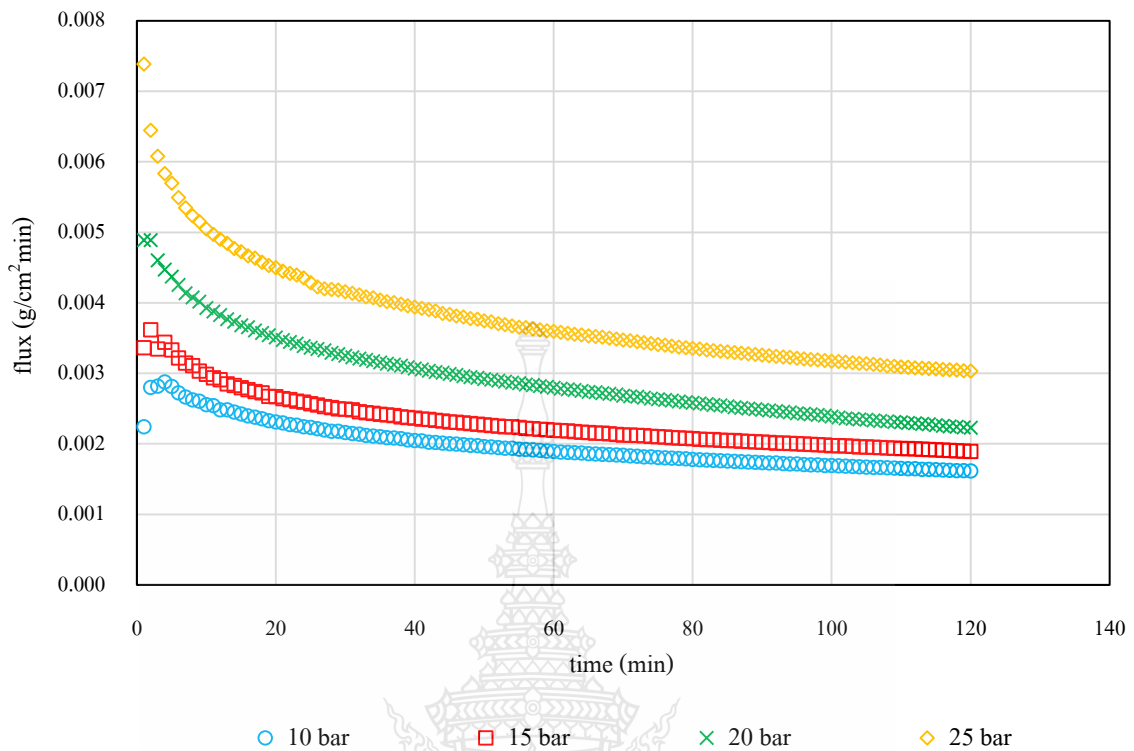
4.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน

จากรูปที่ 4.8-4.9 แสดงค่าการลดลงของฟลักซ์เพอร์มิเอตของการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันในช่วงเริ่มต้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัว พบว่าตอนเริ่มต้นมีการลดลงอย่างรวดเร็วของฟลักซ์เพอร์มิเอต ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดโพลาไรเซชันความเข้มข้นควบคู่กับการเกิดฟาล์ว และเมื่อเปรียบเทียบที่ความดันต่างกันจะพบว่าที่ความดันสูงจะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับที่ความดันต่ำเป็นเพราะที่ความดันสูงทำให้เกิดการผลึกอนุภาคไปที่ผิวหน้าเมมเบรนได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ฟลักซ์เพอร์มิเอตเริ่มต้นที่ความดันสูง (25 bar) ของเมมเบรน NP030 มีลักษณะคล้ายกับโปรไฟล์ฟลักซ์ของเมมเบรน NP010 อย่างไรก็ตาม โปรไฟล์ที่ความดันต่ำ (10, 15, และ 20

bar) ฟลักซ์เพอร์มิเอตมีลักษณะแตกต่างกันนั้นคือในตอนเริ่มต้นจะมีสภาวะฟลักซ์เพิ่มขึ้นจนถึงสูงสุด และค่อยๆลดลงอย่างช้าๆจนเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เป็นเพราะเมมเบรน NP030 มีความแน่นกว่า NP010 ดังนั้นการอุดตันของอนุภาคภายในรูพรุนมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยกว่า การซึมผ่านจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่า ประกอบกับระบบดำเนินการในสภาวะความดันต่ำจึงทำให้การเกิดฟอสฟอรัสในรูพรุนเกิดขึ้นได้ช้ากว่า ซึ่งผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anders F. Vikbjerg และคณะ (2006) [41] ซึ่งทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตด้วยระบบการกรองแบบปิดตาย พบว่าที่ความดันเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์คงตัวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความดันค่าเดียวกัน น้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองของเมมเบรนสูงจะให้ค่า ฟลักซ์สูงตามไปด้วย



รูปที่ 4.8 ฟลักซ์สารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนชนิด NP010 ที่ความดัน 10, 15, 20 และ 25 bar

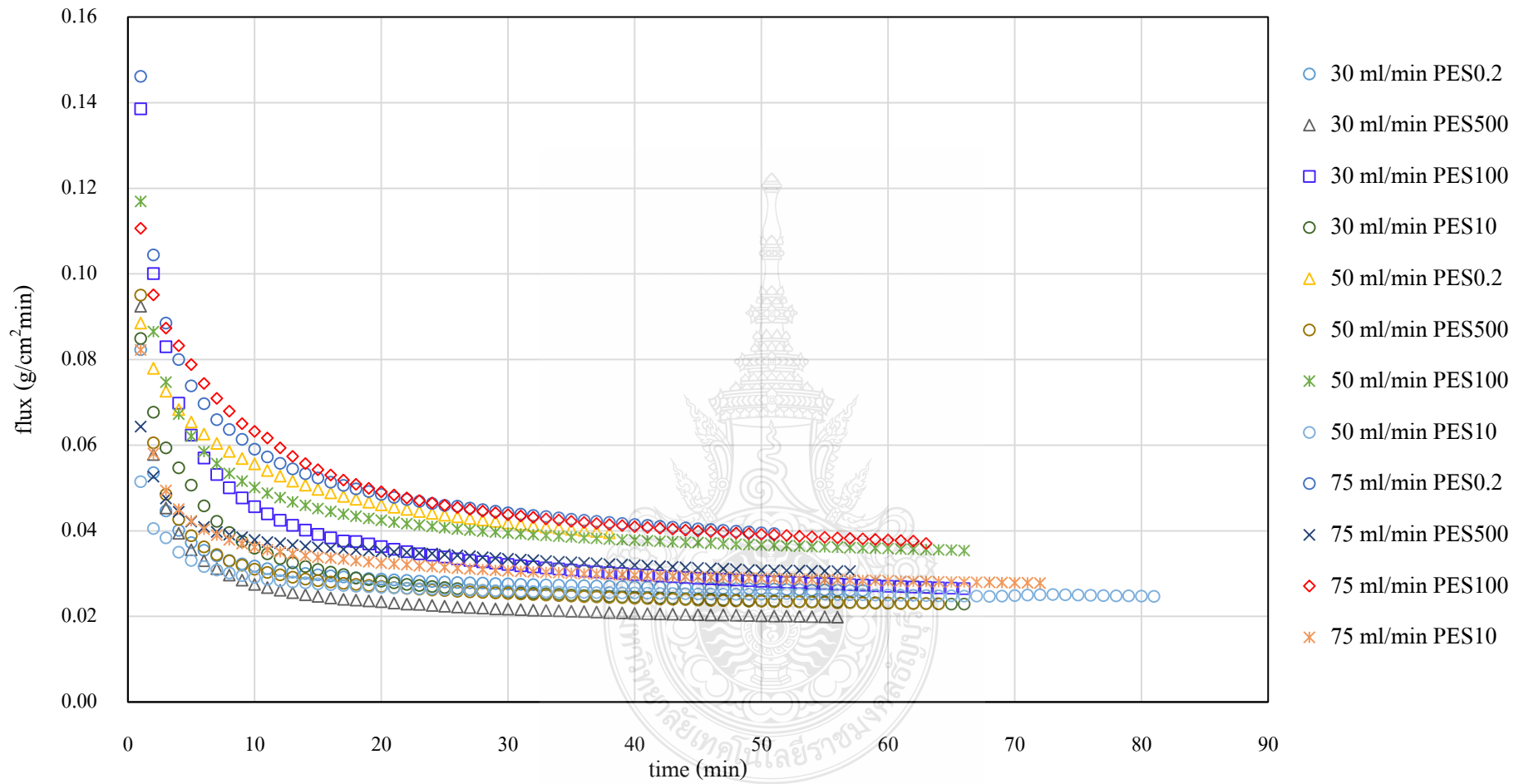


รูปที่ 4.9 ฟลักซ์สารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนชนิด NP030 ที่ความดัน 10, 15, 20 และ 25 bar

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพเมมเบรนในการแยกสารละลายไฮโดรไลเซทภาพรวม

4.3.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอตสำหรับการกรองระดับไมโครและอัลตราฟิลเตรชัน

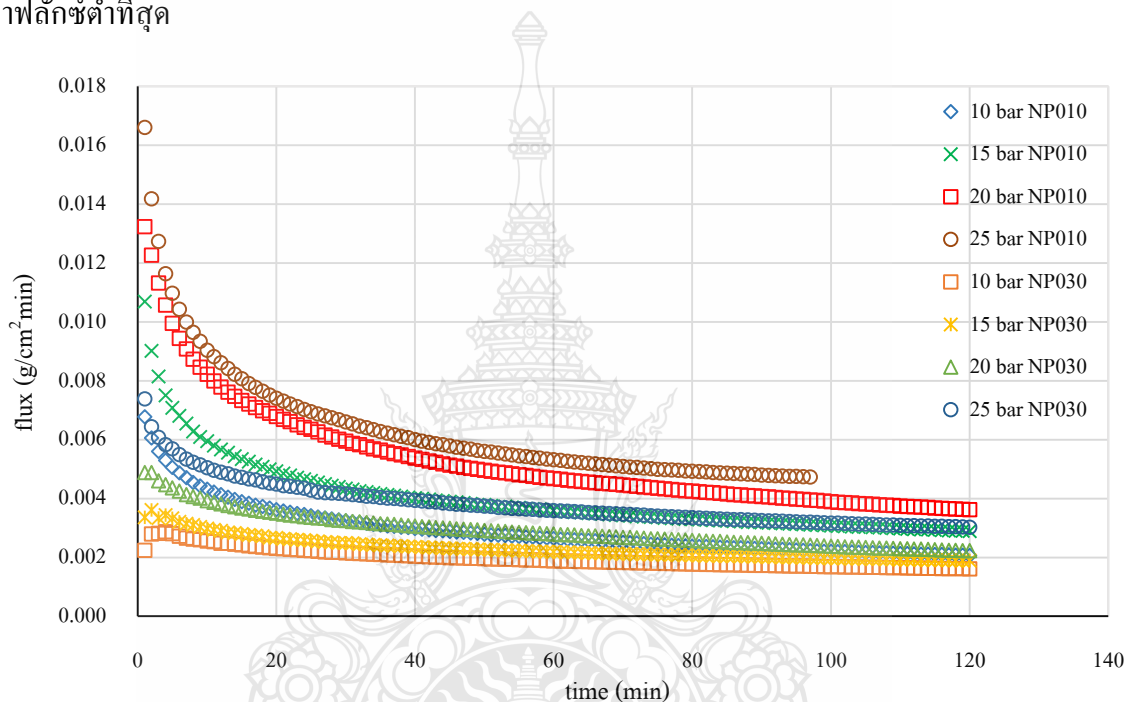
จากการเปรียบเทียบการกรองทั้งหมด พบว่า เมมเบรน PES0.2 ที่อัตราการไหลสูงสุด ให้ค่า ฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงสุด อย่างไรก็ตามผลการทดลองความสามารถในการกักกันให้ค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในช่วง 30-75 ml/min พบว่า PES100 ให้ค่าฟลักซ์สูงสุดที่อัตราการไหล 75 ml/min โดยให้ค่าใกล้เคียงกับ PES0.2 ที่ความเร็ว 75 ml/min เช่นกัน รองลงมาคือ PES300 ที่อัตราการไหล 75 ml/min, PES100 ที่อัตราการไหล 50 ml/min, PES10 ที่อัตราการไหล 75 ml/min, PES500 ที่อัตราการไหล 75 ml/min, PES100 ที่อัตราการไหล 30 ml/min, PES300 ที่อัตราการไหล 30 ml/min, PES10 ที่อัตราการไหล 50 ml/min, PES500 ที่อัตราการไหล 50 ml/min, และ PES500 ที่อัตราการไหล 50 ml/min ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตต่ำที่สุดตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ฟลักซ์เพอร์มิเอตสำหรับการกรองระดับไมโครและอัลตราฟิลเตรชันภาพรวม

4.3.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอตสำหรับการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมมเบรน NP010 ที่ความดัน 25 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงสุดเมื่อเทียบกับผลการทดลองทั้งหมด รองลงมาคือ NP010 ที่ความดัน 20 บาร์, เมมเบรน NP010 ที่ความดัน 15 บาร์มีค่าฟลักซ์ใกล้เคียงกับ NP030 ที่ความดัน 25 บาร์, เมมเบรน NP010 ที่ความดัน 10 บาร์ให้ค่าฟลักซ์ใกล้เคียงกับ NP030 ที่ความดัน 20 บาร์ และ เมมเบรน NP030 ที่ความดัน 10 บาร์ให้ค่าฟลักซ์ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.11 ฟลักซ์เพอร์มิเอตสำหรับการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันภาพรวม

4.4 ประสิทธิภาพการกักกันสารละลายไฮโดรไลเซต

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการกักกันเซลล์ูเลสแอกติวิตี น้ำตาล และเอทานอลในสารละลายไฮโดรไลเซตของเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า เมมเบรน PES10 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองน้อยที่สุด ให้ค่าการกักกันเซลล์ูเลส แอกติวิตีสูงที่สุด คือ 67.512% รองลงมาคือที่ PES100, PES500, และ PES0.2 ซึ่งให้ค่าการกักกันเซลล์ูเลส แอกติวิตีเท่ากับ 51.6%, 32.405%, และ 22.606% ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าที่เมมเบรนน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองต่ำจะมีขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่เล็กจึงทำให้ตัวทำละลายสามารถเคลื่อนผ่านไปยังกระแสเพอร์มิเอตได้ยากกว่าเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองสูง กล่าวคือ ความสามารถในการกักกันมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดรู

พรุณ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการกักกันเซลล์แอสแอกติวิตี น้ำตาล และเอทานอลพบว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันสามารถกักกันเซลล์แอสได้ดีที่สุด รองลงมาคือ น้ำตาลและเอทานอล ตามลำดับ เนื่องจากน้ำหนักของเซลล์แอสอยู่ในช่วง 10 – 1000 kD ซึ่งอยู่ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองของเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันที่เราเลือกทำการศึกษา เซลล์แอสส่วนหนึ่งจึงถูกกักกันได้มากพอสมควรจากกระบวนการนี้ ซึ่งแตกต่างจากน้ำตาลและเอทานอลที่อยู่ในสารละลายไฮโดรไลเซตที่ถูกกักกันจากกระบวนการนี้ได้เพียงเล็กน้อย (แสดงดังตารางที่ 4.1) เพราะน้ำตาลและเอทานอลมีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่าเซลล์แอสและมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองของเมมเบรน เช่นเดียวกับที่เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันจึงสามารถกักกันเซลล์แอสที่หลงเหลือจากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันได้สูง และสามารถกักกันน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากกว่าด้วยเช่นกัน อีกทั้งยังสามารถกักกันเอทานอลได้ในปริมาณที่มากพอสมควร แต่เมื่อทำการพิจารณาค่าการกักกันเทียบกับเวลาการกรอง พบว่า เมมเบรน PES100 จะมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการนำกลับเซลล์แอส เนื่องจากให้ค่าการกักกันสูงเมื่อเทียบกับระยะเวลาการกรอง เช่นเดียวกับกับการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน เมมเบรน NP010 เหมาะสำหรับการนำกลับน้ำตาลรีดิวซ์

ตารางที่ 4.1 ค่าการกักกันของสารละลายไฮโดรไลเซต

เมมเบรน	%การกักกัน			RATE
	เซลล์แอส แอคติวิตี	น้ำตาล	เอทานอล	
PES10	67.5	36.9	30.7	83.33
PES100	51.6	26.1	20.0	93.81
PES500	32.4	21.6	8.9	58.91
PES0.2	22.6	15.8	1.9	56.5
NP010	97.5	47.4	31.9	47.88
NP030	99.0	50.7	38.4	42.25

4.5 กลไกการเกิดฟอสฟอรัสด้วยแบบจำลองเซอร์เมียร์

จากข้อมูลที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ตามแบบจำลองเซอร์เมียร์ พบว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่อาจจะเกิดกลไกฟอสฟอรัสได้ทั้ง 4 แบบ อย่างไรก็ตาม

กลไกการเกิดฟั้วลิ่งแบบ cake formation ยังคงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ intermediate blocking, standard blocking และ complete blocking ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นเช่นนี้ทุกอัตราการไหลและทุกชนิดเมมเบรน ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดลองดังกล่าวพบว่าการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันให้ค่า R^2 การอุดตันภายในรูพรุน (CBM) โดยรวมสูงกว่าการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรูพรุนที่กว้างกว่าเพิ่มโอกาสการเกิดการอุดตันภายในรูพรุนได้มากกว่าเช่นเดียวกันกับการอุดตันแบบ IBM ในขณะที่การอุดตันแบบ SBM ซึ่งอธิบายลักษณะการกรองสารละลายขนาดเล็กรูพรุนของเมมเบรน โดยอนุภาคสามารถผ่านรูพรุนไปได้และมีอนุภาคบางส่วนถูกคุดจับอยู่ภายในรูพรุนทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของเมมเบรน ให้ค่า R^2 ของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันสูงกว่านาโนฟิลเตรชันเนื่องจากเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันมีขนาดใหญ่กว่าสารละลายสามารถผ่านรูพรุนเข้าไปได้มากกว่าการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน โอกาสเกิดการอุดตันแบบ SBM จึงมากกว่า และการเกิดการอุดตันแบบชั้นเล็ก (CFM) ให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกันทั้งแบบอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่อแบบจำลองเฮอร์เมียร์

เมมเบรน	อัตราการไหล/ความดัน	R^2			
		CBM	IBM	SBM	CFM
PES500	30 ml/min	0.918	0.959	0.941	0.983
	50 ml/min	0.918	0.945	0.933	0.969
	75 ml/min	0.917	0.935	0.926	0.950
PES100	30 ml/min	0.931	0.970	0.954	0.990
	50 ml/min	0.959	0.977	0.969	0.987
	75 ml/min	0.958	0.974	0.967	0.986
PES10	30 ml/min	0.951	0.971	0.963	0.980
	50 ml/min	0.837	0.858	0.848	0.874
	75 ml/min	0.911	0.943	0.928	0.967
NP010	10 bar	0.875	0.956	0.921	0.994
	15 bar	0.771	0.910	0.852	0.976
	20 bar	0.812	0.925	0.877	0.979
	25 bar	0.808	0.911	0.866	0.969

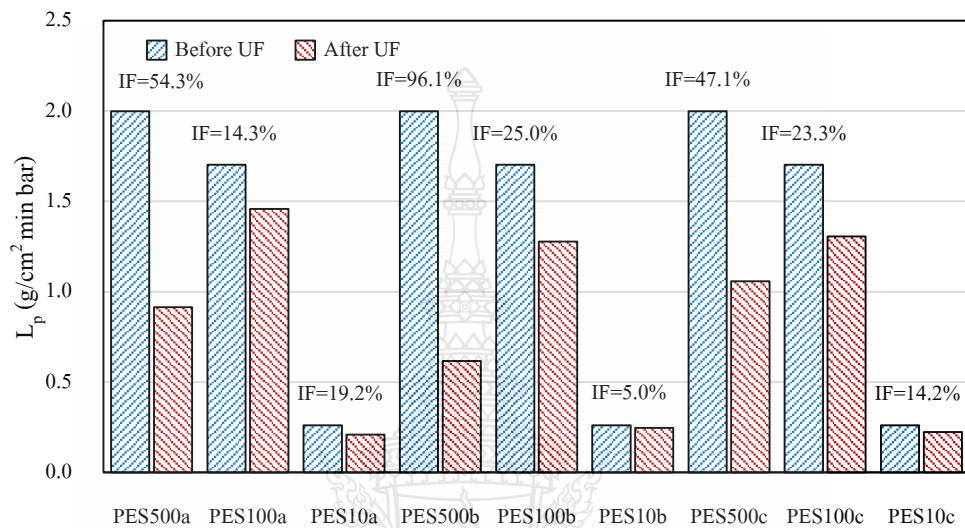
เมมเบรน	อัตราการไหล/ความดัน		R ²		
	ไหล/ความดัน	CBM	IBM	SBM	CFM
NP030	10 bar	0.918	0.954	0.938	0.979
	15 bar	0.886	0.934	0.912	0.968
	20 bar	0.931	0.975	0.956	0.994
	25 bar	0.870	0.936	0.906	0.976

4.6 ฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling, IF)

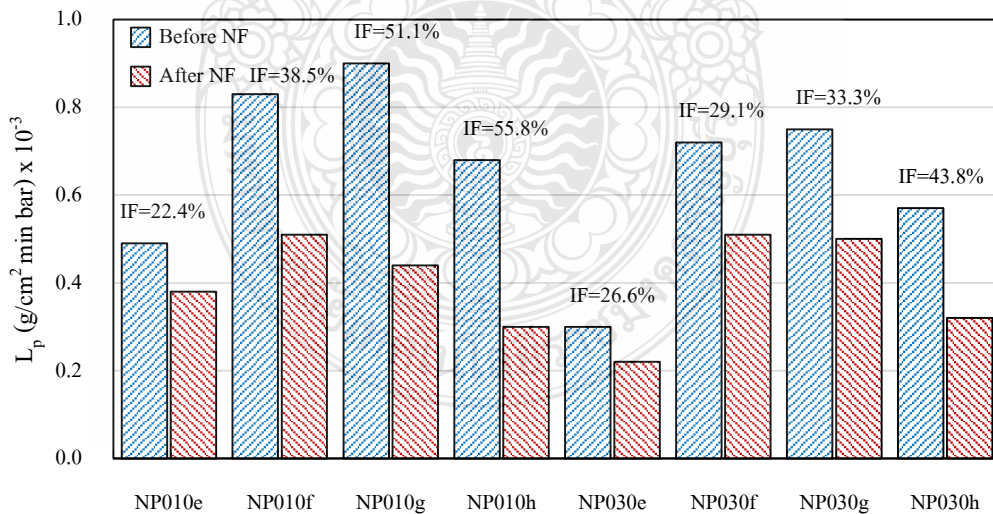
จากการวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาล์วล้างตามแบบจำลองของเฮอร์เมียร์พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดฟาล์วล้างทั้ง 4 แบบ แต่เนื่องจากการทดลองการกรองเราไม่ต้องการให้เกิดฟาล์วล้างที่อุดตันภายในรูพรุนหรือที่เรียกว่าฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้มากที่สุด ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากฟาล์วล้างชนิดนี้ทำความสะอาดยาก ต้องใช้สารเคมีและระยะเวลาในการทำสะอาดมากกว่าฟาล์วล้างแบบอื่นๆ ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้เพิ่มเติมเพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกเมมเบรนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการนำกลับเซลล์และน้ำคาลรีดิษฐ์

ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 30 ml/min เมมเบรน PES100 ให้ค่าฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้ (IF) ต่ำที่สุด ในขณะที่เมมเบรน PES500 ให้ค่า IF สูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต ฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้ยังขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนเช่นกัน นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ค่า IF แปรผันตรงกับโมเลกุลตัดการกรองอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าขนาดอนุภาคมีโอกาสที่จะกักกันอนุภาคไว้ที่ผิวหน้าเมมเบรน ในขณะที่เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่มีแนวโน้มให้อนุภาคไหลเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนได้มากกว่าจึงทำให้ค่า IF สูงกว่า และเมื่อพิจารณาการเกิดฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้ของเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน (รูปที่ 4.13) พบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า (NP030) เกิดการอุดตันแบบผันกลับไม่ได้ต่ำกว่า เช่นเดียวกับเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน แต่เมื่อพิจารณาจากค่าความดันคร่อมเมมเบรนพบว่า ที่ความดันสูงขึ้น ค่า IF สูงขึ้นตาม ทั้งนี้เป็นเพราะระบบการกรองแบบปิดตายนั้น เมื่อความดันสูงขึ้นจะผลักดันอนุภาคเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนเมมเบรนได้มากกว่าความดันต่ำ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Benkun Qi และคณะ (2012) [6] ทำการศึกษาการเกิดฟาล์วล้างแบบผันกลับไม่ได้กับ

เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน 3 ขนาด คือ PES5, PES10 และ PES30 พบว่า เมมเบรนขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุด (PES30) ให้เปอร์เซ็นต์การเกิดฟาล์วสิ่งแบบผันกลับไม่ได้สูงที่สุดเช่นเดียวกับเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน เนื่องจากที่เมมเบรนขนาดรูพรุนใหญ่สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ในการอุดตันภายในรูพรุนของอนุภาคได้สูงกว่าเมมเบรนที่ขนาดรูพรุนเล็ก



รูปที่ 4.12 ฟาล์วสิ่งแบบผันกลับไม่ได้ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (โดยที่ a, b, c คือ อัตราการไหล 30, 50, 75 ml/min ตามลำดับ)



รูปที่ 4.13 ฟาล์วสิ่งแบบผันกลับไม่ได้ของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน (โดยที่ d, e, f, g คือ ความดัน 10, 15, 20 และ 25 บาร์ ตามลำดับ)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาผลของค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสำหรับกระบวนการกรองแบบไหลขวางพบว่า เมมเบรน PES100 ให้ค่าฟลักซ์สูงที่สุดที่อัตราการไหล 75 ml/min ซึ่งถือว่าเหมาะสมสำหรับการกรองสารละลายไฮโดรไลเซต เนื่องจากให้ค่าฟลักซ์สูงและค่าการกักกันที่มากพอสมควรเมื่อเทียบกับระยะเวลาการกรอง การเกิดการอุดตันภายในรูพรุนมีค่าต่ำ

5.1.2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์เพอร์มิเอตกับอัตราการไหลสำหรับกระบวนการกรองแบบไหลขวาง พบว่าที่อัตราการไหลสูงจะให้ค่าฟลักซ์สูงกว่าที่อัตราการไหลต่ำ และอัตราการไหลควรอยู่ในช่วง 30-75 ml/min เนื่องจากว่าที่อัตราการไหลที่สูงกว่านี้ไม่สามารถกักกันสารละลายไฮโดรไลเซตได้

5.1.3 ค่าฟลักซ์สำหรับกระบวนการกรองแบบปิดตายพบว่าแปรผันตรงกับความดันตกคร่อมเมมเบรน กล่าวคือ ที่ความดัน 25 บาร์จะให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่สูงสุดรองลงมาคือ 20, 15 และ 10 บาร์ ตามลำดับ และเมมเบรน NP010 เหมาะสำหรับการกักกันน้ำตาลรีดิวซ์ เนื่องจากให้ค่าฟลักซ์สูงที่สุด และให้ค่าการกักกันน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำกว่า NP030 เพียงเล็กน้อย แต่อาจจะเกิดการอุดตันภายในรูพรุนสูงเนื่องจากเป็นกระบวนการกรองแบบปิดตาย

5.1.4 การกักกันเซลลูโลส น้ำตาล และเอทานอล สัมพันธ์กับค่าน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองของเมมเบรน ทั้งการกรองระดับอัตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน คือ ที่น้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองต่ำจะสามารถกักกันได้ดีกว่าที่น้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองสูง (PES10 กักกันได้ดีกว่า PES100 PES500 และ PES0.2 ตามลำดับ และ NP030 กักกันได้ดีกว่า NP010)

5.1.5 กลไกการเกิดฟอสฟอรัสแบบผันกลับแปรผกผันตรงกับอัตราการไหลหรือความดันคร่อมเมมเบรน

5.1.6 การเลือกเมมเบรนควรเลือกจากน้ำหนักโมเลกุลสารละลายสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองของเมมเบรน เพื่อช่วยเพิ่มค่าฟลักซ์, ความสามารถการกักกัน และลดการเกิดฟาล์วลิ่ง

5.1.7 เมื่อพิจารณากลไกการเกิดฟาล์วลิ่งตามแบบจำลองของเซอร์เมียร์พบว่ามีการเกิดฟาล์วลิ่งทั้ง 4 แบบ แต่กลไกการเกิดฟาล์วลิ่งแบบ cake formation ยังคงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ intermediate blocking, standard blocking และ complete blocking ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการแยกเซลล์และน้ำตาลได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในขั้นตอนเดียว

5.2.2 การนำเทคโนโลยีเมมเบรนไปใช้ร่วมกับการบวนการแยกสารละลายไฮโดรไลเซตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้เมมเบรนแยกเอทานอลที่อยู่ในสารละลายดังกล่าวเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

5.2.3 เซลลูเลสที่ได้จากการกักกันของกระบวนการควรนำไปสู่กระบวนการหมักอีกครั้งเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์หลังจากผ่านกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

5.2.4 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาระบบเมมเบรนให้มีค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงตัวมีค่าสูงเทียบเท่าสภาวะเริ่มต้น เช่น การต่อระบบเมมเบรนแบบต่อเนื่องและสลับเพื่อกรองสารละลายในช่วงที่มีค่าฟลักซ์สูงเท่านั้น

5.2.5 ควรมีการคิดค่าใช้จ่ายเมื่อใช้กระบวนการนี้ในอุตสาหกรรมจริง เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างวิธีการนำกลับเซลล์ด้วยเมมเบรนกับวิธีการอื่น

บรรณานุกรม

- [1] Edgard Gnansounou, Arnaudv Dauriat. 2010. Techno economic analysis of lignocellulosic ethanol: review. *Bioresource Technology*. 101: 4980-4991.
- [2] Daniel G.Gomes, Sebastián SernaLoaiza, Carlos A.Cardona, Miguel Gama, Lucília Domingues. 2018. Insights into the economic viability of cellulases recycling on bioethanol production from recycled paper sludge. *Bioresource Technology*. 267: 347-355.
- [3] Xiangrong Chen, Benkun Qi, Yi Su, Yinhua Wan. 2011. Enzyme adsorption and recycling during hydrolysis of wheat straw lignocellulose. *Bioresource Technology*. 102, 3: 2881- 2889.
- [4] Kamyar Khoshnevisan, Faezeh Vakhshiteh, Mohammad Barkhi, Hadi Baharifare, Elah Poor-Akbar, Naeeme Zarig, Haralambos Stamatis, Abdol-Khalegh Bordbar. 2017. Immobilization of cellulase enzyme onto magnetic nanoparticles : Applications and recentadvances. *Molecular Catalysis*. 442: 66-73.
- [5] Guoqiang Chen, Weijie Song, Benkun Qi, Jianren Lu, Yinhua Wan. 2013. Recycling cellulase from enzymatic hydrolyzate of acid treated wheat straw by electro ultrafiltration. *Bioresource Technology*. 144: 186-193.
- [6] Benkun Qi, Jianquan Luo, Guoqiang Chen, Xiangrong Chen, Yinhua Wan. 2012. Application of ultrafiltration and nanofiltration for recycling cellulase and concentrating glucose from enzymatic hydrolyzate of steam exploded wheat straw. *Bioresource Technology*. 104: 466-472
- [7] Sonali Mohapatra, Chinmaya Mishra, Sudhansu S. Behera, Hrudayanath Thatoi. 2017. Application of pretreatment, fermentation and molecular techniques for enhancing bioethanol production from grass biomass – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 78: 1007–1032.
- [8] Cardona Eliana, Rios Jorge, Peña Juan, Rios Luis. 2014. Effects of the pretreatment method on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentability of the cellulosic fraction from elephant grass. *Fuel*. 118: 41–47.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] Bunthita Pensri, Pruk Aggarangsi, Thanongsak Chaiyaso, Nopakarn Chandet. Potential of Fermentable Sugar Production from Napier cv. Pakchong 1 Grass Residue as a Substrate to Produce Bioethanol. *Science Direct*. 89: 428 – 436.
- [10] Catherine Charcosset. 2010. Membrane processes in biotechnology: An overview. *Biotechnology Advances*. 24, 5: 482-492.
- [11] Rumpa Jutakanoke, Natchanun Leepipatpiboon, Vasana Tolieng, Vichien Kitpreechavanich, Teerapat Srinorakutara, Ancharida Akaracharanya. 2012. Sugarcane leaves: Pretreatment and ethanol fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biomass and Bioenergy*. 39: 283-289.
- [12] Sen Yang, Wenyong Ding, Hongzhang Chen. 2009. Enzymatic hydrolysis of corn stalk in a hollow fiber ultrafiltration membrane reactor. *Biomass and Bioenergy*. 33: 332-336.
- [13] Athanasios KGoulas, Petros G. Kapasakalidis, Haydn RSinclair, Robert Arastall, Alistair S Grandison. 2002. Purification of oligosaccharides by nanofiltration. *Journal of Membrane Science*. 209, 1: 321-335.
- [14] Dharmesh M. Kanani, Xinghua Sun, Raja Ghosh. 2008. Reversible and irreversible membrane fouling during in-line microfiltration of concentrated protein solutions. *Journal of Membrane Science*. 315: 1-10.
- [15] รุ่งตะวัน ศรีวิเศษ, อีรฟาน อับดุลเลาะ, เก่งกาจ จันทร์ทวีกุล. 2018. การศึกษาการหมักเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ด้วยจุลินทรีย์ผสม RT-P3. ปรินญาณิพนธ์บัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
- [16] Dumrong Leenanuruksa, 2522. การผลิตหญ้าแห้งเพื่อเลี้ยงโค กระบือจากหญ้าเนเปียร์. งานวิจัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [17] นิภาภรณ์ สีถาการ, 2008. จากเชื้อเห็ดสู่เชื้อเพลิง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://vcharkarn.com> (6 มิถุนายน 2561)
- [18] Yeast Extract, 2555. *Saccharomyces cerevisiae*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.pana-sonic.net> (6 มิถุนายน 2561)
- [19] รัชพล พะวงศรัตัน, 2558. กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจาก

บรรณานุกรม (ต่อ)

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,
มหาวิทยาลัยศิลปากร.

- [20] Daniel G. Gomes, Sebastián SernaLoaiza, Carlos A.Cardona, Miguel Gama, Lucília Domingue. 2018. Insights into the economic viability of cellulases recycling on bioethanol production from recycled papersludge. *Bioresource Technology*. 267: 347-355.
- [21] ขันทอง สุนทรภา, 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน [หนังสือ]
- [22] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, การกรองด้วยเยื่อ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/> (6 มิถุนายน 2561)
- [23] Nguyen N, Fargues C, Guiga W, Lameloise ML. 2015. Assessing nanofiltration and reverse osmosis for the detoxification of lignocellulosic hydrolysates. *Journal of Membrane Science*. 487:40-50.
- [24] Carlos Carbonell-Alcaina, Silvia Álvarez Blanco, María Amparo Bes Piá, José Antonio Mendoza-Roca, Laura Pastor-Alcañiz.,2018. Ultrafiltration of residual fermentation brines from the production of table olives at different operating conditions. *Journal of Cleaner Production*. 189: 662-672.
- [25] Nurul I, Amin HM, Mohammad AW, Markom M, Peng LC, Hilal N. 2010. Analysis of deposition mechanism during ultrafiltration of glycerinrich solutions. *Desalination*. 261:313-320.
- [26] Jacques H. 2010. Constant pressure blocking filtration laws: Application to power-law non Newtonian fluid. *Trans. Inst. Chem. Eng. Lond.* 1982;60:183-187.
- [27] Mitsuro Ishihara, Shoko Uemura, Noriko Hayashi, Jody Jellison, Kazumasa Shimizu. 1991. Adsorption and desorption of cellulase components during enzymatic hydrolysis of steamed shirakamba (*Betula platyphylla Skatchev*) wood. *Journal of Fermentation and Bioengineering*.72, 2: 96-100.

บรรณานุกรม (ต่อ)

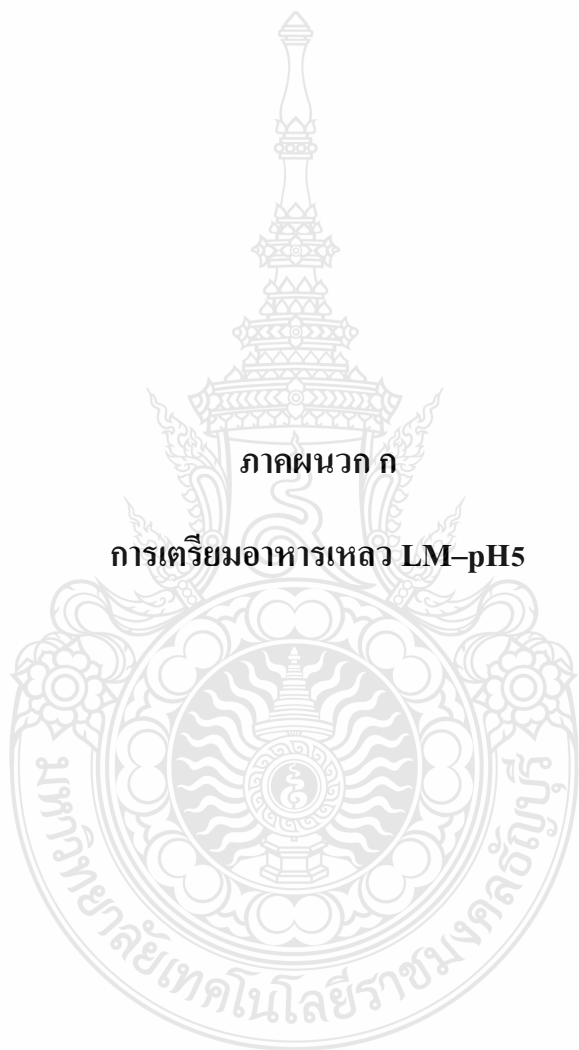
- [28] ธนพัฒน์ ลิพันธ์, อนุพงษ์ พิสงปราการ. 2014. การกรองกรดเซลลูเลสและน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคโนโลยีเมมเบรน. ปรียญยานิพนธ์บัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
- [29] Jianquan Luo, Luhui Ding, Benkun Qi, Michel Y. Jaffrin, Yinhua Wan. 2010. A two-stage ultrafiltration and nanofiltration process for recycling dairy wastewater. *Bioresource Technology*. Vol.102 (August) 7437-7442.
- [30] Reddy K.V., Madhusweta Das. 2005. Filtration resistances in non-thermal sterilization of green coconut water. *Journal of Food Engineering*. Vol.69 (August) 381-385.
- [31] จิรพัฒน์ กิจสุวรรณ. 2014. การรีไซเคิลกรดเซลลูเลสและจุลินทรีย์ด้วยการกรองในระดับอัลตราฟิลเตรชันเพื่อการผลิตเอทานอล. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
- [32] Cecilia Pagliero, Miguel Mattea, Nelio Ochoa, José Marchese. 2007. Fouling of polymeric membranes during degumming of crude sunflower and soybean oil. *Journal of Food Engineering*. Vol.78 (January) 194-197.
- [33] Indok Nurul Hasyimah MohdAmin, Abdul Wahab Mohammad, Mastura Markoma, Leo Choe Peng, Nidal Hilal. 2010. Analysis of deposition mechanism during ultrafiltration of glycerin-rich solutions. *Desalination*. Vol.261 (October) 313-320.
- [34] Nguyen N, Fargues C, Guiga W, Lameloise M-L. 2015. Assessing nanofiltration and reverse osmosis for the detoxification of lignocellulosic hydrolysates. *Journal of Membrane Science*. Vol.487 (December-March) 40-50.
- [35] Koel Saha, Uma Maheswari R, Jaya Sikder, Sudip Chakraborty, Silvio Silverio da Silva, Julio Cesar dos Santos. 2017. Membranes as a tool to support biorefineries: Applications in enzymatic hydrolysis, fermentation and dehydration for bioethanol production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.74 (May-November) 873-890.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [36] Paripok Phitsuwan, Kazuo Sakka, Khanok Ratanakhanokchai. 2016. Structural changes and enzymatic response of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) stem induced by alkaline pretreatment. *Bioresource Technology*. Vol.218 (April-June) 247–256.
- [37] Chi-Ruei He, Yu-Yuan Kuo, Si-Yu Li. 2017. Lignocellulosic butanol production from Napier grass using semi-simultaneous saccharification fermentation. *Bioresource Technology*. Vol.231 (November-January) 101–108.
- [38] กิตติศักดิ์ ครอบงุมวิจิตร, ชัชวาล สุจริต, มรุเดช บัวประเสริฐ. 2018. การนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำตาลรีดิวซ์และเซลลูโลสโดยใช้การกรองระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน. นิตยสารบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
- [39] F. Javier Benítez, Juan L. Acero, Ana I. Leal. 2006. Application of microfiltration and ultrafiltration processes to cork processing wastewaters and assessment of the membrane fouling. *Separation and Purification Technology*. Vol.50 (15 July 2006) 3: 354-364.
- [40] Carlos Carbonell-Alcaina, Silvia Álvarez-Blanco, María Amparo, Bes-Piáab José Antonio, Mendoza-Roca, Laura Pastor-Alcañiz. 2018. Ultrafiltration of residual fermentation brines from the production of table olives at different operating conditions. *Journal of Cleaner Production*. Vol.189 (10 July 2018) 662-672.
- [41] Anders F. Vikbjerg, Gunnar Jonsson, Huiling Mu, Xuebing Xu. 2006. Application of ultrafiltration membranes for purification of structured phospholipids produced by lipase-catalyzed acidolysis. *Separation and Purification Technology*. Vol.50 (15 June 2006) 2: 184-191.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

การเตรียมอาหารเหลว LM-pH5

ภาคผนวก ก

การเตรียมอาหารเหลว LM-pH5

1. อุปกรณ์

1.1 ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 mL

2. สารเคมี

2.1. น้ำกลั่น

2.2. ปุ๋ยยูเรีย (46% NH_4SO_4)

2.3. ปุ๋ยฟอสเฟต (N-P-K : 0-52-34)

2.4. แมกนีเซียมซัลเฟต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

2.5. แคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

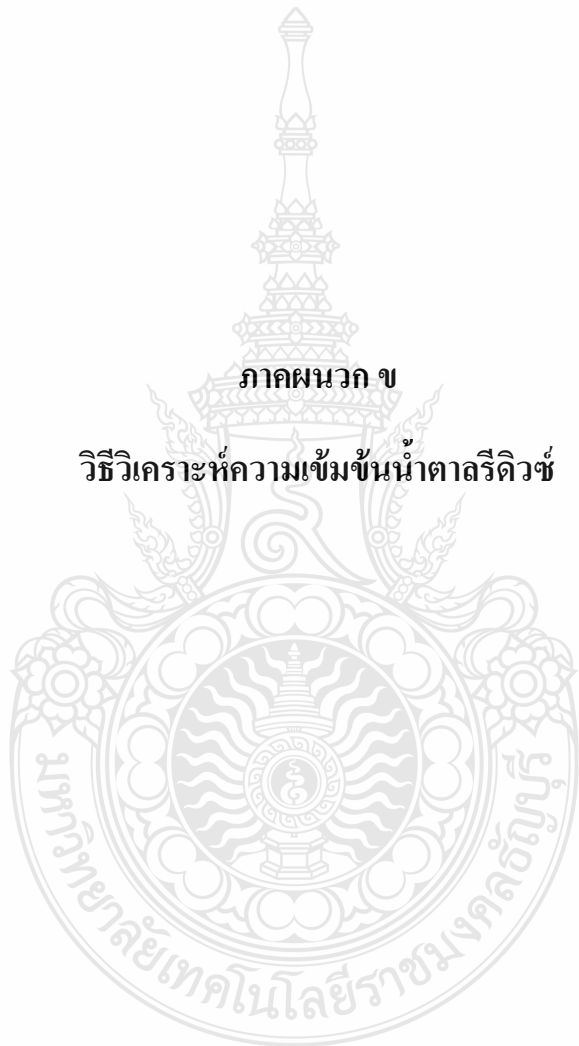
3. วิธีการเตรียม

3.1 เตรียมแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตจำนวน 0.5 กรัม แมกนีเซียมซัลเฟตจำนวน 0.5 กรัม ปุ๋ยยูเรียจำนวน 4 กรัม และปุ๋ยฟอสเฟตจำนวน 7.5 กรัม ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร 500 mL

3.2 อาหารสูตรไม่มีน้ำตาลจะใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 500 mL ก่อนการเติมเข้าถัง ปฏิกรณ์ต้องทำให้ปลอดเชื้อ

ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์



ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์

(Miller, G.L. 1959)

1. อุปกรณ์

- 1.1 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อวัดการดูดกลืนแสง
- 1.2 คิวเวตควอทซ์ (quartz cuvette)
- 1.3 อ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
- 1.4 ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 และ 1000 มิลลิลิตร
- 1.5 ปิเปตขนาด 1.0 และ 5.0 มิลลิลิตร
- 1.6 บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 1.7 หลอดทดลองขนาดกลางชนิดฝาปิดเกลียว
- 1.8 แท่งแก้วคนสาร
- 1.9 เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง

2. สารเคมีและวิธีการเตรียม

สารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิก(3,5-dinitrosalicylic acid : $C_7H_4N_2O_7$)

วิธีเตรียม : ชั่ง กรดไดไนโตรซาลิไซลิก 1 กรัมผสมกับ โซเดียมโพแตสเซียมตาร์เตรท (Sodium potassium tartrate : $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$) ปริมาณ 300 กรัม คลุกเคล้าให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วคน จึงใส่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ (ชั่งกรดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 80 กรัมลงในขวดปรับ ปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น) ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ถ้าต้องการให้การละลายเร็วขึ้น ทำการอุ่นสารละลายโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เมื่อสารละลายเป็นของเหลวใสแล้วให้ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นเก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา ในตู้มืดทิ้งไว้ประมาณ 1 ถึง 2 สัปดาห์ก่อนนำมาใช้

3. การทำกราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคสบริสุทธิ์เพื่อหาค่า Slope

3.1 เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) เป็นสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 กรัมต่อลิตร โดยวิธีการเตรียมดังนี้ ชั่งกลูโคส 0.25 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำจนได้สารละลาย 50 มิลลิลิตร เรียกว่า สารละลายเริ่มต้นหรือสารละลายสต็อก (stock solution) – เตรียมขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 7

ขวด เรียงลำดับการเตรียมความเข้มข้นสารละลายกลูโคส โดยเปิดปริมาตรสารละลายสต็อกและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 50 มิลลิลิตร ดังตารางที่ ก.1

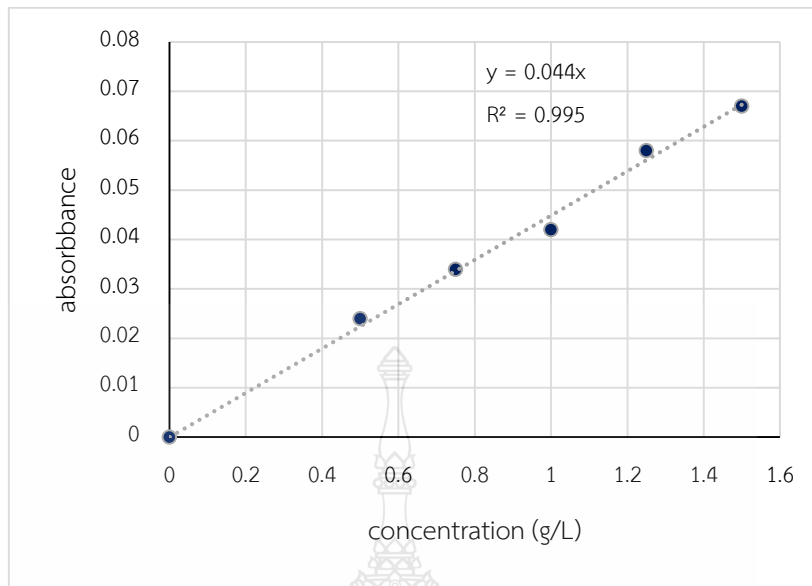
3.2 นำสารละลายแต่ละความเข้มข้น ในข้อที่ 1 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลาย DNS ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองฝาเกลียวสีดำ ปิดจุกผสมด้วยเครื่อง vortex ก่อนนำไปต้มในน้ำเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 10 นาทีแล้วนำมาแช่ในน้ำเย็นทันทีนาน 5 นาที (ทำการทดลอง 3 ซ้ำของสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่แต่ละความเข้มข้น) สารละลาย Blank คือใช้น้ำแทนน้ำตาล

3.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อที่ 2 มาวางที่อุณหภูมิห้องให้ฝ้าที่หลอดทดลองหมดแล้วจึงนำไปวัดค่า ABS ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร

3.4 พล็อตกราฟระหว่าง ABS กับความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสให้ได้กราฟเส้นตรง $Y = mX$ ผ่าน จุด 0 ที่มี $R^2 = 0.990$

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลกลูโคสและค่าดูดกลืนแสงความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสงที่ 570 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)
0.0	0
0.2	0.024
0.4	0.034
0.6	0.042
0.8	0.058
1.0	0.067



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์





ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์เชลลูเลส แอคติวิตี

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์เซลล์ลูเลส แอคติวิตี

1. อุปกรณ์

- 1.1 กระจกทรงเบอร์ 1
- 1.2 อ่างควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
- 1.3 หลอดทดลองขนาดกลางชนิดฝาเกลียวปิด
- 1.4 ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร

2. สารเคมีและวิธีการเตรียม

- 2.1 สารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH เท่ากับ 5

วิธีเตรียม : ละลาย citric acid 0.05M (A) 10.51 กรัมปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร กับ sodium citrate 0.05M (B) 14.7 กรัมในน้ำ ปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ปิเปต A 20.5 มิลลิลิตร และ ปิเปต B 29.5 มิลลิลิตร นำมาปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

- 2.2 สารละลายกรดไดโนโตรซาลิไซลิก

3. การทำกราฟมาตรฐานของสารละลายน้ำตาลในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 0.4 กรัมต่อลิตร

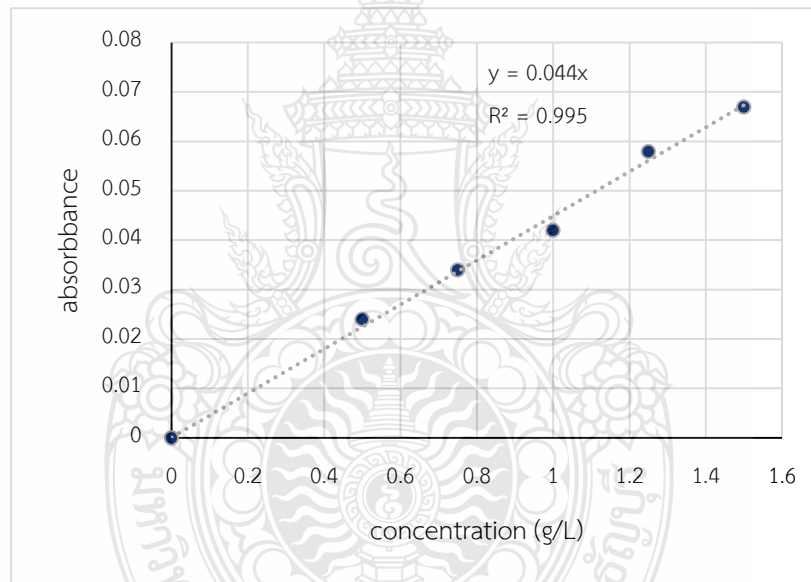
เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 กรัมต่อลิตร โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

3.1 ชั่งกลูโคส 0.25 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำจนได้สารละลาย 50 มิลลิลิตร เรียกว่าสารละลายเริ่มต้นหรือสารละลายสต็อก (stock solution)

3.2 เตรียมขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 7 ขวดเรียงลำดับการเตรียมความเข้มข้นสารละลายกลูโคสโดยปิเปตปริมาตรสารละลายสต็อกและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 50 มิลลิลิตร ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลและการดูดกลืนแสงที่ 570 นาโนเมตร

ความเข้มข้นสารละลาย กลูโคส (g/L)	ปริมาตร (ml)		Abs
	สารละลายสต็อก	ปรับปริมาตร	
0 (blank)	-	-	0
0.50	5.0	50	0.024
0.75	7.5	50	0.034
1.00	10.0	50	0.042
1.25	12.5	50	0.058
1.50	15.0	50	0.067



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์เซลล์ูเลสแอกติวิตี้

4. วิธีวิเคราะห์เซลล์ลูเลส แอคติวิตี

4.1 ตัดกระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาด 1×6 เซนติเมตรพับใส่ในหลอดทดลองขนาดเล็กหลอดละ 1 แผ่น

4.2 สำหรับ blank ปิเปตโซเดียมอะซีเตตบัฟเฟอร์ pH 5 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองข้อ 4.1

4.3 สำหรับสารละลายปิเปตโซเดียมอะซีเตตบัฟเฟอร์ pH 5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตรใส่ลงในหลอดทดลองข้อ 1 แล้วตามด้วยสารตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร

4.4 นำสารละลายในข้อ 4.2 และ 4.3 ไปต้มในอ่างควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.5 นำสารละลายในข้อที่ 4.4 ไปปั่นแยกด้วยเครื่อง centrifuge เป็นเวลา 10 นาทีที่ความเร็วรอบ 4500 rpm

4.6 เมื่อปั่นเหวี่ยงเสร็จแล้วปิเปตสารละลายจากข้อที่ 5. ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาดกลางฝาปิดเกลียวแล้วเติม DNS ปริมาตร 5 ml ปิดฝาผสมด้วยเครื่อง Vortex นาน 1 นาที แล้วจึงนำไปต้มในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีและแช่ในน้ำเย็น 5 นาที

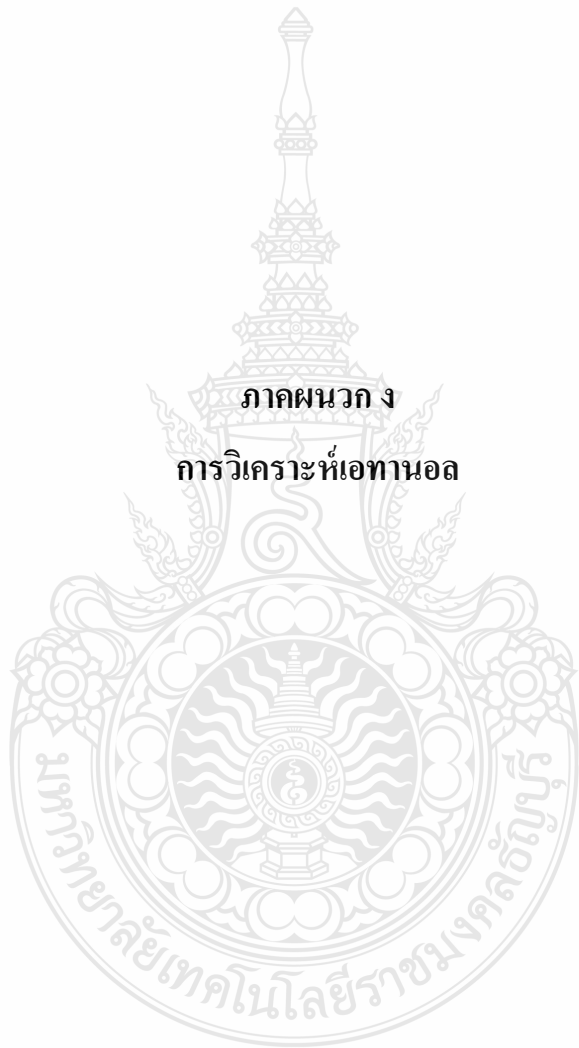
4.7 นำสารละลายในข้อ 4.6 มาวางที่อุณหภูมิห้องให้ฝ้าที่หลอดหมดแล้วจึงนำไปวัดค่า ABS ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นแสง 570 นาโนเมตร

4.8 นำข้อมูลจากข้อที่ 4.7 มาวิเคราะห์ผลโดยการคำนวณหาค่าเซลล์ลูเลสแอคติวิตีจากสูตรซึ่งได้จากกราฟมาตรฐานของสารละลายน้ำตาล

หมายเหตุ 1.หลังจากทำปฏิกิริยาเคมีสารละลายที่ได้ต้องใส ไม่ขุ่นมัว หรือมีตะกอน

2. ถ้าสารละลายมีค่า absorbance เกิน 1 ให้ทำการเจือจางที่อัตราส่วน 1:10 โดยทำการปิเปตสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เติมน้ำ 9 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร

ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์เอทานอล



ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์เอทานอล

1. อุปกรณ์

- 1.1 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อวัดการดูดกลืนแสง
- 1.2 คิวเวตควอทซ์ (quartz cuvette)
- 1.3 อ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
- 1.4 ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 และ 1000 มิลลิลิตร
- 1.5 ปิเปตขนาด 1.0 และ 5.0 มิลลิลิตร
- 1.6 หลอดทดลองขนาดกลางชนิดฝาปิดเกลียว
- 1.7 เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง

2. สารเคมีและวิธีการเตรียม

2.1 โปแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์
ใส่น้ำกลั่นลงไปประมาณครึ่งขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร หลังจากนั้นชั่ง
โปแทสเซียมไดโครเมต 29.4 กรัม ใสลงในขวดปรับปริมาตร ทำการปิเปตกรดซัลฟูริกเข้มข้น 98%
ปริมาตร 26.58 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรและทำการปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตรด้วย
น้ำกลั่น จากนั้นทำการเก็บสารละลายไว้ในขวดสีชาและเก็บสารละลายไว้ในที่มืด

2.2 กรดซัลฟูริกเข้มข้น 98%

2.3 น้ำกลั่น

3. การวิเคราะห์เอทานอล

3.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองข้อที่ 1 ทำการปิดฝาเกลียวให้
แน่น นำไปผสมด้วยเครื่อง vortex

3.2 สำหรับ blank สามารถเตรียมได้โดยทำการปิเปตน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตรตามด้วยสารละลาย
โปแทสเซียมไดโครเมต 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาดกลางฝาปิดเกลียวปิดฝาให้สนิท นำไป
ผสมด้วยเครื่อง vortex

3.3 นำสารละลายข้อ 3.1 และ 3.2 ไปทำปฏิกิริยาเคมีโดยการต้มในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100
องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาทีแล้วแช่น้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที

3.4 นำสารละลายในข้อ 3.3 วางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งฝ้าที่หลอดหมด จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

3.5 ถ้าสารละลายมีค่าการดูดกลืนแสงเกิน 1 ให้ทำการเจือจางที่อัตราส่วน 1:10 โดยทำการปิเปตสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เติมน้ำ 9 มิลลิลิตรและจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

หมายเหตุ หลังจากทำปฏิกิริยาเคมีสารละลายที่ได้ต้องใส ไม่ขุ่นมัว หรือมีตะกอน

4. วิธีทำกราฟมาตรฐานเอทานอล

เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8, 10 กรัมต่อลิตร หรือ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ดังนี้

4.1 เติมน้ำกลั่นประมาณครึ่งขวดของขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

4.2 ปิเปตเอทานอลบริสุทธิ์ความเข้มข้น 99.99% ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรลงในขวดข้อ 4.1

4.3 ปิเปตน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 2 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองขนาดกลางฝาปิดเกลียว

4.4 ปิเปตสารละลายในข้อที่ 4.2 จำนวน 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองข้อ 4.3 ทำการปิดฝาเกลียวให้แน่น นำไปผสมด้วยเครื่อง vortex

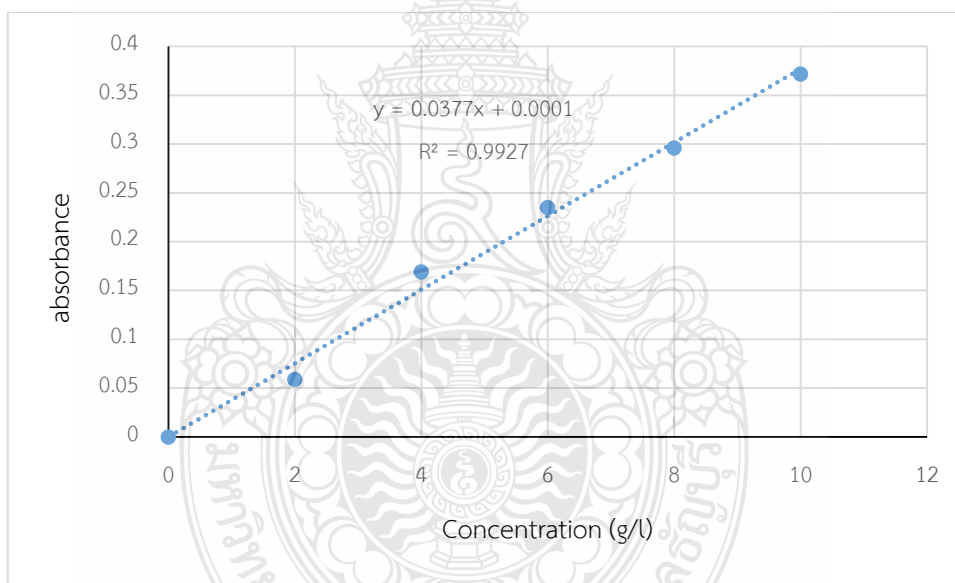
4.5 สำหรับ blank สามารถเตรียมได้โดยทำการปิเปตน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตรตามด้วยสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาดกลางฝาปิดเกลียวปิดฝาให้สนิท นำไปผสมด้วยเครื่อง vortex

4.6 นำสารละลายข้อ 4.4 และ 4.5 ไปทำปฏิกิริยาเคมีโดยการต้มในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาทีแล้วแช่น้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที

4.7 นำสารละลายในข้อ 4.6 วางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งฝ้าที่หลอดหมด จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ได้ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ค่าความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลและการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของสารละลาย เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร
0	0
2	0.059
4	0.169
6	0.235
8	0.296
10	0.372



รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอล



ภาคผนวก จ

ข้อมูลดิบการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซต

ภาคผนวก จ

ข้อมูลดิบการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซท

ภาคผนวก จ.1 ข้อมูลดิบของน้ำตาลรีดิวซ์ จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซทถึงที่ 1

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.251	0.248	0.247	0.249	56.903
1	0.135	0.141	0.134	0.137	31.274
2	0.127	0.128	0.129	0.128	29.291
3	0.161	0.162	0.151	0.158	36.156
4	0.133	0.149	0.142	0.141	32.342
5	0.151	0.166	0.149	0.155	35.545
6	0.14	0.155	0.157	0.151	34.477
7	0.144	0.147	0.144	0.145	33.181

ภาคผนวก จ.2 ข้อมูลดิบของเซลลูโลส แอคติวิตี้ จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซทถึงที่ 1

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.791	0.725	0.811	0.776	17.750
1	0.832	0.66	0.637	0.710	16.240
2	0.587	0.543	0.613	0.581	13.295
3	0.805	0.822	0.872	0.833	19.062
4	0.752	0.761	0.752	0.755	17.159
5	0.761	0.763	0.764	0.763	17.452
6	0.746	0.757	0.79	0.764	17.490
7	0.747	0.757	0.586	0.697	15.942

ภาคผนวก ง.3 ข้อมูลดิบของเอทานอล จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซทถึงที่ 1

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.506	0.518	0.520	0.515	13.660
1	0.598	0.620	0.624	0.614	16.286
2	0.934	0.936	0.937	0.936	24.828
3	0.111	0.114	0.113	0.112	*29.708
4	0.107	0.107	0.109	0.107	*28.382
5	0.119	0.114	0.117	0.117	*30.946
6	0.120	0.101	0.103	0.108	*28.647
7	0.954	0.973	0.956	0.961	25.491

ภาคผนวก ง.4 ข้อมูลดิบของน้ำตาลรีดิวซ์ จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซทถึงที่ 2

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.180	0.182	0.178	0.180	41.532
1	0.102	0.107	0.095	0.102	23.524
2	0.136	0.134	0.138	0.136	31.341
3	0.149	0.149	0.160	0.152	35.095
4	0.114	0.107	0.113	0.111	29.453

ภาคผนวก ง.5 ข้อมูลดิบของเซลลูโลส แอคติวิตี้ จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซทถึงที่ 2

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.919	0.912	0.916	0.916	20.818
1	0.640	0.790	0.715	0.715	16.250
2	0.630	0.624	0.627	0.627	14.250
3	0.996	0.997	0.990	0.994	22.591
4	0.728	0.721	0.725	0.725	16.477

ภาคผนวก ง.5 ข้อมูลดิบของเอทานอล จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซตถึงที่ 2

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.853	0.854	0.857	0.855	22.670
1	0.851	0.846	0.841	0.846	22.440
2	0.987	0.965	0.991	0.981	26.021
3	0.990	0.997	0.995	0.994	26.366
4	0.102	0.107	0.111	0.107	28.294

ภาคผนวก ง.6 ข้อมูลดิบของน้ำตาลรีดิวิซ์ จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซตถึงที่ 3

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.170	0.188	0.185	0.181	41.609
1	0.104	0.101	0.094	0.099	22.950
2	0.121	0.124	0.198	0.121	27.892
3	0.144	0.143	0.142	0.143	32.873
4	0.119	0.119	0.138	0.125	28.812

ภาคผนวก ง.7 ข้อมูลดิบของเซลลูโลส แอคติวิตี้ จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซตถึงที่ 3

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.756	0.794	0.774	0.775	17.614
1	0.630	0.624	0.627	0.627	14.250
2	0.651	0.630	0.611	0.631	14.341
3	0.997	0.976	0.978	0.984	22.364
4	0.728	0.721	0.725	0.725	16.659

ภาคผนวก ง.8 ข้อมูลดิบของเอทานอล จากการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซตถึงที่ 3

วันที่	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	ความเข้มข้น (g/l)
0	0.747	0.756	0.759	0.754	20.000
1	0.853	0.844	0.871	0.856	22.706
2	0.891	0.854	0.893	0.879	23.324
3	0.112	0.103	0.100	0.105	*27.851
4	0.101	0.100	0.100	0.105	*26.614

(*Dilution 10)



ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลดิบฟลักซ์เฟอร์มิเอต



ตัวอย่างการคำนวณค่าฟลักซ์

ทำการจับเวลาตั้งแต่เพอร์มิเอตหยุดแรกออกมา แล้วทำการบันทึกน้ำหนักการกรองทุกๆ 1 นาที และหยุดทำการกรองเมื่อน้ำหนักเพอร์มิเอตเท่ากับร้อยละ 60

$$\text{ฟลักซ์} = \frac{\text{น้ำหนักเพอร์มิเอต}}{\text{เวลา} \times \text{พื้นที่หน้าตัดเมมเบรน}}$$

โดยที่ ฟลักซ์มีหน่วยเป็น กรัม/(ตารางเซนติเมตร)(นาที) ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{min}$)

น้ำหนักเพอร์มิเอตมีหน่วยเป็นกรัม (g)

เวลาที่ใช้ในการกรองมีหน่วยเป็นนาที (min)

พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรนมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร (cm^2) แสดงพื้นที่หน้าตัดเมมเบรนสำหรับการกรองแบบไหลขวาง ดังตาราง 3.1 และตาราง 3.2 สำหรับการกรองแบบปิดตาย

ตัวอย่างการคำนวณ

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{min}$)
1	15.93	0.0885
2	28.06	0.0779

$$\begin{aligned}\text{ฟลักซ์} &= 15.93/(1 \times 180) \\ &= 0.0885 \text{ g}/\text{cm}^2 \text{min}\end{aligned}$$

ภาคผนวก ฉ.1 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน PES0.2 อัตราการไหล
30 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	14.81	0.0823
2	19.3	0.0536
3	24.11	0.0446
4	28.88	0.0401
5	33.54	0.0373
6	38.24	0.0354
7	43.03	0.0342
8	47.64	0.0331
9	52.29	0.0323
10	57.18	0.0318
11	61.7	0.0312
12	66.32	0.0307
13	71.02	0.0304
14	75.67	0.0300
15	80.29	0.0297
16	84.91	0.0295
17	89.43	0.0292
18	94.08	0.0290
19	98.63	0.0288
20	103.34	0.0287
21	107.84	0.0285
22	112.51	0.0284
23	116.97	0.0283
24	121.56	0.0281
25	126.24	0.0281
26	130.72	0.0279

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
27	135.32	0.0278
28	139.92	0.0278
29	144.42	0.0277
30	148.92	0.0276
31	153.46	0.0275
32	158.04	0.0274
33	162.58	0.0274
34	167.08	0.0273
35	171.57	0.0272
36	176.03	0.0272
37	180.45	0.0271
38	184.87	0.0270
39	189.32	0.0270
40	193.72	0.0269
41	198.14	0.0268
42	202.61	0.0268
43	206.93	0.0267
44	211.31	0.0267
45	215.82	0.0266
46	220.28	0.0266
47	224.68	0.0266
48	229.1	0.0265
49	233.42	0.0265
50	237.79	0.0264
51	242.09	0.0264
52	246.38	0.0263
53	250.72	0.0263
54	254.08	0.0261

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
54	254.08	0.0261
55	259.25	0.0262
56	263.37	0.0261
57	267.6	0.0261
58	271.85	0.0260

ภาคผนวก ฉ.2 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน PES0.2 อัตราการไหล 50 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	15.93	0.0885
2	28.06	0.0779
3	39.21	0.0726
4	49.2	0.0683
5	58.86	0.0654
6	67.58	0.0626
7	76.14	0.0604
8	84.34	0.0586
9	92.15	0.0569
10	100.1	0.0556
11	107.07	0.0541
12	113.97	0.0528
13	120.78	0.0516
14	127.64	0.0507
15	134.04	0.0496
16	140.68	0.0488
17	147.09	0.0481
18	153.46	0.0474

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
19	159.7	0.0467
20	165.93	0.0461
21	171.93	0.0455
22	178.21	0.0450
23	184.29	0.0445
24	190.48	0.0441
25	196.48	0.0437
26	202.59	0.0433
27	208.48	0.0429
28	214.28	0.0425
29	220.36	0.0422
30	226.08	0.0419
31	231.87	0.0416
32	237.47	0.0412
33	243.09	0.0409
34	248.75	0.0406
35	254.34	0.0404
36	259.79	0.0401
37	265.26	0.0398
38	270.65	0.0396

ภาคผนวก ฉ.3 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน PES0.2 อัตราการไหล 75 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	26.3	0.1461
2	37.6	0.1044
3	47.8	0.0885

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
4	57.6	0.0800
5	66.45	0.0738
6	75.25	0.0697
7	83.07	0.0659
8	91.7	0.0637
9	99.35	0.0613
10	106.35	0.0591
11	113.39	0.0573
12	120.47	0.0558
13	127.5	0.0545
14	134.35	0.0533
15	141.39	0.0524
16	147.92	0.0514
17	154.78	0.0506
18	161.29	0.0498
19	168.09	0.0491
20	174.63	0.0485
21	180.72	0.0478
22	187.37	0.0473
23	193.96	0.0469
24	200.38	0.0464
25	206.73	0.0459
26	214.09	0.0457
27	220.35	0.0453
28	226.58	0.0450
29	232.74	0.0446
30	238.83	0.0442
31	244.96	0.0439

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
32	251.04	0.0436
33	257.23	0.0433
34	263.23	0.0430
35	269.12	0.0427
36	275.1	0.0425
37	281.09	0.0422
38	286.91	0.0419
39	292.92	0.0417
40	298.76	0.0415
41	304.68	0.0413
42	310.42	0.0411
43	316.28	0.0409
44	322.02	0.0407
45	327.84	0.0405
46	333.4	0.0403
47	339.14	0.0401
48	344.72	0.0399
49	350.49	0.0397
50	356.04	0.0396
51	361.52	0.0394

ภาคผนวก ฉ.4 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน PES0.2 อัตราการไหล 100 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	39.56	0.2198
2	65.8	0.1828
3	86.08	0.1594

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
4	104.45	0.1451
5	120.74	0.1342
6	135.34	0.1253
7	148.87	0.1182
8	161.89	0.1124
9	174.05	0.1074
10	185.65	0.1031
11	196.82	0.0994
12	207.47	0.0961
13	218.66	0.0934
14	228.58	0.0907
15	238.48	0.0883
16	248.09	0.0861
17	257.07	0.0840
18	266.38	0.0822
19	275.2	0.0805
20	283.8	0.0788
21	292.58	0.0774
22	301.29	0.0761
23	309.68	0.0748
24	317.8	0.0736
25	326.08	0.0725
26	334.32	0.0714
27	342.48	0.0705
28	350.6	0.0696
29	358.86	0.0687
30	366.78	0.0679
31	375.18	0.0672

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
32	383.03	0.0665
33	390.78	0.0658
34	398.78	0.0652
35	406.65	0.0645
36	414.39	0.0639
37	422.13	0.0634
38	429.78	0.0628
39	437.75	0.0624
40	445.33	0.0619
41	452.98	0.0614
42	460.67	0.0609
43	468.29	0.0605
44	475.98	0.0601
45	483.78	0.0597
46	491.35	0.0593
47	499.09	0.0590
48	506.63	0.0586
49	514.28	0.0583
50	520.99	0.0579
51	529.67	0.0577
52	537.48	0.0574
53	545.08	0.0571
54	552.5	0.0568
55	560.09	0.0566
56	567.7	0.0563
57	575.08	0.0561
58	582.58	0.0558
59	590.08	0.0556

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
60	597.58	0.0553
61	604.97	0.0551
62	612.3	0.0549
63	619.11	0.0546
64	626.58	0.0544
65	634.2	0.0542
66	641.52	0.0540
67	649.08	0.0538
68	656.71	0.0537
69	664.16	0.0535
70	671.42	0.0533
71	678.94	0.0531
72	686.29	0.0530
73	693.58	0.0528
74	700.93	0.0526
75	708.25	0.0525
76	715.59	0.0523
77	722.83	0.0522
78	730.29	0.0520
79	737.6	0.0519
80	744.83	0.0517
81	752.28	0.0516
82	759.38	0.0514
83	766.79	0.0513
84	773.95	0.0512
85	781.23	0.0511
86	788.42	0.0509
87	795.58	0.0508

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
88	802.28	0.0506
89	809.85	0.0506
90	817.13	0.0504
91	824.39	0.0503
92	831.5	0.0502
93	838.79	0.0501
94	845.8	0.0500
95	852.89	0.0499
96	860.9	0.0498
97	866.74	0.0496
98	874.45	0.0496
99	881.9	0.0495
100	888.07	0.0493
101	894.82	0.0492
102	901.73	0.0491
103	908.62	0.0490
104	915.23	0.0489
105	921.83	0.0488
106	934.59	0.0490
107	934.59	0.0485
108	941.44	0.0484
109	949.13	0.0484
110	955.7	0.0483
111	962.41	0.0482

ภาคผนวก ฉ.5 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน PES0.2 อัตราการไหล
200 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	43.24	0.2402
2	75.31	0.2092
3	106.18	0.1966
4	127.63	0.1773
5	147.79	0.1642
6	165.63	0.1534
7	183.03	0.1453
8	200.43	0.1392
9	216.39	0.1336
10	231.22	0.1285
11	247.26	0.1249
12	262.79	0.1217
13	279.15	0.1193
14	293.63	0.1165
15	309.05	0.1145
16	323.87	0.1125
17	338.29	0.1106
18	353.08	0.1090
19	367.08	0.1073
20	380.79	0.1058
21	394.36	0.1043
22	407.87	0.1030
23	421.39	0.1018
24	435.86	0.1009
25	448.59	0.0997
26	460.84	0.0985

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
27	473.29	0.0974
28	485.98	0.0964
29	498.14	0.0954
30	509.85	0.0944
31	521.89	0.0935
32	533.29	0.0926
33	544.18	0.0916
34	555.38	0.0907
35	566.55	0.0899
36	577.36	0.0891
37	588.19	0.0883
38	598.95	0.0876
39	609.32	0.0868
40	620.53	0.0862
41	630.58	0.0854
42	640.16	0.0847
43	650.01	0.0840
44	659.87	0.0833
45	669.42	0.0826
46	678.87	0.0820
47	688.5	0.0814
48	697.79	0.0808
49	707.39	0.0802
50	716.38	0.0796
51	725.43	0.0790
52	734.5	0.0785
53	743.44	0.0779
54	752.34	0.0774

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
55	760.97	0.0769
56	769.48	0.0763
57	778.15	0.0758
58	786.69	0.0754
59	795.14	0.0749
60	803.37	0.0744
61	811.59	0.0739
62	819.59	0.0734
63	827.64	0.0730
64	835.7	0.0725
65	843.71	0.0721
66	851.58	0.0717
67	859.77	0.0713
68	867.27	0.0709
69	875.08	0.0705
70	882.68	0.0701
71	890.02	0.0696
72	897.5	0.0693
73	904.82	0.0689
74	912.29	0.0685
75	919.57	0.0681
76	926.63	0.0677
77	933.74	0.0674
78	940.87	0.0670
79	947.97	0.0667
80	954.79	0.0663
81	961.84	0.0660

ภาคผนวก ฉ.6 ข้อมูลคิบัฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิเตรชั้น PES500 อัตราการไหล
30 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	22.64	0.0924
2	28.32	0.0578
3	33.29	0.0453
4	38.64	0.0394
5	43.58	0.0356
6	48.52	0.0330
7	53.38	0.0311
8	58.09	0.0296
9	62.75	0.0285
10	67.37	0.0275
11	72.04	0.0267
12	76.72	0.0261
13	81.37	0.0255
14	86.04	0.0251
15	90.75	0.0247
16	95.34	0.0243
17	100.04	0.0240
18	105.13	0.0238
19	110.09	0.0236
20	114.72	0.0234
21	119.16	0.0232
22	123.45	0.0229
23	128.43	0.0228
24	132.73	0.0226
25	136.97	0.0224
26	141.37	0.0222

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
26	141.37	0.0222
27	145.92	0.0221
28	150.39	0.0219
29	154.83	0.0218
30	159.32	0.0217
31	163.82	0.0216
32	168.42	0.0215
33	172.95	0.0214
34	177.42	0.0213
35	181.85	0.0212
36	186.27	0.0211
37	190.48	0.0210
38	194.72	0.0209
39	199.04	0.0208
40	203.19	0.0207
41	207.48	0.0207
42	211.84	0.0206
43	216.29	0.0205
44	220.73	0.0205
45	225.04	0.0204
46	229.46	0.0204
47	233.9	0.0203
48	238.05	0.0202
49	242.49	0.0202
50	246.86	0.0202
51	251.28	0.0201
52	255.63	0.0201
53	259.89	0.0200

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
54	263.83	0.0199
55	267.82	0.0199
56	271.73	0.0198

ภาคผนวก จ.7 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน PES500 อัตราการไหล 50 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	23.29	0.0951
2	29.68	0.0606
3	35.63	0.0485
4	41.79	0.0426
5	47.56	0.0388
6	53.29	0.0363
7	59.05	0.0344
8	64.64	0.0330
9	70.42	0.0319
10	75.99	0.0310
11	81.65	0.0303
12	87.29	0.0297
13	92.97	0.0292
14	98.54	0.0287
15	104.29	0.0284
16	109.92	0.0280
17	115.59	0.0278
18	121.06	0.0275
19	126.69	0.0272
20	132.08	0.0270

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
21	137.57	0.0267
22	142.96	0.0265
23	148.52	0.0264
24	153.85	0.0262
25	159.47	0.0260
26	164.78	0.0259
27	170.25	0.0257
28	175.92	0.0256
29	181.32	0.0255
30	186.67	0.0254
31	191.92	0.0253
32	197.13	0.0251
33	202.18	0.0250
34	207.36	0.0249
35	212.38	0.0248
36	217.34	0.0246
37	222.45	0.0245
38	227.48	0.0244
39	232.63	0.0243
40	237.63	0.0242
41	242.67	0.0242
42	247.71	0.0241
43	252.82	0.0240
44	257.72	0.0239
45	262.73	0.0238
46	267.73	0.0238
47	272.52	0.0237
48	277.63	0.0236

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
49	283.05	0.0236
50	288.75	0.0236
51	293.09	0.0235
52	298.79	0.0235
53	303.45	0.0234
54	308.57	0.0233
55	313.66	0.0233
56	318.54	0.0232
57	323.78	0.0232
58	328.32	0.0231
59	333.43	0.0231
60	338.98	0.0231
61	343.78	0.0230
62	349.01	0.0230
63	355	0.0230
64	360.09	0.0230

ภาคผนวก จ.8 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน PES500 อัตราการไหล
75 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	15.77	0.0644
2	25.79	0.0526
3	34.97	0.0476
4	43.58	0.0445
5	51.64	0.0422
6	60.17	0.0409
7	68.12	0.0397

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
8	76.64	0.0391
9	84.87	0.0385
10	92.8	0.0379
11	100.73	0.0374
12	109.15	0.0371
13	116.92	0.0367
14	124.83	0.0364
15	132.83	0.0361
16	140.69	0.0359
17	148.64	0.0357
18	156.65	0.0355
19	164.59	0.0354
20	172.48	0.0352
21	180.47	0.0351
22	188.23	0.0349
23	196.03	0.0348
24	203.86	0.0347
25	211.12	0.0345
26	218.18	0.0343
27	225.34	0.0341
28	232.12	0.0338
29	238.95	0.0336
30	245.76	0.0334
31	252.63	0.0333
32	259.58	0.0331
33	266.32	0.0329
34	273.08	0.0328
35	279.72	0.0326

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
36	286.54	0.0325
37	293.42	0.0324
38	300.06	0.0322
39	306.83	0.0321
40	313.29	0.0320
41	319.97	0.0319
42	326.45	0.0317
43	332.82	0.0316
44	339.34	0.0315
45	345.72	0.0314
46	352.04	0.0312
47	358.49	0.0311
48	364.76	0.0310
49	370.33	0.0308
50	377.21	0.0308
51	384.65	0.0308
52	391.02	0.0307
53	398.87	0.0307
54	405.45	0.0306
55	412.23	0.0306
56	419.69	0.0306
57	426.97	0.0306

ภาคผนวก จ.9 ข้อมูลคืบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิเตรชั้น PES100 อัตราการไหล
30 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	22.84	0.1474
2	30.09	0.0971
3	37.02	0.0796
4	42.06	0.0678
5	47.9	0.0618
6	53.1	0.0571
7	57.82	0.0533
8	62.45	0.0504
9	66.78	0.0479
10	71.02	0.0458
11	75.19	0.0441
12	79.19	0.0426
13	83.19	0.0413
14	87.15	0.0402
15	91.06	0.0392
16	94.89	0.0383
17	98.84	0.0375
18	102.63	0.0368
19	106.47	0.0362
20	110.32	0.0356
21	114.09	0.0351
22	117.86	0.0346
23	121.42	0.0341
24	125.03	0.0336
25	128.82	0.0332
26	132.46	0.0329

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
27	136.12	0.0325
28	139.76	0.0322
29	143.42	0.0319
30	147.09	0.0316
31	150.63	0.0313
32	154.23	0.0311
33	157.92	0.0309
34	161.52	0.0306
35	165.14	0.0304
36	168.67	0.0302
37	172.32	0.0300
38	175.96	0.0299
39	179.49	0.0297
40	183.04	0.0295
41	186.63	0.0294
42	190.17	0.0292
43	193.66	0.0291
44	197.29	0.0289
45	200.79	0.0288
46	204.24	0.0286
47	207.82	0.0285
48	211.31	0.0284
49	214.83	0.0283
50	218.33	0.0282
51	221.87	0.0281
52	225.32	0.0280
53	228.82	0.0279
54	232.26	0.0277

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
55	235.74	0.0277
56	239.14	0.0276
57	242.5	0.0274
58	245.89	0.0274
59	249.38	0.0273
60	252.86	0.0272
61	256.26	0.0271
62	259.66	0.0270
63	263.09	0.0269
64	266.47	0.0269
65	269.82	0.0268
66	273.14	0.0267

ภาคผนวก จ.10 ข้อมูลคิบัฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน PES100 อัตราการไหล 50 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	18.43	0.1189
2	30.67	0.0989
3	42.93	0.0923
4	49.87	0.0804
5	56.42	0.0728
6	62.83	0.0676
7	68.85	0.0635
8	74.85	0.0604
9	80.78	0.0579
10	86.42	0.0558
11	92.13	0.0540

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
12	97.79	0.0526
13	103.35	0.0513
14	108.75	0.0501
15	114.35	0.0492
16	119.69	0.0483
17	125.09	0.0475
18	130.43	0.0467
19	135.85	0.0461
20	141.19	0.0455
21	146.59	0.0450
22	151.81	0.0445
23	157.22	0.0441
24	162.47	0.0437
25	167.75	0.0433
26	173.04	0.0429
27	178.21	0.0426
28	183.43	0.0423
29	188.68	0.0420
30	193.92	0.0417
31	199.12	0.0414
32	204.27	0.0412
33	209.38	0.0409
34	214.54	0.0407
35	219.65	0.0405
36	224.84	0.0403
37	229.99	0.0401
38	235.04	0.0399
39	240.06	0.0397

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
40	245.18	0.0395
41	250.29	0.0394
42	255.26	0.0392
43	260.44	0.0391
44	265.48	0.0389
45	270.49	0.0388
46	275.49	0.0386
47	280.59	0.0385
48	285.53	0.0384
49	290.48	0.0382
50	295.34	0.0381
51	300.22	0.0380
52	305.07	0.0378
53	309.91	0.0377
54	314.83	0.0376
55	319.67	0.0375
56	324.78	0.0374
57	329.59	0.0373
58	334.53	0.0372
59	339.39	0.0371
60	344.25	0.0370
61	348.89	0.0369
62	353.84	0.0368
63	358.63	0.0367
64	363.43	0.0366

ภาคผนวก ฉ.11 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน PES100 อัตราการไหล
75 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	15.27	0.0985
2	26.28	0.0848
3	35.86	0.0771
4	44.35	0.0715
5	52.28	0.0675
6	59.75	0.0642
7	67.05	0.0618
8	73.96	0.0596
9	80.98	0.0581
10	87.76	0.0566
11	94.58	0.0555
12	101.32	0.0545
13	108.24	0.0537
14	115.04	0.0530
15	121.57	0.0523
16	128.03	0.0516
17	134.47	0.0510
18	140.89	0.0505
19	147.27	0.0500
20	153.64	0.0496
21	159.93	0.0491
22	166.23	0.0487
23	172.43	0.0484
24	178.73	0.0480
25	184.85	0.0477
26	191.04	0.0474

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
27	197.09	0.0471
28	203.17	0.0468
29	209.19	0.0465
30	215.28	0.0463
31	221.42	0.0461
32	227.41	0.0458
33	233.84	0.0457
34	239.91	0.0455
35	245.74	0.0453
36	251.58	0.0451
37	257.47	0.0449
38	263.26	0.0447
39	269.23	0.0445
40	274.92	0.0443
41	280.62	0.0442
42	286.35	0.0440
43	292.04	0.0438
44	297.68	0.0436
45	303.18	0.0435
46	308.82	0.0433
47	314.48	0.0432
48	320.12	0.0430
49	325.63	0.0429
50	331.36	0.0428
51	336.67	0.0426
52	342.07	0.0424
53	347.58	0.0423
54	352.94	0.0422

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
55	358.36	0.0420
56	363.69	0.0419

ภาคผนวก จ.12 ข้อมูลคิบัฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน PES10 อัตราการไหล

30 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	15.28	0.0849
2	24.36	0.0677
3	32.07	0.0594
4	39.40	0.0547
5	45.62	0.0507
6	49.5	0.0458
7	53.2	0.0422
8	57.03	0.0396
9	60.82	0.0375
10	64.63	0.0359
11	68.59	0.0346
12	72.32	0.0335
13	76.02	0.0325
14	79.79	0.0317
15	83.54	0.0309
16	87.42	0.0304
17	91.13	0.0298
18	93.89	0.0290
19	97.78	0.0286
20	101.59	0.0282
21	105.18	0.0278

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
22	108.85	0.0275
23	112.74	0.0272
24	116.52	0.0270
25	120.25	0.0267
26	123.92	0.0265
27	127.62	0.0263
28	131.39	0.0261
29	135.19	0.0259
30	138.98	0.0257
31	142.73	0.0256
32	146.53	0.0254
33	150.24	0.0253
34	153.94	0.0252
35	157.6	0.0250
36	161.3	0.0249
37	165.1	0.0248
38	168.83	0.0247
39	172.6	0.0246
40	176.43	0.0245
41	180.05	0.0244
42	183.8	0.0243
43	187.48	0.0242
44	191.17	0.0241
45	194.97	0.0241
46	198.63	0.0240
47	202.23	0.0239
48	205.94	0.0238
49	209.62	0.0238

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
50	213.33	0.0237
51	217.03	0.0236
52	220.67	0.0236
53	224.35	0.0235
54	228.04	0.0235
55	231.7	0.0234
56	235.38	0.0234
57	239	0.0233
58	242.65	0.0232
59	246.33	0.0232
60	249.97	0.0231
61	253.52	0.0231
62	257.09	0.0230
63	260.85	0.0230
64	264.42	0.0230
65	267.97	0.0229
66	271.53	0.0229

ภาคผนวก ฉ.13 ข้อมูลคืบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน PES10 อัตราการไหล
50 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	9.27	0.0515
2	14.59	0.0405
3	20.73	0.0384
4	25.18	0.0350
5	29.77	0.0331
6	34.19	0.0317

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
7	38.89	0.0309
8	43.43	0.0302
9	47.81	0.0295
10	52.33	0.0291
11	56.79	0.0287
12	61.27	0.0284
13	65.64	0.0281
14	70.18	0.0278
15	74.53	0.0276
16	78.94	0.0274
17	83.35	0.0272
18	87.71	0.0271
19	92.13	0.0269
20	96.53	0.0268
21	100.92	0.0267
22	105.27	0.0266
23	109.68	0.0265
24	114.03	0.0264
25	118.29	0.0263
26	122.63	0.0262
27	127.08	0.0261
28	131.36	0.0261
29	135.72	0.0260
30	140.03	0.0259
31	144.31	0.0259
32	148.63	0.0258
33	152.94	0.0257
34	157.29	0.0257

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
35	161.52	0.0256
36	166.05	0.0256
37	170.37	0.0256
38	174.73	0.0255
39	179.15	0.0255
40	183.41	0.0255
41	187.77	0.0254
42	191.94	0.0254
43	196.22	0.0254
44	200.46	0.0253
45	204.59	0.0253
46	208.94	0.0252
47	213.13	0.0252
48	217.36	0.0252
49	222.32	0.0252
50	227.13	0.0252
51	231.9	0.0253
52	236.59	0.0253
53	240.92	0.0253
54	245.39	0.0252
55	249.36	0.0252
56	253.39	0.0251
57	257.38	0.0251
58	261.57	0.0251
59	265.58	0.0250
60	270.01	0.0250
61	274.06	0.0250
62	278.06	0.0249

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
63	282.12	0.0249
64	286.14	0.0248
65	290.17	0.0248
66	294.23	0.0248
67	298.26	0.0247
68	302.24	0.0247
69	307.13	0.0247
70	313.72	0.0249
71	319.53	0.0250
72	324.67	0.0251
73	329.93	0.0251
74	333.59	0.0250
75	337.21	0.0250
76	340.97	0.0249
77	344.79	0.0249
78	348.64	0.0248
79	352.43	0.0248
80	356.28	0.0247
81	360.09	0.0247

ภาคผนวก ฉ.14 ข้อมูลคิบบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน PES10 อัตราการไหล 75 ml/min

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	14.8	0.0822
2	20.9	0.0581
3	26.68	0.0494
4	32.45	0.0451

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
5	38.08	0.0423
6	43.6	0.0404
7	49.09	0.0390
8	54.5	0.0378
9	59.92	0.0370
10	65.08	0.0362
11	70.37	0.0355
12	75.74	0.0351
13	81.04	0.0346
14	86.09	0.0342
15	91.39	0.0338
16	96.89	0.0336
17	102.18	0.0334
18	107.04	0.0330
19	112.05	0.0328
20	116.89	0.0325
21	121.89	0.0322
22	126.94	0.0321
23	131.78	0.0318
24	136.64	0.0316
25	141.43	0.0314
26	146.28	0.0313
27	151.13	0.0311
28	155.92	0.0309
29	160.72	0.0308
30	165.48	0.0306
31	170.29	0.0305
32	175.12	0.0304

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
33	179.92	0.0303
34	184.78	0.0302
35	189.57	0.0301
36	194.36	0.0300
37	199.07	0.0299
38	203.89	0.0298
39	208.68	0.0297
40	213.35	0.0296
41	218.03	0.0295
42	222.69	0.0295
43	227.38	0.0294
44	232.07	0.0293
45	236.78	0.0292
46	241.36	0.0291
47	246.12	0.0291
48	250.72	0.0290
49	255.38	0.0290
50	260.03	0.0289
51	264.62	0.0288
52	269.3	0.0288
53	273.87	0.0287
54	278.45	0.0286
55	283.01	0.0286
56	287.54	0.0285
57	292.19	0.0285
58	296.94	0.0284
59	301.59	0.0284
60	306.13	0.0283

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
61	309.99	0.0282
62	314.53	0.0282
63	319.12	0.0281
64	323.73	0.0281
65	328.33	0.0281
66	332.85	0.0280
67	337.43	0.0280
68	342.09	0.0279
69	346.61	0.0279
70	351.28	0.0279
71	355.82	0.0278
72	360.33	0.0278

ภาคผนวก จ.15 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NP010 ความดัน 10 บาร์

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	1.33	0.0678
2	2.38	0.0606
3	3.3	0.0560
4	4.16	0.0530
5	4.97	0.0506
6	5.74	0.0487
7	6.48	0.0472
8	7.14	0.0455
9	7.83	0.0443
10	8.48	0.0432
11	9.13	0.0423
12	9.75	0.0414

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
13	10.35	0.0406
14	10.93	0.0398
15	11.47	0.0390
16	12.09	0.0385
17	12.62	0.0378
18	13.2	0.0374
19	13.72	0.0368
20	14.23	0.0362
21	14.75	0.0358
22	15.27	0.0354
23	15.8	0.0350
24	16.32	0.0346
25	16.78	0.0342
26	17.23	0.0338
27	17.71	0.0334
28	18.17	0.0331
29	18.64	0.0327
30	19.09	0.0324
31	19.54	0.0321
32	20.02	0.0319
33	20.48	0.0316
34	20.89	0.0313
35	21.34	0.0311
36	21.74	0.0308
37	22.2	0.0306
38	22.61	0.0303
39	23.07	0.0301
40	23.47	0.0299

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
41	23.87	0.0297
42	24.27	0.0294
43	24.65	0.0292
44	25.09	0.0290
45	25.49	0.0289
46	25.88	0.0287
47	26.29	0.0285
48	26.69	0.0283
49	27.09	0.0282
50	27.42	0.0279
51	27.75	0.0277
52	28.16	0.0276
53	28.55	0.0274
54	28.91	0.0273
55	29.32	0.0272
56	29.66	0.0270
57	30.06	0.0269
58	30.41	0.0267
59	30.76	0.0266
60	31.15	0.0264
61	31.47	0.0263
62	31.83	0.0262
63	32.18	0.0260
64	32.55	0.0259
65	32.92	0.0258
66	33.26	0.0257
67	33.58	0.0255
68	33.95	0.0254

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
69	34.29	0.0253
70	34.62	0.0252
71	34.98	0.0251
72	35.26	0.0249
73	35.38	0.0247
74	35.59	0.0245
75	35.93	0.0244
76	36.22	0.0243
77	36.57	0.0242
78	36.86	0.0241
79	37.21	0.0240
80	37.5	0.0239
81	37.84	0.0238
82	38.18	0.0237
83	38.47	0.0236
84	38.81	0.0235
85	39.1	0.0234
86	39.39	0.0233
87	39.74	0.0233
88	40.02	0.0232
89	40.3	0.0231
90	40.59	0.0230
91	40.93	0.0229
92	41.22	0.0228
93	41.49	0.0227
94	41.79	0.0226
95	42.08	0.0226
96	42.36	0.0225

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
97	42.52	0.0223
98	42.81	0.0223
99	43.1	0.0222
100	43.39	0.0221
101	43.7	0.0220
102	43.98	0.0220
103	44.23	0.0219
104	44.52	0.0218
105	44.82	0.0217
106	45.07	0.0217
107	45.35	0.0216
108	45.67	0.0215
109	45.89	0.0214
110	46.2	0.0214
111	46.49	0.0213
112	46.73	0.0213
113	47.02	0.0212
114	47.27	0.0211
115	47.57	0.0211
116	47.79	0.0210
117	48.09	0.0209
118	48.34	0.0209
119	48.63	0.0208
120	48.87	0.0207

ภาคผนวก จ.16 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NP010 ความดัน 15 บาร์

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	2.81	0.1431
2	3.56	0.0907
3	4.98	0.0846
4	5.89	0.0750
5	6.96	0.0709
6	7.77	0.0660
7	8.83	0.0643
8	9.69	0.0617
9	10.51	0.0595
10	11.49	0.0585
11	12.1	0.0560
12	12.85	0.0546
13	13.65	0.0535
14	14.49	0.0527
15	15.13	0.0514
16	15.91	0.0507
17	16.57	0.0497
18	17.09	0.0484
19	17.97	0.0482
20	18.74	0.0477
21	19.3	0.0468
22	19.96	0.0462
23	20.58	0.0456
24	21.2	0.0450
25	21.84	0.0445
26	22.64	0.0444
27	23.13	0.0436

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
28	23.69	0.0431
29	24.3	0.0427
30	24.99	0.0424
31	25.54	0.0420
32	26.15	0.0416
33	26.7	0.0412
34	27.33	0.0409
35	27.9	0.0406
36	28.65	0.0405
37	29.02	0.0400
38	29.76	0.0399
39	30.12	0.0393
40	30.71	0.0391
41	31.24	0.0388
42	31.85	0.0386
43	32.36	0.0383
44	33	0.0382
45	33.43	0.0378
46	34.05	0.0377
47	34.52	0.0374
48	35.07	0.0372
49	35.53	0.0369
50	36.12	0.0368
51	36.56	0.0365
52	37.16	0.0364
53	37.62	0.0362
54	38.22	0.0361
55	38.61	0.0358

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
56	39.05	0.0355
57	39.6	0.0354
58	40.12	0.0352
59	40.58	0.0350
60	41.07	0.0349
61	41.59	0.0347
62	42.05	0.0346
63	42.52	0.0344
64	43	0.0342
65	43.51	0.0341
66	43.97	0.0339
67	44.45	0.0338
68	44.97	0.0337
69	45.45	0.0336
70	45.81	0.0333
71	46.36	0.0333
72	46.89	0.0332
73	47.29	0.0330
74	47.92	0.0330
75	48.22	0.0328
76	48.86	0.0328
77	49.11	0.0325
78	49.65	0.0324
79	50.03	0.0323
80	50.36	0.0321
81	50.61	0.0318
82	51.05	0.0317
83	51.5	0.0316

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
84	51.97	0.0315
85	52.42	0.0314
86	52.87	0.0313
87	53.3	0.0312
88	53.69	0.0311
89	54.17	0.0310
90	54.55	0.0309
91	55	0.0308
92	55.45	0.0307
93	55.87	0.0306
94	56.25	0.0305
95	56.68	0.0304
96	57.03	0.0303
97	57.53	0.0302
98	57.87	0.0301
99	58.39	0.0300
100	58.74	0.0299
101	59.3	0.0299
102	60.11	0.0300
103	60.68	0.0300
104	60.84	0.0298
105	60.9	0.0295
106	61.37	0.0295
107	61.69	0.0294
108	62.12	0.0293
109	62.5	0.0292
110	62.86	0.0291
111	63.27	0.0290

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
112	63.55	0.0289
113	64.08	0.0289
114	64.47	0.0288
115	64.89	0.0287
116	65.32	0.0287
117	65.64	0.0286
118	66.1	0.0285
119	66.47	0.0285
120	66.96	0.0284

ภาคผนวก จ.17 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NP010 ความดัน 20 บาร์

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	3.11	0.0158
2	5.05	0.0129
3	6.84	0.0116
4	8.34	0.0106
5	9.57	0.0098
6	10.9	0.0093
7	12.12	0.0088
8	13.4	0.0085
9	14.55	0.0082
10	15.71	0.0080
11	16.81	0.0078
12	17.9	0.0076
13	18.87	0.0074
14	19.96	0.0073
15	20.99	0.0071

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
16	21.91	0.0070
17	22.94	0.0069
18	23.86	0.0068
19	24.8	0.0066
20	25.7	0.0065
21	26.62	0.0065
22	27.46	0.0064
23	28.31	0.0063
24	29.14	0.0062
25	30.05	0.0061
26	30.89	0.0061
27	31.67	0.0060
28	32.51	0.0059
29	33.34	0.0059
30	34.11	0.0058
31	34.95	0.0057
32	35.66	0.0057
33	36.42	0.0056
34	37.21	0.0056
35	37.97	0.0055
36	38.75	0.0055
37	39.45	0.0054
38	40.18	0.0054
39	40.88	0.0053
40	41.57	0.0053
41	42.26	0.0053
42	42.96	0.0052
43	43.63	0.0052

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
44	44.17	0.0051
45	44.89	0.0051
46	45.52	0.0050
47	46.17	0.0050
48	46.83	0.0050
49	47.47	0.0049
50	48.13	0.0049
51	48.72	0.0049
52	49.37	0.0048
53	49.97	0.0048
54	50.56	0.0048
55	51.2	0.0047
56	51.8	0.0047
57	52.4	0.0047
58	53.05	0.0047
59	53.58	0.0046
60	54.18	0.0046
61	54.78	0.0046
62	55.38	0.0046
63	55.95	0.0045
64	56.49	0.0045
65	57.09	0.0045
66	57.61	0.0044
67	58.15	0.0044
68	58.7	0.0044
69	59.23	0.0044
70	59.82	0.0044
71	60.35	0.0043

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
72	60.88	0.0043
73	61.47	0.0043
74	62	0.0043
75	62.55	0.0042
76	63.07	0.0042
77	63.67	0.0042
78	64.25	0.0042
79	64.84	0.0042
80	65.47	0.0042
81	66.06	0.0042
82	66.64	0.0041
83	67.25	0.0041
84	67.84	0.0041
85	68.42	0.0041
86	69.01	0.0041
87	69.55	0.0041
88	70.12	0.0041
89	70.54	0.0040
90	71.13	0.0040
91	71.66	0.0040
92	72.27	0.0040
93	72.85	0.0040
94	73.45	0.0040
95	73.98	0.0040
96	74.56	0.0040
97	75.11	0.0039
98	75.7	0.0039
99	76.29	0.0039

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
100	76.83	0.0039
101	77.31	0.0039
102	77.91	0.0039
103	78.5	0.0039
104	79.1	0.0039
105	79.63	0.0039
106	80.23	0.0039
107	80.76	0.0038
108	81.37	0.0038
109	81.9	0.0038
110	82.49	0.0038
111	83.09	0.0038
112	83.68	0.0038
113	84.24	0.0038
114	84.83	0.0038
115	85.37	0.0038
116	85.97	0.0038
117	86.58	0.0038
118	87.19	0.0038
119	87.72	0.0038
120	88.31	0.0037

ภาคผนวก จ.18 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NP010 ความดัน 25 บาร์

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	3.26	0.0166
2	5.57	0.0142
3	7.5	0.0127
4	9.14	0.0116
5	10.78	0.0110
6	12.29	0.0104
7	13.74	0.0100
8	15.15	0.0096
9	16.51	0.0093
10	17.76	0.0090
11	19.05	0.0088
12	20.29	0.0086
13	21.49	0.0084
14	22.62	0.0082
15	23.77	0.0081
16	24.84	0.0079
17	25.97	0.0078
18	27.05	0.0077
19	28.06	0.0075
20	29.09	0.0074
21	30.15	0.0073
22	31.17	0.0072
23	32.19	0.0071
24	33.13	0.0070
25	34.13	0.0070
26	35.08	0.0069
27	36.1	0.0068

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
28	37.1	0.0067
29	38.04	0.0067
30	38.93	0.0066
31	39.82	0.0065
32	40.62	0.0065
33	41.51	0.0064
34	42.33	0.0063
35	43.17	0.0063
36	44	0.0062
37	44.8	0.0062
38	45.63	0.0061
39	46.47	0.0061
40	47.2	0.0060
41	47.94	0.0060
42	48.7	0.0059
43	49.53	0.0059
44	50.36	0.0058
45	51.12	0.0058
46	51.93	0.0058
47	52.75	0.0057
48	53.52	0.0057
49	54.28	0.0056
50	55.07	0.0056
51	55.88	0.0056
52	56.64	0.0055
53	57.43	0.0055
54	58.17	0.0055
55	58.93	0.0055

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
56	59.69	0.0054
57	60.47	0.0054
58	61.23	0.0054
59	61.88	0.0053
60	62.64	0.0053
61	63.42	0.0053
62	64.11	0.0053
63	64.88	0.0052
64	65.59	0.0052
65	66.36	0.0052
66	67.11	0.0052
67	67.82	0.0052
68	68.52	0.0051
69	69.28	0.0051
70	70	0.0051
71	70.7	0.0051
72	71.47	0.0051
73	72.17	0.0050
74	72.86	0.0050
75	73.64	0.0050
76	74.4	0.0050
77	75.18	0.0050
78	75.93	0.0050
79	76.72	0.0049
80	77.45	0.0049
81	78.24	0.0049
82	79	0.0049
83	79.71	0.0049

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
84	80.47	0.0049
85	81.23	0.0049
86	82.01	0.0049
87	82.72	0.0048
88	83.42	0.0048
89	84.19	0.0048
90	84.9	0.0048
91	85.66	0.0048
92	86.38	0.0048
93	87.09	0.0048
94	87.86	0.0048
95	88.68	0.0048
96	89.47	0.0047
97	90.17	0.0047

ภาคผนวก จ.19 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NP030 ความดัน 10 บาร์

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	0.44	0.0022
2	1.10	0.0028
3	1.66	0.0028
4	2.26	0.0029
5	2.76	0.0028
6	3.21	0.0027
7	3.66	0.0027
8	4.12	0.0026
9	4.60	0.0026
10	5.02	0.0026

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
11	5.49	0.0025
12	5.85	0.0025
13	6.34	0.0025
14	6.74	0.0025
15	7.14	0.0024
16	7.53	0.0024
17	7.94	0.0024
18	8.33	0.0024
19	8.68	0.0023
20	9.07	0.0023
21	9.47	0.0023
22	9.82	0.0023
23	10.22	0.0023
24	10.56	0.0022
25	10.95	0.0022
26	11.30	0.0022
27	11.64	0.0022
28	11.98	0.0022
29	12.40	0.0022
30	12.72	0.0022
31	13.07	0.0021
32	13.42	0.0021
33	13.74	0.0021
34	14.09	0.0021
35	14.43	0.0021
36	14.77	0.0021
37	15.12	0.0021
38	15.47	0.0021

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
39	15.74	0.0021
40	16.08	0.0020
41	16.43	0.0020
42	16.70	0.0020
43	17.05	0.0020
44	17.38	0.0020
45	17.67	0.0020
46	18.02	0.0020
47	18.34	0.0020
48	18.63	0.0020
49	18.98	0.0020
50	19.25	0.0020
51	19.59	0.0020
52	19.89	0.0019
53	20.17	0.0019
54	20.52	0.0019
55	20.79	0.0019
56	21.08	0.0019
57	21.42	0.0019
58	21.71	0.0019
59	21.98	0.0019
60	22.28	0.0019
61	22.56	0.0019
62	22.89	0.0019
63	23.18	0.0019
64	23.47	0.0019
65	23.76	0.0019
66	24.03	0.0019

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
67	24.38	0.0019
68	24.67	0.0018
69	24.93	0.0018
70	25.23	0.0018
71	25.51	0.0018
72	25.79	0.0018
73	26.02	0.0018
74	26.36	0.0018
75	26.59	0.0018
76	26.88	0.0018
77	27.16	0.0018
78	27.44	0.0018
79	27.73	0.0018
80	27.95	0.0018
81	28.22	0.0018
82	28.52	0.0018
83	28.80	0.0018
84	29.03	0.0018
85	29.31	0.0018
86	29.60	0.0018
87	29.82	0.0017
88	30.09	0.0017
89	30.39	0.0017
90	30.61	0.0017
91	30.89	0.0017
92	31.19	0.0017
93	31.41	0.0017
94	31.69	0.0017

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
95	31.97	0.0017
96	32.19	0.0017
97	32.43	0.0017
98	32.71	0.0017
99	32.94	0.0017
100	33.22	0.0017
101	33.45	0.0017
102	33.72	0.0017
103	33.95	0.0017
104	34.19	0.0017
105	34.46	0.0017
106	34.70	0.0017
107	34.97	0.0017
108	35.19	0.0017
109	35.43	0.0017
110	35.71	0.0017
111	35.94	0.0016
112	36.17	0.0016
113	36.39	0.0016
114	36.67	0.0016
115	36.89	0.0016
116	37.12	0.0016
117	37.33	0.0016
118	37.57	0.0016
119	37.85	0.0016
120	38.08	0.0016

ภาคผนวก จ.20 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NP030 ความดัน 15 บาร์

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	0.66	0.0034
2	1.42	0.0036
3	1.97	0.0033
4	2.7	0.0034
5	3.27	0.0033
6	3.79	0.0032
7	4.32	0.0031
8	4.88	0.0031
9	5.36	0.0030
10	5.86	0.0030
11	6.34	0.0029
12	6.85	0.0029
13	7.28	0.0029
14	7.77	0.0028
15	8.23	0.0028
16	8.7	0.0028
17	9.15	0.0027
18	9.62	0.0027
19	9.97	0.0027
20	10.47	0.0027
21	10.89	0.0026
22	11.34	0.0026
23	11.76	0.0026
24	12.22	0.0026
25	12.6	0.0026
26	13.01	0.0025
27	13.41	0.0025

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
28	13.82	0.0025
29	14.22	0.0025
30	14.68	0.0025
31	15.1	0.0025
32	15.43	0.0025
33	15.82	0.0024
34	16.23	0.0024
35	16.63	0.0024
36	17.03	0.0024
37	17.44	0.0024
38	17.79	0.0024
39	18.17	0.0024
40	18.56	0.0024
41	18.93	0.0024
42	19.33	0.0023
43	19.68	0.0023
44	20.07	0.0023
45	20.42	0.0023
46	20.81	0.0023
47	21.18	0.0023
48	21.56	0.0023
49	21.92	0.0023
50	22.29	0.0023
51	22.65	0.0023
52	22.98	0.0023
53	23.35	0.0022
54	23.76	0.0022
55	24.1	0.0022

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
56	24.42	0.0022
57	24.79	0.0022
58	25.13	0.0022
59	25.48	0.0022
60	25.82	0.0022
61	26.18	0.0022
62	26.55	0.0022
63	26.89	0.0022
64	27.2	0.0022
65	27.54	0.0022
66	27.88	0.0022
67	28.28	0.0022
68	28.58	0.0021
69	28.9	0.0021
70	29.2	0.0021
71	29.58	0.0021
72	29.96	0.0021
73	30.28	0.0021
74	30.57	0.0021
75	30.92	0.0021
76	31.25	0.0021
77	31.59	0.0021
78	31.9	0.0021
79	32.23	0.0021
80	32.57	0.0021
81	32.86	0.0021
82	33.2	0.0021
83	33.55	0.0021

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
84	33.83	0.0021
85	34.17	0.0020
86	34.52	0.0020
87	34.8	0.0020
88	35.14	0.0020
89	35.44	0.0020
90	35.73	0.0020
91	36.06	0.0020
92	36.35	0.0020
93	36.68	0.0020
94	36.98	0.0020
95	37.32	0.0020
96	37.62	0.0020
97	37.94	0.0020
98	38.24	0.0020
99	38.52	0.0020
100	38.8	0.0020
101	39.14	0.0020
102	39.43	0.0020
103	39.71	0.0020
104	39.98	0.0020
105	40.34	0.0020
106	40.61	0.0020
107	40.9	0.0019
108	41.19	0.0019
109	41.47	0.0019
110	41.77	0.0019
111	42.11	0.0019

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
112	42.39	0.0019
113	42.67	0.0019
114	42.95	0.0019
115	43.23	0.0019
116	43.52	0.0019
117	43.8	0.0019
118	44.07	0.0019
119	44.35	0.0019
120	44.63	0.0019

ภาคผนวก จ.21 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NP030 ความดัน 20 บาร์

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	0.96	0.0049
2	1.92	0.0049
3	2.71	0.0046
4	3.51	0.0045
5	4.29	0.0044
6	5.01	0.0043
7	5.68	0.0041
8	6.40	0.0041
9	7.10	0.0040
10	7.71	0.0039
11	8.37	0.0039
12	9.01	0.0038
13	9.62	0.0038
14	10.25	0.0037
15	10.84	0.0037

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
16	11.47	0.0037
17	12.04	0.0036
18	12.63	0.0036
19	13.20	0.0035
20	13.77	0.0035
21	14.32	0.0035
22	14.88	0.0034
23	15.46	0.0034
24	15.95	0.0034
25	16.51	0.0034
26	17.07	0.0033
27	17.64	0.0033
28	18.08	0.0033
29	18.63	0.0033
30	19.15	0.0033
31	19.64	0.0032
32	20.16	0.0032
33	20.68	0.0032
34	21.18	0.0032
35	21.66	0.0032
36	22.17	0.0031
37	22.68	0.0031
38	23.18	0.0031
39	23.62	0.0031
40	24.08	0.0031
41	24.58	0.0031
42	25.02	0.0030
43	25.48	0.0030

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
44	25.98	0.0030
45	26.42	0.0030
46	26.87	0.0030
47	27.31	0.0030
48	27.77	0.0029
49	28.24	0.0029
50	28.66	0.0029
51	29.13	0.0029
52	29.57	0.0029
53	30.01	0.0029
54	30.40	0.0029
55	30.86	0.0029
56	31.24	0.0028
57	31.70	0.0028
58	32.09	0.0028
59	32.53	0.0028
60	32.92	0.0028
61	33.32	0.0028
62	33.76	0.0028
63	34.16	0.0028
64	34.55	0.0028
65	34.94	0.0027
66	35.38	0.0027
67	35.78	0.0027
68	36.18	0.0027
69	36.56	0.0027
70	36.89	0.0027
71	37.29	0.0027

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
72	37.69	0.0027
73	38.08	0.0027
74	38.38	0.0026
75	38.77	0.0026
76	39.11	0.0026
77	39.49	0.0026
78	39.83	0.0026
79	40.18	0.0026
80	40.56	0.0026
81	40.93	0.0026
82	41.29	0.0026
83	41.59	0.0026
84	41.97	0.0025
85	42.24	0.0025
86	42.56	0.0025
87	42.89	0.0025
88	43.23	0.0025
89	43.53	0.0025
90	43.83	0.0025
91	44.18	0.0025
92	44.51	0.0025
93	44.85	0.0025
94	45.11	0.0024
95	45.40	0.0024
96	45.72	0.0024
97	46.06	0.0024
98	46.40	0.0024
99	46.69	0.0024

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
100	46.90	0.0024
101	47.02	0.0024
102	47.27	0.0024
103	47.60	0.0024
104	47.95	0.0023
105	48.24	0.0023
106	48.52	0.0023
107	48.83	0.0023
108	49.14	0.0023
109	49.47	0.0023
110	49.76	0.0023
111	50.07	0.0023
112	50.36	0.0023
113	50.65	0.0023
114	51.00	0.0023
115	51.08	0.0023
116	51.35	0.0023
117	51.64	0.0022
118	51.91	0.0022
119	52.19	0.0022
120	52.53	0.0022

ภาคผนวก จ.22 ข้อมูลดิบฟลักซ์เพอร์มิเอตการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NP030 ความดัน 25 บาร์

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
1	1.45	0.0074
2	2.53	0.0064
3	3.58	0.0061
4	4.58	0.0058
5	5.59	0.0057
6	6.47	0.0055
7	7.35	0.0053
8	8.22	0.0052
9	9.1	0.0052
10	9.91	0.0050
11	10.73	0.0050
12	11.55	0.0049
13	12.36	0.0048
14	13.11	0.0048
15	13.92	0.0047
16	14.66	0.0047
17	15.47	0.0046
18	16.17	0.0046
19	16.9	0.0045
20	17.67	0.0045
21	18.33	0.0044
22	19.07	0.0044
23	19.83	0.0044
24	20.51	0.0044
25	21.04	0.0043
26	21.57	0.0042
27	22.26	0.0042

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
28	23.04	0.0042
29	23.81	0.0042
30	24.5	0.0042
31	25.16	0.0041
32	25.83	0.0041
33	26.47	0.0041
34	27.17	0.0041
35	27.77	0.0040
36	28.4	0.0040
37	29.08	0.0040
38	29.7	0.0040
39	30.32	0.0040
40	30.93	0.0039
41	31.55	0.0039
42	32.17	0.0039
43	32.79	0.0039
44	33.25	0.0038
45	33.88	0.0038
46	34.42	0.0038
47	35.05	0.0038
48	35.59	0.0038
49	36.22	0.0038
50	36.77	0.0037
51	37.34	0.0037
52	37.82	0.0037
53	38.38	0.0037
54	38.92	0.0037
55	39.47	0.0037

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
56	40.11	0.0036
57	40.65	0.0036
58	41.21	0.0036
59	41.75	0.0036
60	42.32	0.0036
61	42.88	0.0036
62	43.44	0.0036
63	43.98	0.0036
64	44.54	0.0035
65	45.09	0.0035
66	45.62	0.0035
67	46.19	0.0035
68	46.69	0.0035
69	47.25	0.0035
70	47.74	0.0035
71	48.24	0.0035
72	48.77	0.0035
73	49.27	0.0034
74	49.71	0.0034
75	50.19	0.0034
76	50.74	0.0034
77	51.17	0.0034
78	51.65	0.0034
79	52.15	0.0034
80	52.69	0.0034
81	53.2	0.0033
82	53.64	0.0033
83	54.13	0.0033

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
84	54.63	0.0033
85	55.11	0.0033
86	55.61	0.0033
87	56.09	0.0033
88	56.59	0.0033
89	57.08	0.0033
90	57.54	0.0033
91	58.06	0.0033
92	58.54	0.0032
93	59.03	0.0032
94	59.53	0.0032
95	59.9	0.0032
96	60.4	0.0032
97	60.88	0.0032
98	61.38	0.0032
99	61.88	0.0032
100	62.3	0.0032
101	62.79	0.0032
102	63.23	0.0032
103	63.71	0.0032
104	64.13	0.0031
105	64.61	0.0031
106	65.07	0.0031
107	65.48	0.0031
108	65.84	0.0031
109	66.32	0.0031
110	66.76	0.0031
111	67.26	0.0031

เวลา (min)	น้ำหนักเพอร์มิเอต (g)	ฟลักซ์ (g/cm ² min)
112	67.69	0.0031
113	68.18	0.0031
114	68.67	0.0031
115	69.14	0.0031
116	69.58	0.0031
117	70.07	0.0031
118	70.56	0.0030
119	70.98	0.0030
120	71.4	0.0030



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นางสาวมินทิตา พิเชฐพงษ์วิมุติ
วัน เดือน ปีเกิด 1 มกราคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่ 63 หมู่ 4 ตำบล ท่าโพ อำเภอ หนองขาหย่าง จังหวัด อุทัยธานี 61130
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์ 083-060-6705
อีเมลล์ mintita_p@rmutt.ac.th

