

การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน

Glycerol Separation from Biodiesel by Membrane Technology

สุดปรารถนา ธีรติ^{1*}, ปวีณา พลัดพราก², ยรรยง สุขคล้าย³, วีรินทร์ดา อัมมานะ⁴ และจุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ⁵
Sudprattana Thirati^{1*}, Paveena Pludprak², Yanyong Sukklay³, Weerinda Appamana⁴ and
Juraivan Ratanapisit⁵
sudprattana_t@mail.rmutt.ac.th^{1*}, paveena_p@exchang.rmutt.ac.th², yanyong_s@en.rmutt.
ac.th³, weerinda.a@en.rmutt.ac.th⁴, juraivan.r@en.rmutt.ac.th⁵

¹⁻⁵ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹⁻⁵ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: May 15, 2018
Revised: June 26, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำไบโอดีเซลบริสุทธิ์โดยการแยกกลีเซอรอลด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน สารป้อนเป็นสารผสมระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอลในอัตราส่วน 97:3 โดยปริมาตร ทำการทดลองด้วยชุดการกรองแบบ ปิดตายที่ความดันคงที่ต่างๆ ด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์ชนิดพอลิอีเธอร์ซัลโฟนที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด (molecular weight cut-off; MWCO) แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลตัดและความดันสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของ ฟลักซ์เพอร์มิเอตจากเมมเบรน UP150 และ UH030 ณ ความดัน 8 บาร์ พบว่าที่ความดันสูงทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนมากขึ้น สภาวะการทำงานที่เหมาะสมในการแยกกลีเซอรอลควรใช้เมมเบรน UH030 ณ ความดัน 6 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต 0.0156 g/min.cm² และค่าความสามารถกักกันกลีเซอรอลล้อยละ 93.11 สำหรับผลการศึกษากลไกฟาล์วล้าง ด้วยแบบจำลองเฮอเมียร์พบว่า เมมเบรน UP150, UP010 และ UP005 เกิดแบบการอุดตันรูพรุนของเมมเบรน ในขณะที่เมมเบรน UH030 เกิดแบบชั้นเค้ก ผลการทดลองแสดงความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซล

คำสำคัญ: กลีเซอรอล, ไบโอดีเซล, เมมเบรน, อัลตราฟิลเตรชัน, ฟาล์วล้าง

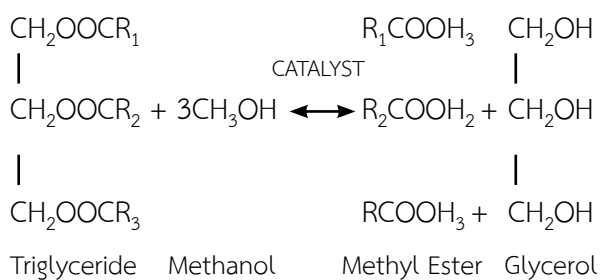
Abstract

In the present study, glycerol separation from biodiesel by ultrafiltration membrane technology was studied. Feeds as oil/glycerol in 97:3 proportion (v/v) were filtrated in a dead-end process at different transmembrane pressures. The experiments were carried out with polyethersulfone (PES) membranes of different molecular weight cut-off. Results showed that greater pore sizes, as well as greater transmembrane pressures, enable greater fluxes. However, permeate fluxes of UP 150 and UH030 membranes at 8 bar indicated an increased trend for the membranes to clog up at high pressure. The optimal operating condition of ultrafiltration by membrane UH030 at 6 bar was efficient in removing free glycerol, since the high value of stabilize permeate flux was 0.0156 g/min.cm² and glycerol rejection was 93.11%. Also the fouling mechanism was analyzed by the Hermia's model. Results showed that the pore blocking model played dominate part for UP150, UP010 and UP005 while the cake layer was significant for UH030. This work concludes that membrane technology is a possible alternative for biodiesel purification.

Keywords: Glycerol, biodiesel, membrane, ultrafiltration, fouling

1. บทนำ

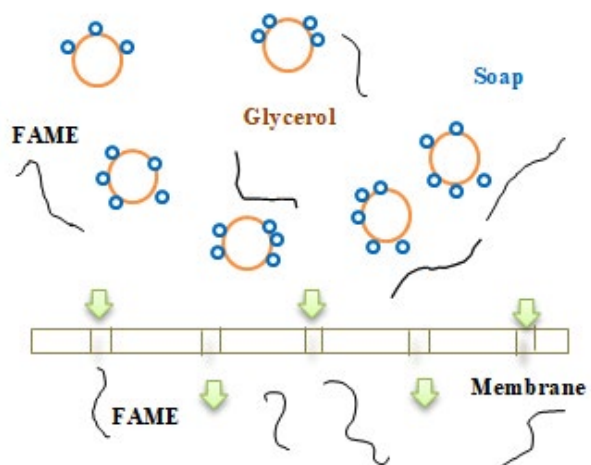
ปัจจุบันแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงมีการใช้มากที่สุด ทำให้เกิดวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม ในช่วงกว่าสิบปีที่ผ่านมาได้มีการนำเสนองานวิจัยด้านพลังงานทดแทนหลายวิธี ทั้งในรูปแบบชนิดของพลังงานทดแทนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างพลังงานทางเลือกของน้ำมันดีเซล ได้แก่ น้ำมันไบโอดีเซล ที่ผลิตจากน้ำมันสัตว์หรือน้ำมันพืชโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) กับเมทานอลและมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) และกลีเซอรอล โดยเมทิลเอสเทอร์มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์พบว่ามีคุณสมบัติการเผาไหม้ที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล โดยไบโอดีเซลมีปริมาณออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 จึงทำให้มีการเผาไหม้ที่กระบอกสูบได้ดี นอกจากนี้ยังมีเขม่าคาร์บอนน้อยไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสีย โดยทั่วไปการเพิ่มความบริสุทธิ์ไบโอดีเซลเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมี ใช้พลังงานสูง และมีชุดอุปกรณ์เสริมหลายตัว เช่น วิธีการกลั่น การเหวี่ยงแยก จึงมีค่าการลงทุนอุปกรณ์สูง การล้างไบโอดีเซลเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้เพราะมีค่าการลงทุนต่ำ แต่ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลเพื่อกำจัดสบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาและกลีเซอรอลนั้นก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก ดังนั้น

เทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้กับขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซล เพราะเทคโนโลยี เมมเบรนได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพการแยกโดยไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงจึงลดการใช้พลังงาน ลดการใช้สารเคมี และลดของเสียสู่สิ่งแวดล้อม จึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและง่ายต่อการทำงานเมื่อเทียบกับการแยกอื่นๆ [1] เทคโนโลยีเมมเบรนมีข้อเด่นหลายประการ เช่น ความสามารถแยกองค์ประกอบขนาดใหญ่และเล็ก โดยเฉพาะเมื่อสารป้อนมีความเข้มข้นในระดับต่ำได้ดี ประกอบกับเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อน หรือใช้ความร้อนต่ำ (ขึ้นกับลักษณะสารป้อน) ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่นำเทคโนโลยีเมมเบรนเข้ามาใช้ในการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซล โดยหลักการของการแยกกลีเซอรอลในไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยี เมมเบรน แสดงดังรูปที่ 2 โมเลกุลกลีเซอรอลรวมตัวกับโมเลกุลสารอื่นทำให้น้ำขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ในกรณีนี้กระแสเพอร์มิเอตเป็นกลุ่มเอสเทอร์เป็นหลัก ในขณะที่ด้านรีเทนเตดเป็นกลีเซอรอลและสารประกอบอื่นๆ [2]



รูปที่ 2 กลไกการแยกเอสเทอร์ด้วยเมมเบรน [2]

การดำเนินการของกระบวนการเมมเบรนมักให้ค่าฟลักซ์เริ่มต้นสูง แต่ค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วสาเหตุเนื่องจากโพลาไรเซชันของความเข้มข้นและฟอสฟอรัสที่ผิวหน้าเมมเบรนและในรูพรุนของ

เมมเบรนรวมถึงการเกิดชั้นเค้ก ซึ่งส่งผลต่อค่าฟลักซ์และสมรรถนะเมมเบรน การศึกษากลไกฟาล์วลงในกระบวนการเมมเบรนจึงมีความสำคัญ เนื่องจากทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการลดลงของฟลักซ์และสามารถยืดอายุการใช้งาน เมมเบรนได้ และในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองเฮอร์เมียเพื่อศึกษากลไกฟาล์ว

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคโนโลยีเมมเบรนมีความสามารถในการกำจัดกัมและฟอสโฟไลปิดในน้ำมันรำข้าวด้วยเมมเบรน พอลิเมอร์ระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันควบคู่กับการศึกษาฟาล์ว โดยใช้แบบจำลองเฮอร์เมีย [3-4] และยังสามารถกำจัดกลีเซอรอลในไบโอดีเซลได้ถึงร้อยละ 48-68 ด้วยเมมเบรน พอลิเมอร์ระดับอัลตราฟิลเตรชันควบคู่กับการเติมน้ำ [5] และพบว่าเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันไม่สามารถแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลได้เมื่อเทียบกับการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด 10 kDa [6] รวมทั้งมีการศึกษาการใช้เมมเบรนเซรามิกที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกกลีเซอรอลจากไบโอดีเซล โดยให้ปริมาณกลีเซอรอลน้อยกว่าร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก [7] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเทคโนโลยีเมมเบรนสามารถลดปริมาณน้ำเสีย จากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล เมื่อประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์ขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด 100 kDa [8]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความดันและขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัดของเมมเบรนเกรดการค้าชนิดพอลิเอเธอร์ซัลโฟนระดับอัลตราฟิลเตรชันต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทและความ สามารถการกักกัน รวมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยก กลีเซอรอลจากไบโอดีเซลและกลไกฟาล์วของเมมเบรนในช่วงความดันสูง

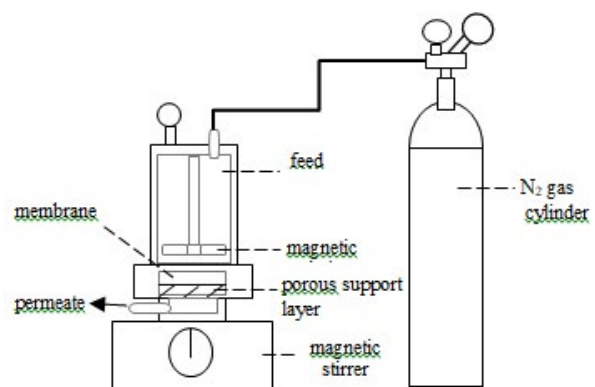
2. วิธีการศึกษา

2.1 สารป้อนที่ใช้ในการศึกษา

เพื่อควบคุมสารป้อนในการทดลองให้มีคุณภาพคงที่ น้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ได้จากบริษัทน้ำมันพืชปทุม จำกัด ถูกนำมาล้างเพื่อแยกสารประกอบอื่นๆ ออก เช่น สบู่ กลีเซอรอล ต่าง ๆ เพื่อหยุดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน อัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลต่อน้ำกลั่นในการล้างแต่ละครั้งคือ 1:0.5 โดยปริมาตรล้างจนค่าความเป็นกรด-เบสของสารอยู่ในสถานะเป็นกลาง หลังจากนั้นนำไปกำจัดน้ำด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุน (rotary evaporator) แล้วจึงเก็บไบโอดีเซลที่ได้ในภาชนะที่บดแสง และปิดสนิทเพื่อรอใช้ในการทดลองสารป้อนที่ใช้ในการทดลองต้องถูกป้องกันประกอบของกลีเซอรอล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมผสมใหม่ทุกครั้งโดยใช้ไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างและการกำจัดน้ำข้างต้นผสมกับกลีเซอรอลสังเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (analytical reagent; Sigma) ในอัตราส่วนระหว่างไบโอดีเซลต่อกลีเซอรอลเป็น 97 ต่อ 3 โดยปริมาตร

2.2 ชุดการกรองแบบปิดตาย

ชุดการกรองแบบปิดตายประกอบด้วยถังแก๊สไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 ที่ใช้เป็นแรงขับ สารป้อนต่อเข้ากับถังป้อนสแตนเลสสตีลขนาด 170 ลูกบาศก์เซนติเมตร พร้อมเกจวัดความดันที่ถูกติดตั้งบนถังป้อนภายในถังป้อนทำการติดตั้งตัวกวนผสมแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดเครื่องมือการกรองแบบปิดตาย

ด้านล่างถึงป้อนเป็นตำแหน่งติดตั้งเมมเบรนใหม่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร แผ่นเมมเบรนถูกปรับสภาพโดยการแช่ในเมทิลเอสเทอร์ก่อนทำการกรองเพื่อให้เมมเบรนมีสภาพจริงพร้อมใช้งาน จากนั้นเติมสารป้อนปริมาตรเริ่มต้นคงที่ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการกรอง ณ อุณหภูมิห้องและควบคุมความดันให้คงที่ตามค่าที่ต้องการ แล้วทำการจับเวลาและบันทึกน้ำหนักกระแสเพอร์มิเอทเมื่อสิ้นสุดการทดลองทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทุกสภาวะสำหรับกลไกฟาล์วลิ่งใช้การวิเคราะห์จากแบบจำลองเฮร์เมีย (Hermia model) ของของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน (nonnewtonian fluid)

2.3 ชนิดเมมเบรน

เมมเบรนเกรดการค้าจากบริษัท Microdyn Nadir GmbH ชนิดพอลิอีเธอร์ซัลโฟน (polyethersulfone; PES) มีค่าขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด (MWCO) ที่ 150, 10 และ 5 kDa มีรหัสการใช้งานดังนี้ UP150, UP010 และ UP005 ตามลำดับ และชนิดไฮโดรฟิลิกพอลิอีเธอร์ซัลโฟน (hydrophilic polyethersulfone) มีรหัสการใช้งาน UH030 มีค่า MWCO 30 kDa ถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของความดันต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทและความสามารถในการกักกัน โดยช่วงความดันที่ศึกษามีดังนี้ เมมเบรนชนิด UP150, UH030 และ UP010 ใช้ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์ ในขณะที่เมมเบรน UP005 ใช้ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์ เพื่อเพิ่มแรงขับให้ชุดทดลองเนื่องจากเป็นเมมเบรนที่มีความแน่นสูง

2.4 การวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลการทดลองบนฐานของฟลักซ์เพอร์มิเอท ความสามารถในการกักกัน และกลไกฟาล์วลิ่งดังนี้ ฟลักซ์ คือ อัตราการไหลผ่านเมมเบรนของเพอร์มิเอทต่อพื้นที่หน้าตัด เมมเบรน มีหน่วยเป็นน้ำหนักของเพอร์มิเอทต่อพื้นที่ต่อเวลา ดังสมการที่ 1

$$J_i = W / (a.t) \quad (1)$$

โดยที่ J_i คือ ฟลักซ์ของสาร i , a คือ พื้นที่การกรอง W คือ น้ำหนักของสารที่กรองได้และ t คือ เวลา

ความสามารถการกักกัน (rejection coefficient; R) คือร้อยละของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ดังสมการต่อไปนี้

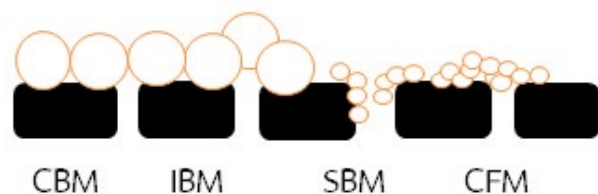
$$R = [1 - (C_p/C_f)] \times 100 \quad (2)$$

โดย

C_p คือ ความเข้มข้นตัวถูกละลายในเพอร์มิเอท

C_f คือ ความเข้มข้นตัวถูกละลายในสารป้อน

ฟาล์วลิ่ง คือการสะสมของอนุภาคที่เมมเบรนทำให้เกิดการอุดตันและส่งผลต่อสมรรถนะหรือค่าฟลักซ์ ของเมมเบรนลดลง ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเฮร์เมีย (Hermia, 1982) เพื่อศึกษากลไกฟาล์วลิ่งของสารละลายชนิดนอนนิวโตเนียนที่ความดันคงที่เพื่ออธิบายการลดลงของค่าฟลักซ์ มี 4 รูปแบบคือ complete blocking model (CMB), intermediate blocking model (IBM), standard blocking model (SBM) และ cake filtration model (CFM) ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 1



รูปที่ 4 แบบจำลองกลไกฟาล์วลิ่งของเฮร์เมีย ทั้ง 4 รูปแบบ [9]

ตารางที่ 1 สมการความเป็นเส้นตรงในแบบจำลองกลไกฟาล์วลิ่งของเฮอร์เมีย [10]

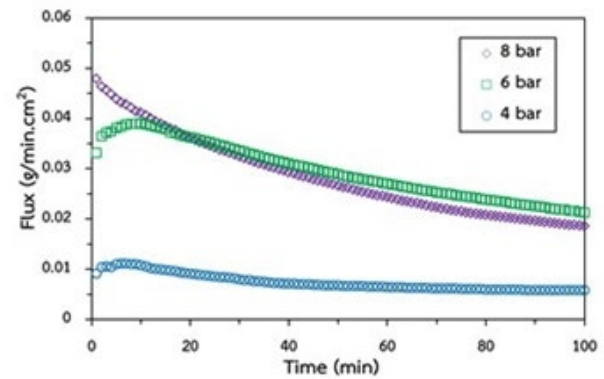
Blocking Mechanism	Linearized equation form
CBM	$\ln J = \ln J_0 - K_c t$
IBM	$1/J = (1/J_0) + K_t t$
SBM	$(1/J)^{0.5} = (1/J_0)^{0.5} + K_s t$
CFM	$(1/J)^2 = (1/J_0)^2 + K_{cf} t$

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

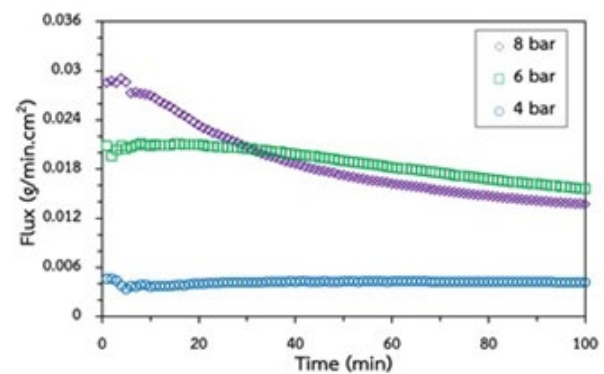
3.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรอง

โปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UP150 และ UH030 แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 พบว่าฟลักซ์เพอร์มิเอทมีความคล้ายคลึงกัน คือที่สภาวะเริ่มต้นการกรอง ณ ความดัน 8 บาร์ มีค่าฟลักซ์สูงสุด ทั้งนี้เพราะเป็นความดันในการดำเนินการสูงสุดส่งผลให้มีแรงขับสูงสุดผ่านเมมเบรน อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาการกรอง นานขึ้นความดันที่สูงอาจส่งผลทำให้อนุภาคถูกอัดแน่น ที่ผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุนมากขึ้น จึงทำให้ ค่าฟลักซ์ลดลง ซึ่งพบว่าค่าฟลักซ์สุดท้าย ณ ความดัน 8 บาร์ของเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดมีค่าต่ำกว่าความดัน 6 บาร์ และเมื่อเปรียบเทียบ โปรไฟล์ฟลักซ์ของเมมเบรน UP150 ที่ความดัน 4 และ 6 บาร์ พบว่าฟลักซ์มีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกอย่างสั้นๆ และลดลงเข้าสู่สภาวะคงที่ตามระยะเวลาการกรอง ทั้งนี้เป็นเพราะในช่วงเริ่มต้นของ ระบบที่มีความดันต่ำกว่านั้น อนุภาคขนาดใหญ่ยังคงแขวนลอยในสารละลาย จึงเกิดการซึมผ่านของเพอร์มิเอทอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาการกรองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเมมเบรน ส่งผลให้ความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีการลดลงของฟลักซ์

ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UH030 ที่ความดัน 4 และ 6 บาร์ มีโปรไฟล์ที่คล้ายคลึงกันและมีความแตกต่างของค่าฟลักซ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบความดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์เพอร์มิเอท [11]



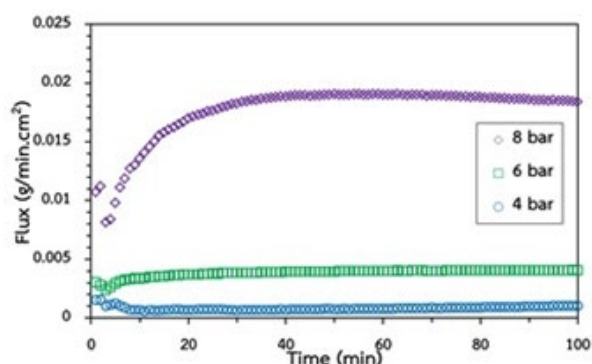
รูปที่ 5 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UP150 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์



รูปที่ 6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UH030 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์

ฟลักซ์เพอร์มิเอทของ UP010 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์ แสดงดังรูปที่ 7 พบว่าเมื่อเทียบกับเมมเบรน UP150 และ UH030 โปรไฟล์ฟลักซ์มีความแตกต่าง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดรูพรุนที่เล็กลงของ UP010 ร่วมกับสภาวะโพลาลิเซชันของความเข้มข้นและฟาล์วลิ่ง ความแตกต่างของ UP010 อาจเกิดจากการอุดตันที่ผิวหน้าเมมเบรน อนุภาคของสารไม่สามารถผ่านรูพรุนขนาดเล็กได้ กล่าวคือเมื่อขนาดของอนุภาค

และรูพรุนมีความแตกต่างกันอย่างมาก มีผลทำให้สารไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนได้ จึงลดการอุดตันภายในรูพรุนประกอบกับระบบมีตัวกวนจึงทำให้อนุภาคขนาดใหญ่มีการกระจายในเฟสของน้ำมันและอนุภาคเกิดการรวมตัวทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ในช่วงเริ่มต้นแทน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12]



รูปที่ 7 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรนระดับ UP010 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์

รูปที่ 5, 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทเพิ่มขึ้นเมื่อ MWCO ของเมมเบรนสูงขึ้น นอกจากนี้ความดันในการดำเนินการที่สูงมีผลต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการเลือกใช้เมมเบรนที่มี MWCO ขนาดเล็กควบคู่กับความดันสูง ดังรูปที่ 8 ไม่ทำให้ค่าฟลักซ์ดีขึ้นเสมอไป ดังตารางที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [13]

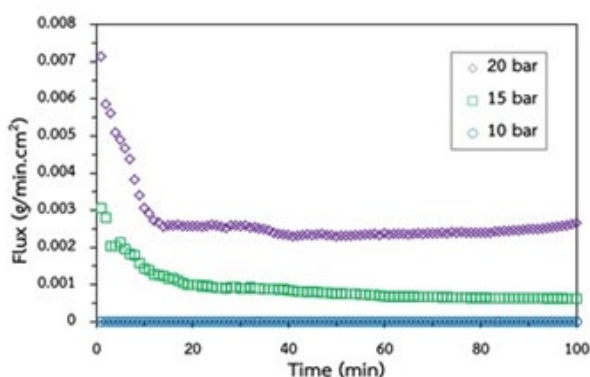
ในทำนองเดียวกันฟลักซ์เพอร์มิเอทของ UP005 แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าความดันมีผลต่อค่าฟลักซ์อย่างมีนัยสำคัญ โปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ความดัน 15 และ 20 บาร์ มีความคล้ายคลึงกัน คือมีการลดลงในช่วงเริ่มต้นทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากระบบดำเนินการที่ความดันสูงทำให้อนุภาคถูกบีบอัดผ่านรูพรุนไปยังกระแสน้ำเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้นและฟัลลิ่ง

อย่างไรก็ตามโปรไฟล์ที่ความดัน 10 บาร์ มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับเมมเบรน UP010 ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างขนาดอนุภาคและรูพรุนเป็นหลัก ในสถานะที่ความดันไม่สูงมากเกินไป ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทเริ่มต้นและฟลักซ์สุดท้ายของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันจากตารางที่ 2 พบว่า ฟลักซ์สุดท้ายของเมมเบรน UP010 ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์ของงานวิจัยของ Saleh และคณะ (2010) ซึ่งทดลองการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซลด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์พอลิอะคริไนด์ไทรล์ (polyacrylonitrile) ขนาด 10 kDa

ตารางที่ 2 ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน อัลตราฟิลเตรชัน ทั้ง 4 ชนิด

Membrane	Pressure	Initial flux	Final flux
UP150	4	0.0092	0.0058
	6	0.0331	0.0213
	8	0.0479	0.0185
UH030	4	0.0046	0.0042
	6	0.0209	0.0156
	8	0.0286	0.0137
UP010	4	0.0015	0.0011
	6	0.0031	0.0041
	8	0.0107	0.0184
UP005	10	n/a*	0.00005
	15	0.0031	0.0006
	20	0.0071	0.0027

*n/a เนื่องจากปริมาณเพอร์มิเอทมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 8 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UP005 ที่ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์

3.2 การกักกันกลีเซอรอล

ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ชนิด แสดงได้ดังตารางที่ 3 พบว่าเมมเบรนชนิด UH030 และ UP010 ให้ค่าความสามารถการกักกันที่ใกล้เคียงกันและให้ค่าสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 91-97 ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดเพื่อแยกกลีเซอรอล

ตารางที่ 3 ความสามารถในการกักกันกลีเซอรอลของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

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

ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเมมเบรนมีน้ำหนักโมเลกุลตัดน้อยลงแต่พบว่าเมมเบรน UP005 ให้ค่าความสามารถการกักกันกลีเซอรอลในช่วงร้อยละ 4-8 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UP005 มีค่าน้อยจึงส่งผลต่อการวิเคราะห์

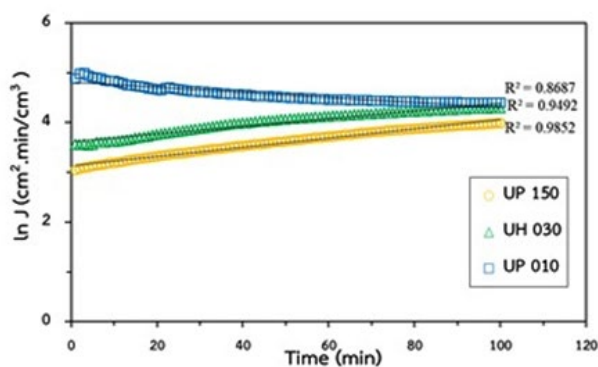
ปริมาณเนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลอิสระที่ตกจมลงไปที่ผิวหน้าเมมเบรน ประกอบกับความดันในการดำเนินงานที่สูงกว่า UP150, UH030 และ UP010 ประมาณ 3-5 เท่า ทำให้เกิดการผลักกลีเซอรอลผ่านไปยังกระแสเพอร์มิเอท จากผลของความสามารถในการแยกกลีเซอรอลจึงสนับสนุนว่าการเลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาดโมเลกุลตัดที่ต่ำร่วมกับการใช้ความดันสูงในการแยกสารไม่ได้ให้ผลในการแยกที่ดีเสมอไป กระบวนการแยกสารด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอย่างอื่นควบคู่ เช่น ความดันองค์ประกอบของสารป้อน

3.3 กลไกฟาล์วลิ่ง

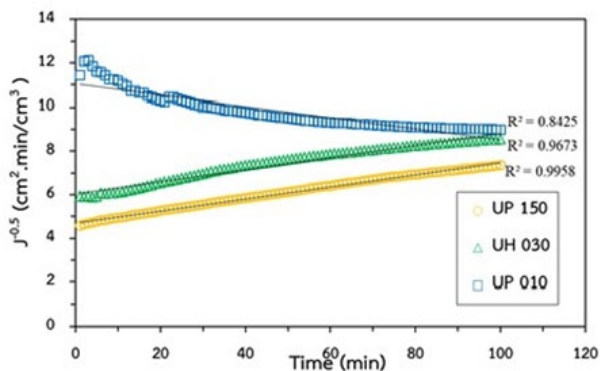
กลไกฟาล์วลิ่งโดยใช้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่คำนวณได้ตามตารางที่ 1 ของการกรองอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ชนิด ณ ความดันสูงสุด แสดงได้ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 9 (ก)-(ง) แสดงกราฟการถดถอยเชิงเส้นตรงของเมมเบรน UP150, UH030 และ UP010 เนื่องจากเมมเบรน UP005 มีช่วงกราฟที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่สามารถแสดงผลในกราฟเดียวกันได้

ตารางที่ 4 ค่า R^2 ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ชนิด

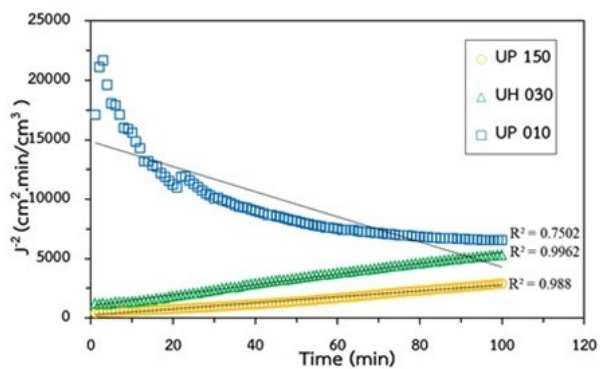
Mem-brane	Regression Coefficient, R^2			
	CBM	IBM	SBM	CFM
UP150	0.985	0.999	0.995	0.988
UH030	0.949	0.981	0.967	0.996
UP010	0.868	0.814	0.843	0.750
UP005	0.953	0.895	0.927	0.816



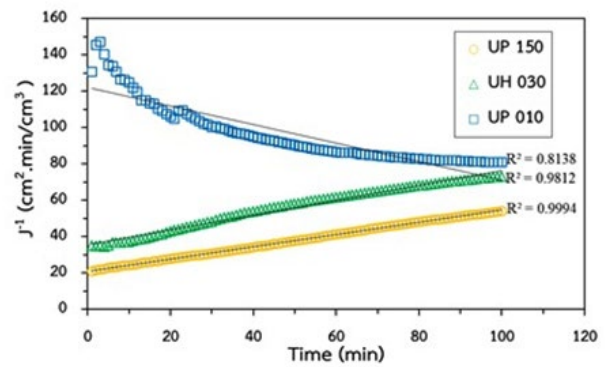
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 9 ผลของ MWCO ต่อกลไกฟาล์วลิ่ง:

(ก) CBM, (ข) IBM, (ค) SBM และ (ง) CFM

3.2 การกักกันกลีเซอรอล

ผลการทดลองพบว่าเมมเบรน UP150 ให้ค่า R^2 สูงทุกแบบจำลองมีแนวโน้มการเกิดฟาล์วลิ่งด้วยกลไกชนิดการอุดตันของรูพรุน (pore blocking) สำหรับ UP005 พบว่ากลไกการอุดตันของรูพรุนเป็นแบบ CBM ด้วยค่า R^2 สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น

เมื่อพิจารณาการอุดตันของเมมเบรน UP010 มีแนวโน้มให้ค่า R^2 ต่ำกว่าเมมเบรนชนิดอื่น แต่มีแนวโน้มเกิดการอุดตันของรูพรุน ทั้งนี้แสดงถึงการรวมตัวของอนุภาคที่ผิวหน้าของเมมเบรนส่งผลให้อนุภาคไม่สามารถผ่านรูพรุนได้และลดปริมาตรรูพรุนในระหว่างการกรอง สำหรับเมมเบรน UH030 พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับกลไกการกรองแบบเค้ก

4. สรุปผล

ผลการศึกษาการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลในการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP150, UH030, UP010 และ UP005 พบว่า MWCO และความดันมีผลต่อฟลักซ์เพอร์-มิเอทความสามารถการกักกัน และกลไกฟาล์วลิ่ง งานวิจัยนี้พบว่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสมควร ใช้เมมเบรน

UH030 ที่ความดัน 6 บาร์ โดยให้ค่า ฟลักซ์เพอร์มิเอต อยู่ในช่วง 0.0209-0.0156 g/min.cm² ความสามารถ กำกั้นกลีเซอรอลร้อยละ 93.11 และมีกลไกฟาล์วถึง แบบเค็ก ผลการทดลองแสดงถึงความเป็นไปได้ในการ ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเพื่อแยกกลีเซอรอล ในกระบวนการ ผลิตไบโอดีเซล

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทน้ำมันพืชปทุม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลดิบสำหรับ งานวิจัย และขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยเงิน งบประมาณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Atadashi I.M, Aroua M.K, Abdul A. Biodiesel separation and purification: A review. Renewable Energy. 2011;36, 437-443.
- [2] Yong W, Xingguo W, Yuanfa L., Shiyi O, Yanlai T, Shuze T. Refining of biodiesel by ceramic membrane separation. Fuel Processing Technology. 2009; 90, 422-427.
- [3] Rungsinee K. Degumming in rice bran oil with nanofiltration membrane technology. The 15th TSAE National Conference and the 7th inter national conference. 2014. (in Thai)
- [4] Chiranun K. Phospolipid removal of Jatropa oil and rice bran oil by ultrafiltration. The 10th RMUTT graduate research conference. 2015. (in Thai)
- [5] Juan T, Natalia R, Javier A, Nelio O, José M. Ultrafiltration polymeric membrane for the purification of biodiesel from ethanol. Journal of Cleaner Production. 2017; 141, 641-647.
- [6] Magno A, Suellen N, Lara P, Maria M, Vicelma C, Miria R. Biodiesel purification micro and ultrafiltration membranes. Renewable Energy. 2013; 58, 15-20.
- [7] Maria G, Pedro A, Nehemias P. Biodiesel production from degummed soybean oil and glycerol removal using ceramic membrane. Journal of Membrane Science. 2011; 378, 453-461.
- [8] Jehad S, Andr'e T, Marc D. Glycerol removal from biodiesel using membrane separation technology. Fuel. 2010; 89, 2260-2266.
- [9] M. Cinta V, Silvia B, Jaime G, Enrique R. Analysis of membrane pore blocking models applied to the Ultrafiltration of PEG. Separation and Purification Technology . 2008;62 , 489-498.

- [10] Indok A, Abdul M, Mastura P, Nidal H. Analysis of deposition mechanism during ultrafiltration of glycerin-rich solutions. *Desalination*. 2010;261 , 313-320.
- [11] Mehrdad H, Agnieszka N. The influence of different factors on the stability and ultrafiltration of emulsified oil in water. *Journal of Membrane Science*. 2008; 325, 199-208.
- [12] Maria G, Nehemias P, Sueli B. Separation of biodiesel and glycerol using ceramic membrane. *Journal of Membrane Science*. 2010; 352, 271-276.
- [13] Maria G, Pedro A, Nehemias P. Influence of acidified water addition on the biodiesel and glycerol separation through membrane technology. *Journal of Membrane Science*. 2013; 431, 28-36.