

การแยกเซลลูเลสและน้ำตาลรีดิวซ์จากสารละลายไฮโดรไลเซต ของหญ้าเนเปียร์ด้วยกระบวนการเมมเบรน

มินทิตา พิเชฐพงศ์วิมุตติ^{1*}, อีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย² และจุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ³
mintita_p@rmutt.ac.th¹, thirawat.m@en.rmutt.ac.th², juraivan.r@en.rmutt.ac.th³

^{1*–3} ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 12-Nov-2018
Revised	: 22-Feb-2019
Accepted	: 12-Mar-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกเซลลูเลสด้วยการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน (UF) และการกักกันน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน (NF) จากสารละลายไฮโดรไลเซตของหญ้าเนเปียร์ การทดลองประกอบด้วยเมมเบรน 5 ชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง (MWCO) ต่างกันดังนี้ การกรองระดับ UF (PES500, PES100, PES10) และการกรองระดับ NF (NP010, NP030) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันทำการกรองแบบไหลขวางที่อัตราการไหล 3 ค่า (30, 50 และ 75 mL/min) โดยสารละลายเพอร์มิเอตของ UF ถูกป้อนเข้าสู่การกรองนาโนฟิลเตรชันแบบปิดตายที่ความดันคร่อมเมมเบรน (TMP) 4 ค่า (10, 15, 20 และ 25 bar) ผลการทดลองพบว่า ฟลักซ์เพอร์มิเอตสัมพันธ์กับอัตราการไหลและ TMP อย่างมีนัยสำคัญ เมมเบรน PES100 อัตราการไหล 75 mL/min ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงสุดของการกรอง UF สำหรับค่าการกักกันเซลลูเลส น้ำตาล และเอทานอลของการกรองระดับ UF และ NF สัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่า MWCO กลไกฟาล์วลิ่งแบบเค้กบนฐานแบบจำลองเฮอร์เมียร์ให้ค่า R^2 สูงสุด สำหรับฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ (IF) พบว่าเมมเบรน PES100 ให้ค่า IF ต่ำที่สุด (14.3%) ณ อัตราการไหลต่ำ (30 mL/min) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ค่า IF สัมพันธ์กับขนาดรูพรุนและ TMP

คำสำคัญ: ไฮโดรไลเซต อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน ฟาล์วลิ่ง

Separation of Cellulase and Reducing Sugar from Napier Grass Hydrolyzate by Membrane Filtration

Mintita Pichadpongwimut^{1*}, Thirawat Mueansichai² and Juraivan Ratanapisit³
mintita_p@rmutt.ac.th¹, thirawat.m@en.rmutt.ac.th², juraivan.r@en.rmutt.ac.th³

^{1*3} Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi

Received	: 12-Nov-2018
Revised	: 22-Feb-2019
Accepted	: 12-Mar-2019

Abstract

This study investigated separation of cellulase by ultrafiltration (UF) and reducing sugar by nanofiltration (NF) from the Napier grass hydrolyzate. Experiments were consisted of 5 membranes with different molecular weight cut-off (MWCO): PES500, PES100, PES10 for UF and NP010, NP030 for NF. The UF cross-flow study was carried out at 3 flow rates (30, 50 and 75 mL/min). Permeate from the UF was used as a feed to a dead-end NF which was operated for 4 transmembrane pressure (TMP) (10, 15, 20 and 25 bar). Results showed that the permeate flux was significantly related to the flow rate and TMP. The PES100 yielded the best flux for UF at 75 mL/min. Also the rejection of cellulase, reducing sugar 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 irreversible fouling (IF) of PES100 was the lowest (14.3%) at the low flow rate (30 mL/min) which related to the declining of the permeate flux. In addition, the IF was influenced by the MWCO and TMP in the limit of higher feed flow rate.

Keywords: Hydrolyzate, ultrafiltration, nanofiltration, fouling

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการผลิตเอทานอลจากวัสดุเซลลูโลสอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและไม่ส่งผลกระทบต่อวงจรอาหารของมนุษย์ [1] แต่การใช้วัสดุเซลลูโลสยังมีข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเอนไซม์ เพราะเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในกระบวนการเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลมีราคาสูงและที่ผ่านมามีการใช้เอนไซม์มักเป็นแบบใช้แล้วทิ้ง ไม่มีการนำกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งถือว่าไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [2] จึงมีการนำเสนอวิธีการนำกลับเซลลูเลสด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีการดูดซับคายซับของเอนไซม์ [3], การตรึงเอนไซม์เซลลูเลสบนแม่เหล็กอนุภาคนาโน [4], การใช้ไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน [5] และการกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันในระบบการกรองแบบปิดตาย [6] ซึ่งพบว่าหลายวิธีการนำกลับมีศักยภาพในการนำไปใช้งานได้

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมีจุดเด่นด้านการใช้พลังงานต่ำ สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนไหวต่อความร้อน และทำให้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นขึ้น จึงเป็นการแยกและทำให้บริสุทธิ์ได้พร้อมกัน กระบวนการนี้สามารถจำแนกได้ตามน้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้นได้หลายระดับและหนึ่งในนั้นคือ กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคหรือตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1,000-500,000 ดัลตัน ไม่ให้ผ่านเมมเบรนออกไป สามารถดำเนินการได้ในสภาวะอุณหภูมิห้องและที่ความดันไม่สูงมาก [7] การประยุกต์ใช้งานเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ การแยกโปรตีนเป็นต้น กระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจในการแยก เซลลูเลสออกจากส่วนละลายไฮโดรไลเซต เพื่อนำเซลลูเลสกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากเมมเบรนระดับนี้มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับน้ำหนัก

โมเลกุลเซลลูเลส [8,9] การใช้เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน (NF) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ถือเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจากในกระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอลใช้ยีสต์เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล ปริมาณยีสต์และความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่มากพอมีผลต่อปริมาณเอทานอลและคุณภาพของเอทานอล [10] ซึ่งหลังจากกระบวนการแยกเซลลูเลส ในระดับอัลตราฟิลเตรชันจะได้สารละลายที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลรีดิวซ์, สารละลายไฮโดรไลเซตและเซลลูเลส เป็นต้น บางส่วนที่ลอดผ่านเมมเบรนออกมา [11] ถ้าหากทำการกรองสารละลายดังกล่าวในขั้นที่สองโดยใช้เมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองที่เล็กลง (นาโนฟิลเตรชัน) จะสามารถแยกน้ำตาลรีดิวซ์ ออกจากสารละลายได้ [12] และหลังจากกระบวนการแยกจะได้น้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงพร้อมที่จะเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลกับสารละลายที่สามารถนำกลับเข้ามาสู่ในกระบวนการหมักตอนเริ่มต้นได้อีกครั้ง [6,13]

อย่างไรก็ตามกระบวนการเมมเบรนมีข้อจำกัดของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและฟาล์วลิ่ง ทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลง [14] ปัญหานี้สามารถบรรเทาได้หากเข้าใจกลไกฟาล์วลิ่ง ซึ่งแบบจำลองเฮอร์เมียร์ถูกนำมาใช้เพื่อหาชนิดฟาล์วลิ่งของระบบ การปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินการมีผลฟาล์วลิ่งแบบผันกลับได้ในขณะที่ฟาล์วลิ่งแบบ ผันกลับไม่ได้เกิดจากการอุดตันของอนุภาคทั้งภายในและภายนอกของรูพรุน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถกำจัดออกได้โดยการล้างด้วยสารเคมี [15]

ถึงแม้ว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกเซลลูเลสด้วยเมมเบรน แต่กระบวนการที่ใช้ระบบการกรองต่อเนื่องแบบไหลขวาง ยังไม่มีผลการศึกษามากนัก อีกทั้งการศึกษากักกันน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ในขั้นตอนที่ 2 นั้นก็มีการศึกษาอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

การศึกษากลไกฟาล์วสิ่งจากสารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนทั้ง UF และ NF ที่มีอยู่น้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาฟลักซ์เพอร์มิเอตและความสามารถในการกักกันของเซลล์ูล์น้ำตาลรีดิวิซ์ และเอทานอล โดยมีขนาดรูพรุนเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน สำหรับการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันดำเนินการด้วยชุดเครื่องมือแบบไหลขวางที่อัตราการไหลของสารป้อนต่างกัน และการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันดำเนินการด้วยชุดเครื่องมือแบบปิดตายที่ความดันของระบบต่างกัน รวมทั้งศึกษาการลดลงของฟลักซ์เพอร์มิเอตเทียบกับเวลา เพื่อหากลไกฟาล์วสิ่งด้วยแบบจำลองเฮอร์เมียร์และฟาล์วสิ่งแบบผันกลับไม่ได้ โดยใช้สารละลายไฮโดรไลเซทจากหญ้า เนเปียร์

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 หญ้าเนเปียร์, ครูดเซลล์ูล์และเมมเบรน

หญ้าเนเปียร์สด จากจังหวัดพระนครศรีอยุธยา นำมาตัดให้มีขนาดประมาณ 1-2 cm จากนั้นนำไปอบจนมีความชื้นน้อยกว่า 12%

ครูดเซลล์ูล์เป็นจุลินทรีย์ผสมระหว่าง เชื้อรา *Trichoderma reesei* และยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* จากห้องปฏิบัติการชีวเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นชนิดโพลีอีเทอร์ซัลโฟน (PES) ชนิดเส้นใยกลวงเกรดการค้า (Spectrum Lab, USA) สำหรับการกรองระดับ อัลตราฟิลเตรชัน แลเมมเบรนชนิดแผ่นเกรดการค้า (Microdyn-Nadir, Germany) สำหรับการกรองระดับ นาโนฟิลเตรชัน คุณสมบัติของเมมเบรนแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเมมเบรน

เมมเบรน	อัลตราฟิลเตรชัน		
	PES500	PES100	PES10
MWCO	500 kDa	100 kDa	10 kDa
พื้นที่ (cm ²)	245	155	155
เมมเบรน	นาโนฟิลเตรชัน		
	NP010	NP030	
ค่าการกักกัน Na ₂ SO ₄ (%)	35-75	80-95	
พื้นที่ (cm ²)	196.3	196.3	

2.2 กระบวนการปรับสภาพและการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซท

หญ้าเนเปียร์ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2% (w/v) ปริมาณ 300 ml ต่อปริมาณหญ้า เนเปียร์ 50 g จากนั้นนำไปเข้าหม้อนึ่งความดัน ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 1 hr จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนสภาพเป็นกลาง อบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C จนหญ้าเนเปียร์มีความชื้นต่ำกว่า 12% [16]

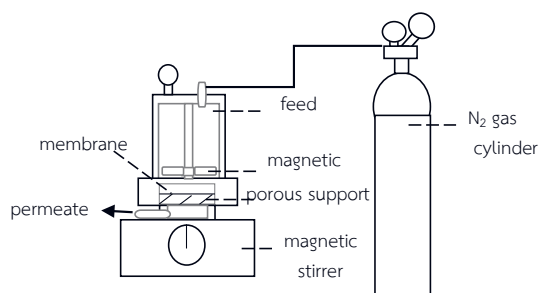
นำหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพข้างต้น 300 g ผสมกับอาหารเหลว 6 L และครูด เซลล์ูล์ 300 g ผสมให้เข้ากัน จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณเซลล์ูล์ แอคติวิตี, น้ำตาลรีดิวิซ์ และเอทานอล ทุกวันจนกระทั่งมีปริมาณเซลล์ูล์ แอคติวิตีสูงสุดจึงยุติการไฮโดรไลเซท จากนั้นแยกสารละลายของเหลวออกจากของแข็งผ่านการกรองด้วยผ้าขาวบาง ของเหลวที่ได้นำไปเหวี่ยงแยกด้วยความเร็วรอบ 3,500 rpm เป็นเวลา 10 min สารละลายส่วนใสนำไปใช้เป็นสารป้อนของกระบวนการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน

2.3 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการกรองระดับ อัลตราฟิลเตรชันเป็นแบบไหลขวาง (บริษัท Spectrum Lab, USA) ทำการกรองโดยใช้อัตราการไหล 3 ค่า คือ 30, 50 และ 75 ml/min

กรองจนกระทั่งได้ปริมาณเพอร์มิเอตเป็น 60% ของปริมาณสารป้อน จากนั้นจึงยุติการกรอง ซึ่งระหว่างกระบวนการกรองได้ทำการเก็บค่าฟลักซ์ทุก 1 min จากนั้นนำสารละลายทั้งกระแสปอร์มิเอตและรีเทนเทตวิเคราะห์ปริมาณเซลล์เลส, น้ำตาลรีดิคซ์ และเอทานอล หลังการใช้งานทุกครั้งทำความสะอาดเมมเบรน ด้วยน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อฟื้นฟูสภาพพร้อมกับการล้างย้อนกลับและตรวจสอบฟลักซ์ก่อนใช้งานในครั้งถัดไป รวมทั้งวัดค่าฟลักซ์น้ำกลั่นก่อนและหลังการทดลอง ณ อัตราการไหล 20 mL/min เพื่อตรวจสอบฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้

สารละลายที่ได้จากเพอร์มิเอตของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันถูกนำมาใช้เป็นสารป้อนของระบบการกรองนาโนฟิลเตรชันแบบปิดตาย แผนภาพเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งในการทดลองใช้ความดัน 4 ค่า คือ 10, 15, 20 และ 25 bar และเวลาการกรอง 2 hr บันทึกค่าฟลักซ์ทุก 1 min หลังกระบวนการทำการวิเคราะห์ปริมาณต่างๆ เช่นเดียวกับการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน โดยก่อนและหลังกระบวนการได้ทำการกรองด้วยน้ำกลั่นที่ ความดัน 10 bar เพื่อตรวจสอบกลไกการเกิดฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้



รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องมือการกรองปิดตาย

2.4 การวิเคราะห์

ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต สามารถคำนวณได้จากสมการ 1

$$J = V / (A \cdot t) \quad (1)$$

โดย J คือค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต ($\text{g/cm}^2 \text{min}$), V คือปริมาณเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน (g), A คือพื้นที่การกรอง (cm^2) และ t คือช่วงเวลาการกรอง (min) [17]

ความสามารถการกักกันเซลล์เลสและน้ำตาลรีดิคซ์ และเอทานอล (%R) คำนวณได้ดังสมการ 2

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

โดยที่ C_p และ C_r คือความเข้มข้นของตัวละลายในเพอร์มิเอตและรีเทนเทต ตามลำดับ (g/L) [17]

กลไกฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้ความดันคงที่สามารถวิเคราะห์จากแบบจำลองเฮอร์เมียร์ [18] คำนวณได้ดังสมการ 3

$$d^2t/dV^2 = k (dt/dV)^n \quad (3)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่ของการเกิดฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้ตามแบบจำลองต่างๆ โดยหน่วยจะขึ้นอยู่กับค่า n และ n คือค่าคงที่ขึ้นกับชนิดกลไกฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของชนิดกลไกฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้

Fouling model	n
complete	2
standard	3/2
intermediate	1
cake	0

กลไกฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้
สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และ 5

$$L_p = J / TMP \quad (4)$$

$$IF = (L_{pb} - L_{pa}) / L_{pb} \quad (5)$$

โดย L_p คือค่าการซึมผ่านของน้ำบริสุทธิ์ ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{min bar}$), J คือฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{min}$), TMP คือความดันที่คร่อมเมมเบรน (bar), IF คือฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้, L_{pb} และ L_{pa} คือค่าการซึมผ่านของน้ำบริสุทธิ์ก่อนและหลังกรอง [6]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

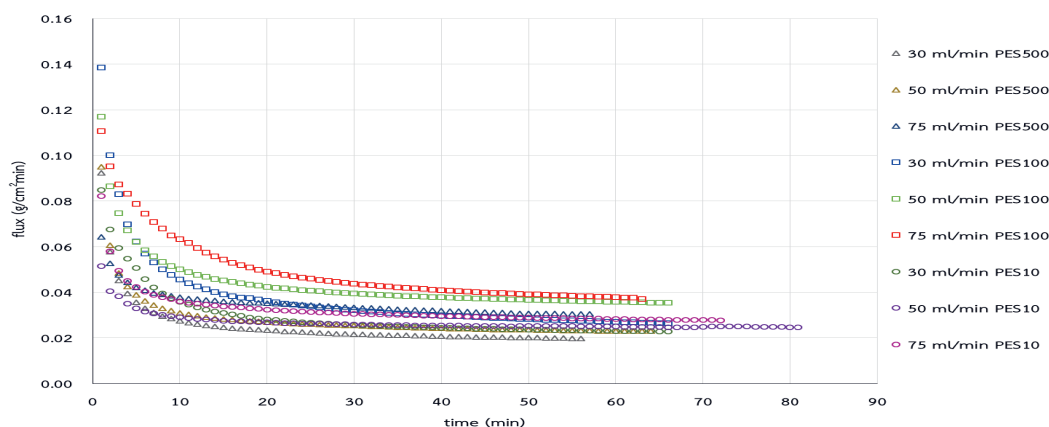
3.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอเตอร์ระดับอัลตราฟิลเตรชัน

จากรูปที่ 2 พบว่าที่อัตราการไหลสูงขึ้น ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่สภาวะคงตัวสูงขึ้นตาม ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลสูงสามารถกวาดอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนได้มากกว่า ความต้านทานการไหลที่ผิวหน้าเมมเบรนจึงลดลง [19] และเมื่อพิจารณาที่น้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองของเมมเบรนที่แตกต่างกันพบว่าเมมเบรน PES100 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงสุด รองลงมาคือ PES10 และ PES500 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก PES500 อาจเกิดการอุดตันของอนุภาคที่รูพรุน ส่งผลให้เกิดความ

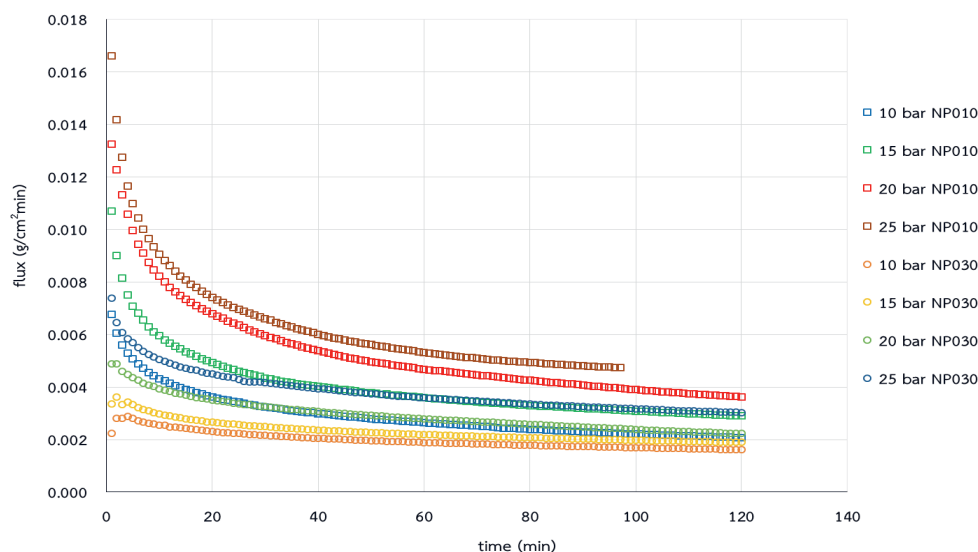
ต้านทานการไหลสูง ดังนั้นค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงตัวจึงมีค่าต่ำ ในขณะที่ PES100 มีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่า ฟาล์วลิ่งส่วนใหญ่น่าจะมาจากการเกาะตัวที่ผิวหน้าเมมเบรน จึงอาจส่งผลต่อค่า ฟลักซ์เพอร์มิเอตที่สูงกว่า PES500 สำหรับเมมเบรน PES10 ที่มีขนาดรูพรุนเล็กที่สุดนั้น ทำให้มีความต้านทานการไหลสูงกว่าที่เมมเบรน ขนาดรูพรุนใหญ่ [20]

3.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอเตอร์ระดับนาโนฟิลเตรชัน

จากรูปที่ 3 พบว่าช่วงเริ่มต้นมีการลดลงของค่าฟลักซ์อย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันร่วมกับการเกิดฟาล์วลิ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงเริ่มต้นที่ความดัน 25 บาร์ เมมเบรน NP030 มีลักษณะโปรไฟล์ ฟลักซ์คล้ายกับ NP010 แต่ที่ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์มีลักษณะที่แตกต่าง นั่นคือ ในตอนเริ่มต้นมีค่าฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและจึงลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวทั้งนี้เป็นเพราะเมมเบรน NP030 มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า NP010 ดังนั้นกลไกการไหลผ่านอาจเป็นผลมาจากการแพร่ซึมและการอุดตัน ของอนุภาคภายในรูพรุนมีโอกาสเกิดขึ้น ได้น้อยกว่า การซึมผ่านจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่า



รูปที่ 2 ฟลักซ์เพอร์มิเอตอัลตราฟิลเตรชัน



รูปที่ 3 ฟลักซ์เพอร์มิเอตนาโนฟิลเตรชัน

ประกอบกับระบบดำเนินการที่สภาวะความดันต่ำทำให้มีกลไกการเกิดฟัลวลิงเกิดได้ช้ากว่า [21] และเมื่อพิจารณาฟลักซ์ที่สภาวะคงตัวของทั้ง 2 เมมเบรนพบว่าที่ความดันสูง ให้ค่าฟลักซ์สูงกว่าที่ความดันต่ำ เพราะมีแรงผลักดันไปยังผิวหน้าเมมเบรนได้มากกว่า [22]

3.3 ความสามารถในการกักกันของเซลลูเลส, น้ำตาลรีดิคซ์ และเอทานอล

การศึกษาการกักกันเซลลูเลส น้ำตาลและเอทานอลในสารละลายไฮโดรไลเซตของเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า เมมเบรน PES10 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองน้อยที่สุด ให้ค่าการกักกันเซลลูเลส แอคติวิตี, น้ำตาลและเอทานอลสูงที่สุด เท่ากับ 67.5%, 36.9% และ 30.7% ซึ่งมีความเข้มข้นของเซลลูเลส แอคติวิตี เท่ากับ 2.247 g/L รองลงมาคือ PES100 และ PES500 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองต่ำจะมีขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่เล็กจึงทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนผ่านไปยัง

กระแสน้ำได้ยากกว่าเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองสูง กล่าวคือความสามารถในการกักกันมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดรูพรุน เช่นเดียวกับที่เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันจึงสามารถกักกันเซลลูเลสที่หลงเหลือจากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันได้สูง และสามารถกักกันน้ำตาลรีดิคซ์ได้มากกว่าด้วยเช่นกัน โดยที่เมมเบรน NP030 สามารถกักกันน้ำตาลรีดิคซ์ได้สูงถึง 50.7% หรือเท่ากับ 10.045 g/L อีกทั้งยังสามารถกักกันเอทานอลได้ในปริมาณที่มากพอสมควร [22,23] ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Benkun Qi และคณะ [6] ซึ่งทำการศึกษาการกักกัน เซลลูเลส/โปรตีน ด้วยระบบการกรองแบบปิดตายพบว่าให้ค่าการกักกันน้อยกว่าระบบไหลขวาง (0.108 g/L) แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิคซ์ที่ระบบการกรองระบบเดียวกันพบว่าให้ค่าความเข้มข้นน้อยกว่าเนื่องจากเซลลูเลสที่นำมาใช้สามารถทำงานได้สองกระบวนการพร้อมกันน้ำตาลรีดิคซ์บางส่วนจึงถูกเปลี่ยนไปเป็นเอทานอล

3.4 กลไกการเกิดฟัลวลิ่งด้วยแบบจำลองเฮอร์เมียร์

จากข้อมูลที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ตามแบบจำลองเฮอร์เมียร์ พบว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่อาจจะเกิดกลไกฟัลวลิ่งได้ทั้ง 4 แบบ เนื่องจากค่า R^2 ที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ 1 อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดฟัลวลิ่งแบบ cake formation ยังคงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ intermediate blocking, standard blocking และ complete blocking ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นเช่นนี้ทุกอัตราการไหลและทุกชนิดเมมเบรน

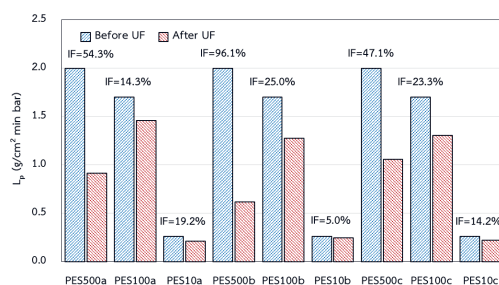
ตารางที่ 3 เปอร์เซนต์การกักกันเซลลูเลส แอคติวิตี้, น้ำตาลรีดิวิซ์และเอทานอล

เมมเบรน	เปอร์เซนต์การกักกัน		
	เซลลูเลส	น้ำตาลรีดิวิซ์	เอทานอล
PES500	32.4	21.6	8.9
PES100	51.6	26.1	20.1
PES10	67.5	36.9	30.7
NP010	97.5	47.4	31.9
NP030	99.0	50.7	38.4

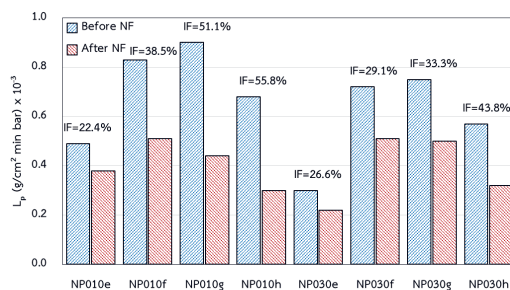
3.5 การเกิดฟัลวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้

ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 30 ml/min เมมเบรน PES100 ให้ค่าฟัลวลิ่ง แบบผันกลับไม่ได้ (IF) ต่ำที่สุด ในขณะที่เมมเบรน PES500 ให้ค่า IF สูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต ฟัลวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ยังขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนเช่นกัน นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นค่า IF แปรผันตรงกับโมเลกุลตัดการกรองอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าขนาดอนุภาคมีโอกาที่จะกักกันอนุภาคไว้ที่ผิวหน้า

เมมเบรนในขณะที่เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่มีแนวโน้มให้อนุภาคไหลเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนได้มากกว่าจึงทำให้ค่า IF สูงกว่า [24] และเมื่อพิจารณาการเกิดฟัลวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ของเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน (รูปที่ 5) พบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า (NP030) เกิดการอุดตันแบบผันกลับไม่ได้ต่ำกว่าเช่นเดียวกับเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน แต่เมื่อพิจารณาจากค่าความดันคร่อมเมมเบรนพบว่า ที่ความดันสูงขึ้น ค่า IF สูงขึ้นตาม ทั้งนี้เป็นเพราะระบบการกรองแบบปิดตายนั้น เมื่อความดันสูงขึ้นจะผล็้อนุภาคเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนเมมเบรนได้มากกว่าความดันต่ำ [24]



รูปที่ 4 IF ของเมมเบรน UF (a, b, c คือ อัตราการไหล 30, 50, 75 ml/min)



รูปที่ 5 IF ของเมมเบรน NF (e, f, g, h คือ ความดัน 10, 15, 20 และ 25 บาร์)

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ การตัดสินใจต่อแบบจำลองเฮอร์เมียร์

เมม- เบรน	R ²			
	CBM	IBM	SBM	CFM
PES500	0.918 ^a	0.959 ^a	0.941 ^a	0.983 ^a
	0.918 ^b	0.945 ^b	0.933 ^b	0.969 ^b
	0.917 ^c	0.935 ^c	0.926 ^c	0.950 ^c
PES100	0.931 ^a	0.970 ^a	0.954 ^a	0.990 ^a
	0.959 ^b	0.977 ^b	0.969 ^b	0.987 ^b
	0.958 ^c	0.974 ^c	0.967 ^c	0.986 ^c
PES10	0.951 ^a	0.971 ^a	0.963 ^a	0.980 ^a
	0.837 ^b	0.858 ^b	0.848 ^b	0.874 ^b
	0.911 ^c	0.943 ^c	0.928 ^c	0.967 ^c
NP010	0.875 ^d	0.956 ^d	0.921 ^d	0.994 ^d
	0.771 ^e	0.910 ^e	0.852 ^e	0.976 ^e
	0.812 ^f	0.925 ^f	0.877 ^f	0.979 ^f
	0.808 ^g	0.911 ^g	0.866 ^g	0.969 ^g
NP030	0.918 ^d	0.954 ^d	0.938 ^d	0.979 ^d
	0.886 ^e	0.934 ^e	0.912 ^e	0.968 ^e
	0.931 ^f	0.975 ^f	0.956 ^f	0.994 ^f
	0.870 ^g	0.936 ^g	0.906 ^g	0.976 ^g

^{a,b,c} คือ อัตราการไหล 30, 50 และ 75 mL/min และ ^{d,e,f,g} คือ ความดัน 10, 15, 20 และ 25 บาร์ ตามลำดับ

4. สรุป

ฟลักซ์เพอร์มิเอตมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล, TMP และขนาดรูพรุนของเมมเบรนอย่างมีนัยสำคัญโดยเมมเบรน PES100 สำหรับระบบ UF ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่ดีที่สุด ในขณะที่เมมเบรน NP030 ให้ค่า ฟลักซ์ดีกว่า NP010 นอกจากนี้เมมเบรน PES10 และ NP030 ให้ค่าการกักกันดีที่สุดในการกรองทั้ง 2 ระบบ นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกฟาล์วลิ่งด้วยแบบจำลองเฮอร์เมียร์อาจเป็นไปได้ทั้ง 4 แบบ โดยมีแนวโน้มการอุดตันแบบเค้กมากที่สุด สำหรับการเกิดฟาล์วลิ่งแบบแผ่นกลับไม่ได้มี

ความสัมพันธ์กับขนาดของรูพรุน อัตราการไหล และ TMP

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยเงินงบประมาณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gnansounou E, Dauriat A. Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: review. *Bioresource Technology*. 2010;101:4980-4991.
- [2] Gomes DG, Serna LS, Cardona AC, Gama M, Domingues L. Insights into the economic viability of cellulases recycling on bioethanol production from recycled paper sludge. *Bioresource Technology*. 2018;267:347-355.
- [3] Qi B, Chen X, Su Y, Wan Y. Enzyme adsorption and recycling during hydrolysis of wheat straw lignocellulose. *Bioresource Technology*. 2011;102: 2881-2889.
- [4] Khoshnevisan K, Vakhshiteh F, Barkhi M, Baharifar H, Poor AE, Zari N, Stamatis H, Bordbar AK. Immobilization of cellulase enzyme onto magnetic nanoparticles: Applications and recent advances. *Molecular Catalysis*. 2017;442: 66-73.
- [5] Chen G, Song W, Qi B, Lu J, Wan Y. Recycling cellulase from enzymatic hydrolyzate of acid treated wheat straw by electroultrafiltration.

- Bioresource Technology. 2013;144: 186-193.
- [6] Qi B, Luo J, Chen G, Chen X, Wan Y. Application of ultrafiltration and nanofiltration for recycling cellulase and concentrating glucose from enzymatic hydrolyzate of steam exploded wheat straw. Bioresour Technology. 2012;104:466-472.
- [7] Charcosset C. Membrane process in biotechnology: An overview. Biotechnology Advances. 2006; 24:482-492.
- [8] Saxena A, Tripathi BP, Kumar M, Shahi VK. Membrane based techniques for the separation and purification of proteins: An overview. Advances in Colloid and Interface Science. 2009;145:1-22.
- [9] Strathmann H. Membrane process in biotechnology. Trend in Biotechnology. 1985;3(5):112-118.
- [10] Jutakanoke R, Leepipatpiboon N, Tolieng V, Kitpreechavanich V, Srinorakutara T, Akaracharanya A. Sugarcane leaves: pretreatment and ethanol fermentation by *saccharomyces cerevisiae*. Biomass and Bioenergy. 2012;39:283-289.
- [11] Yang S, Ding W, Chen H. Enzymatic hydrolysis of corn stalk in a hollow fiber ultrafiltration membrane reactor. Biomass and Bioenergy. 2009;33: 332-336.
- [12] Goulas AK, Kapasakalidis PG, Sinclair HR, Rastall RA, Grandison AS. Purification of oligosaccharides by nanofiltration. Journal of Membrane Science. 2002;209(1): 321-335.
- [13] Qi B, Luo J, Chen X, Hang X, Wan Y. Separation of furfural from monosaccharides by nanofiltration. Bioresource Technology. 2011;102 (14):7111-7118.
- [14] Nurul I, Amin HM, Mohammad AW, Markom M, Peng LC, Hilal N. Analysis of deposition mechanism during ultrafiltration of glycerin-rich solutions. Desalination. 2010; 261:313-320.
- [15] Kanani DM, Sun X, Ghosh R. Reversible and irreversible membrane fouling during in-line microfiltration of concentrated protein solutions. Journal of Membrane Science. 2008;315:1-10.
- [16] Phitsuwan P, Sakka K, Ratanakhanokchai K. Structural changes and enzymatic response of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) stem induced by alkaline pretreatment. Bioresource Technology. 2016;218: 247-256.
- [17] Nguyen N, Fargues C, Guiga W, Lameloise ML. Assessing nanofiltration and reverse osmosis for the detoxification of lignocellulosic hydrolysates. Journal of Membrane Science. 2015;487:40-50.
- [18] Jacques H. Constant pressure blocking filtration laws. Application to power-law non Newtonian fluid. Trans. Inst. Chem. Eng. Lond. 1982;60:183-187.
- [19] Alcaina CC, Blanco SÁ, Bes-Piá MA, Mendoza-Roca JA, Pastor-Alcañiz

- L. Ultrafiltration of residual fermentation brines from the production of table olives at different operating conditions. *Journal of Cleaner Production*. 2018;189: 662- 672.
- [20] Carbonell-Alcaina C, CorbatónBáguena MJ, Álvarez-Blanco S, Bes-Piá MA, Mendoza-RocaJA, Pastor-Alcañiz L. Determination of fouling mechanisms in polymeric ultrafiltration membranes using residual brines from table olive storage wastewaters as feed. *Journal of Food Engineering*. 2016;187:14-23.
- [21] Vikbjerg AF, Jonsson G, Mu H, Xu X. Application of ultrafiltration membranes for purification of structured phospholipids produced by lipasecatalyzed acidolysis. *Separation and Purification Technology*. 2006;50: 184-191.
- [22] Asif MB, Hai FI, Dhar BR, Ngo HH, Guo W, Jegatheesan V, Price WE, Nghiem LD, Yamamoto K. Impact of simultaneous retention of micro pollutants and laccase on micro pollutant degradation in enzymatic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*. 2018;267:473-480.
- [23] Guo S, Luo J, Wu Y, Qi B, Chen X, Wan Y. Decoloration of sugarcane molasses by tight ultrafiltration: Filtration behavior and fouling control. *Separation and Purification Technology*. 2018;204:66-74.
- [24] Kumar SM, Roy S. Filtration characteristics in dead-end microfiltration of living *Saccharomyces cerevisiae* cells by alumina membranes. *Desalination*. 2008;229:348–361.