

บทที่ 4

ค่าฟลักซ์วิกฤตของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ของการกรองน้ำตาลโตนด

4.1 บทนำ

กระบวนการเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน เป็นระบบการกรองที่อาศัยความดันเป็นแรงขับเคลื่อนสารละลายผ่านเมมเบรน ปัญหาที่พบคือการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากการสะสมของฟาวลิงและปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของกระบวนการกรอง ดังนั้นการควบคุมหรือลดการเกิดฟาวลิงจึงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการได้ อีกทั้งเป็นการยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน ลดการใช้พลังงาน และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบการกรอง โดยการลดการเกิด ฟาวลิงสามารถกระทำได้หลายวิธี อาทิเช่น กระบวนการล้างกลับทาง (backflushing) กระบวนการอัลตราซาวด์ (Ultrasound) การใช้เมมเบรนแบบสั่นสะเทือน (vibration membrane) การใช้สารทำความสะอาด และการดำเนินการกรองภายใต้สภาวะที่ฟลักซ์ของเพอมีเอตต่ำกว่าจุดที่เกิดฟาวลิงหรือที่เรียกว่าฟลักซ์วิกฤต (Li *et al.*, 2002; Lipp and Baldauf, 2002) แนวคิดค่าฟลักซ์วิกฤต (Critical flux, J_{cr}) ได้มีขึ้นในปี 1993 โดย Field และคณะ (1995) เพื่อลดหรือควบคุมการเกิดฟาวลิงทั้งแบบผันกลับได้ (Reversible fouling, R_r) และฟาวลิงที่ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible fouling, R_{ir}) ในระหว่างการกรอง ทั้งนี้เป็นการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายในการทำมาสะอาดระบบการกรอง เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนในระยะยาว

ค่าฟลักซ์วิกฤต หมายถึงค่าฟลักซ์สูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดฟาวลิงบนผิวหน้าของเมมเบรน หากดำเนินการกรองที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าฟลักซ์วิกฤตจะเกิดการสะสมของฟาวลิงที่ผิวหน้าของเมมเบรน (External fouling)

รูปแบบของการเกิดค่าฟลักซ์วิกฤตสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ แบบเข้ม (Strong form) และแบบอ่อน (Weak form) โดยมีความแตกต่างกันคือ ในแบบเข้ม จะมีค่าฟลักซ์ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดทุกๆ ความดัน แต่ในรูปแบบอ่อน พบว่าค่าฟลักซ์ของสารป้อนจะมีค่าต่างจาก ฟลักซ์ของน้ำสะอาดในทุกๆ ความดัน (Field *et al.*, 1995; Wu *et al.*, 1999)

วิธีการประมาณค่าฟลักซ์วิกฤต สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น (1) การใช้กล้องติดตามการเปลี่ยนแปลงการสะสมของฟาวลิงที่ผิวหน้าเมมเบรนโดยตรง (Direct Observation Through the Membrane, DOTM) (2) การคำนวณจากอัตราการสะสมด้วยวิธีการสมดุลมวล (Mass balance) เช่น การศึกษากระบวนการกรองแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ (Magnesium hydroxide) ด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง เพื่อติดตามถึงความหนาของชั้นเล็กที่เกิดขึ้นและการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเมมเบรน (Fradin and Field, 1999) (3) การติดตามเปลี่ยนแปลงความดัน เมื่อมีการเพิ่มหรือลดฟลักซ์เพอมีอิตเป็นระดับ เช่น การศึกษาในกระบวนการกรองน้ำทิ้ง ในสภาวะฟลักซ์คงที่และมีการเพิ่มค่าฟลักซ์ขึ้น แล้วติดตามการเพิ่มขึ้นของความดันขับเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (Le Clech *et al.*, 2003) ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมสำหรับการหาค่าฟลักซ์วิกฤต เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายในการศึกษา (Howell, 1995)

การประมาณค่าฟลักซ์วิกฤตในระหว่างกระบวนการเมมเบรนนั้น ได้มีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องโดยจะส่งผลต่อค่าฟลักซ์วิกฤตให้มีการเปลี่ยนแปลงไป อาทิเช่น ความเร็วตามขวางของสารป้อน ทั้งนี้การเพิ่มความเร็วดังกล่าวสามารถลดการสะสมฟาวลิงที่ผิวหน้าเมมเบรน เนื่องจากมีแรงกระทำต่ออนุภาคและเมมเบรน จากการศึกษาของ Fradin และ Field (1999) ได้ใช้แบบจำลองสมดุลมวลสาร ในการอธิบายถึงการสะสมของฟาวลิงในระบบเมมเบรนสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารป้อนและความเค้นเฉือน (Shear stress) พบว่าเมื่อมีความเค้นเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มสูงขึ้นค่าฟลักซ์วิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้น และหากมีการใช้รูพรุนของเมมเบรนที่มีความแตกต่างกันในการกรองตัวอย่างหรือการดำเนินการกรองที่สภาวะเดียวกัน จะส่งผลต่อค่าฟลักซ์วิกฤตโดยค่าฟลักซ์วิกฤตจะมีค่าลดลง เมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง (Kwon *et al.*, 2000) นอกจากนี้ปัจจัยของสารป้อน เช่น ค่าพีเอช ความแรงของประจุ (ionic strength) ส่งผลต่อการเกิดฟาวลิงเนื่องจากการตกตะกอนขององค์ประกอบในสารป้อน Kelly และ Zydney (1997) พบว่าอัตราการจับตัวของโปรตีน BSA มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์วิกฤตของกระบวนการกรองด้วยไมโครฟิลเตรชันดังกล่าวมีค่าลดลง และนอกจากนี้ปัจจัยของความเข้มข้นสารป้อนและขนาดอนุภาคมีผลต่อค่าฟลักซ์วิกฤตลดลง เมื่อสารป้อนมีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจากการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนอย่างรวดเร็ว (Youravong *et al.*, 2003) นอกจากนี้มีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารป้อนและขนาดอนุภาค ในระหว่างการกรองกับปัจจัยอื่นๆ โดยใช้แบบจำลองต่างๆ เพื่ออธิบายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์วิกฤตด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น งานวิจัยของ Huisman และคณะ (1999) ในการศึกษาถึงค่าฟลักซ์วิกฤตในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันของอนุภาคซิลิกา โดยใช้แบบจำลอง Shear-induced diffusion และ Torque balance ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์วิกฤตและค่าความเค้นเฉือนที่เปลี่ยนแปลงไปพบว่าค่าฟลักซ์วิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-1 การศึกษาฟลักซ์วิกฤต

Table 4-1 Study of critical flux

Sample	Membrane system	Operating conditions	Pore size/ MWCO	Method of determination	J_{cr}	Comment	Ref.
Magnesium hydroxide	Tubular metal	Temp 25°C Concentration suspension 5-15%	0.2µm	Mass balance	-	J_{cr} decreased and the deposition mass and deposit thickness increased with increasing suspension concentration.	Fradin and Field, 1999
Silica suspension	Flat-sheet	Temp 40°C Flow rate 10^{-5} m ³ /s	50 kDa 100 kDa 0.2 µm	Flux-step method	70L/m ² .h 52 L /m ² .h 50 L /m ² .h	J_{cr} decreased with increasing membrane pore size.	Wu <i>et al.</i> , 1999
Polystyrene latex	Flat-plate PVDF	Temp 25 °C CFV 0.2 m/s Particle diameter 0.3-11.9 µm	0.2 µm	Observation of TMP and flux behavior. Base on the increase in TMP.	40-160 L/m ² .h	The higher J_{cr} observed with smaller size of particles.	Kwon <i>et al.</i> , 2000
Supermicron particle	Anopore anodised aluminium	Particle size 3-12 µm Concentration 0.15-2.4 g/L CFV 0.05-1 m/s	0.02 µm	DOTM and model predictions	-	SID and SIH model over predicts J_{cr} .	Li <i>et al.</i> , 2000
Milk protein		Temp 50 °C CFV 1.1- 3.4 m/s Protein concentration 5-30 g/kg pH 7	200 kDa	Observation of TMP and flux behavior.	78 kg/m ² .h (Whey protein) 122 kg/m ² .h (sodium casienate)	J_{cr} for both milk protein increased with increasing CFV and decreased protein concentration.	Youravong <i>et al.</i> , 2003

จากการศึกษาของ Li และคณะ (2000) ศึกษาถึงค่าฟลักซ์วิกฤตด้วยการใช้กล้องติดตามการสะสมของฟาวลิ่ง ในระบบกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน โดยประมาณค่าฟลักซ์วิกฤตเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้จากการทำนายด้วยสมการแบบจำลองที่สมมติให้อนุภาคแพร์กัลป์ที่เหนียวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear-induced diffusivity) พบว่าจากการทำนายด้วยสมการนั้นมีค่าสูงกว่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้จากการทดลองเป็นสองเท่า

การนำกระบวนการเมมเบรนเข้ามาประยุกต์ใช้กับน้ำผลไม้ได้มีการศึกษาและมีความต้องการเพิ่มขึ้น แต่ข้อจำกัดของกระบวนการคือค่าใช้จ่ายในการดำเนินกระบวนการกรองซึ่งต้องดำเนินการกรองที่อัตราไหลของเพอมีเอททงที่และต่ำกว่าจุดฟลักซ์วิกฤต เพื่อลดการเกิดฟาวลิ่งและยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำผลไม้ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของสารแขวนลอยและองค์ประกอบที่สามารถละลายได้ปะปนอยู่ อีกทั้งมีความซับซ้อนสูง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำผลไม้ต่ำ

ค่าฟลักซ์วิกฤตสามารถเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปรับเปลี่ยนสภาวะการกรอง เช่นการเพิ่มความเร็วดำรง การลดความดัน การปรับปรุงตัวอย่างก่อนเข้ากระบวนการกรอง เป็นต้น

4.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าฟลักซ์วิกฤต

กระบวนการเมมเบรนมีการสะสมของฟาวลิ่งหรือชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน เนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ 2 ลักษณะคือ การเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าเมมเบรน เนื่องจากฟลักซ์ของเพอมีเอทและแรงกระทำทางเคมีกายภาพ และการเคลื่อนที่หลุดออกจากผิวหน้าเมมเบรนโดยแรงกระทำจากการไหลของสารป้อนในระบบและแรงผลักระหว่างโมเลกุล หากแรงกระทำต่ออนุภาค/โมเลกุลสู่ผิวหน้าเมมเบรนมีค่าสูงกว่าแรงกระทำให้อนุภาคหลุดออก ทำให้ความเข้มข้นที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้นและเกิดฟาวลิ่งขึ้น

การลดฟาวลิ่งสามารถกระทำได้โดยการใช้ระบบเมมเบรนแบบไหลขวาง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาค/โมเลกุลในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้มีการเคลื่อนที่กลับ (Back transport) สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไกหลัก คือ การเคลื่อนที่แบบยกตัว (Inertial lift) การแพร์กัลป์ที่เหนียวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear-induced diffusion) การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) และการเคลื่อนที่บนผิวหน้า (Surface transport)

จากพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังกล่าว สามารถนำมาพัฒนาเป็นสมการเพื่อใช้ทำนายค่าฟลักซ์วิกฤตของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน สมการดังกล่าวมักขึ้นกับความเร็วดำรง อุนทงุมิ และคุณสมบัติสารป้อน

1.) แบบจำลองสมการ Shear-induced diffusivity

เมื่อมีการให้แรงเฉือนที่ผิวหน้าชั้นอนุภาค จะเกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบหมุน หรือ กลิ้งไปบนอนุภาคอื่นๆ ทำให้อนุภาคโดยรอบเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น เนื่องจากแรงกระทำจากแรงเฉือนและ สัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น

แบบจำลองสมการ Shear-induced diffusion ใช้ในการทำนายฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่อมีแรงเฉือนที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น (Zydney and Colton, 1986; Belfort *et al.*, 1994) การประมาณค่า ฟลักซ์วิกฤตจะมีค่าสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคสูงสุดที่อัดตัว (Maximum particle volume fraction, ϕ_{\max}) $\phi_{\max} \approx 0.58$ แต่ในหลายองค์ประกอบที่เป็นสารแขวนลอย (polydisperse suspension) จะมีค่า $\phi_{\max} \approx 0.7 - 0.8$ (Huisman *et al.*, 1997) ค่าฟลักซ์วิกฤตสามารถคำนวณจากสมการ [4.4]

$$J_{cr,SI} = \frac{\tau_w}{\mu} \left(\frac{1.0 \times 10^{-4} a^4}{\phi_b L} \right)^{1/3} \quad [4.4]$$

เมื่อ	$J_{cr,SI}$	=	ค่าฟลักซ์วิกฤตตามแบบจำลอง Shear- induced diffusion (m/s)
	τ_w	=	ความเค้นเฉือน (Pa)
	μ	=	ความหนืดของเฟอมีเอท (Pa.s)
	a	=	รัศมีของอนุภาคสารป้อน (m)
	ϕ_b	=	สัดส่วนของปริมาตรอนุภาคใน bulk (Particle volume fraction in bulk) (-)
	L	=	ความยาวของเมมเบรน (m)

2.) แบบจำลอง Torque balance

สันนิษฐานได้ว่า อนุภาคมีการเคลื่อนแบบหมุนไปตามระยะความยาวของเมมเบรน เนื่องจากแรงเฉือน แรงยก และแรงผลักที่เกิดขึ้น แรงกระทำดังกล่าวจะมีผลจากการไหลของเฟอมีเอท โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ [4.6]

$$J_{cr,Tr} = \frac{2.36. a \tau_w}{\mu \tan \theta (a^2 \hat{R}_m)^{2/5}} + \frac{0.463. F_i}{\pi \mu a \sin \theta (a^2 \hat{R}_m)^{2/5}} \quad [4.6]$$

โดย	$J_{cr,Tr}$	=	ค่าฟลักซ์วิกฤตของแบบจำลอง Torque balance (m/s)
	θ	=	angle of response for spherical particles on the cake surface

- \hat{R}_m = ความต้านทานเมมเบรนจำเพาะ
(specific membrane resistance per unit thickness) (m^{-2})
- F_i = แรงกระทำของอนุภาคกับเมมเบรน โดยค่า F_i จะมีค่าเป็นบวก (+) ประจุเมมเบรนและอนุภาคมีประจุเดียวกัน และจะเป็นลบ (-) หากเมมเบรนและอนุภาคมีประจุตรงข้ามกัน ค่า F_i จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อเมมเบรนและอนุภาคไม่มีประจุ

สามารถคำนวณได้จากอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนและอัตราการหลุดออกจากผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งในการเคลื่อนที่หลุดออกจากผิวหน้าเมมเบรนอนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยกลไกต่างๆ เช่น Brownian diffusion, Shear-induced หรือ Inertial lift ซึ่งขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดอนุภาค และสภาวะในการกรอง แต่ในการเคลื่อนที่โดยส่วนใหญ่จะยอมรับในปัจจัยของความเค้นเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรน

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ ศึกษาถึงผลของขนาดรูพรุนและความเร็วตามขวางต่อค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำตาลโตนดในระหว่างกระบวนการกรองระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน รวมทั้งการทดสอบแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่าฟลักซ์วิกฤต

4.2 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

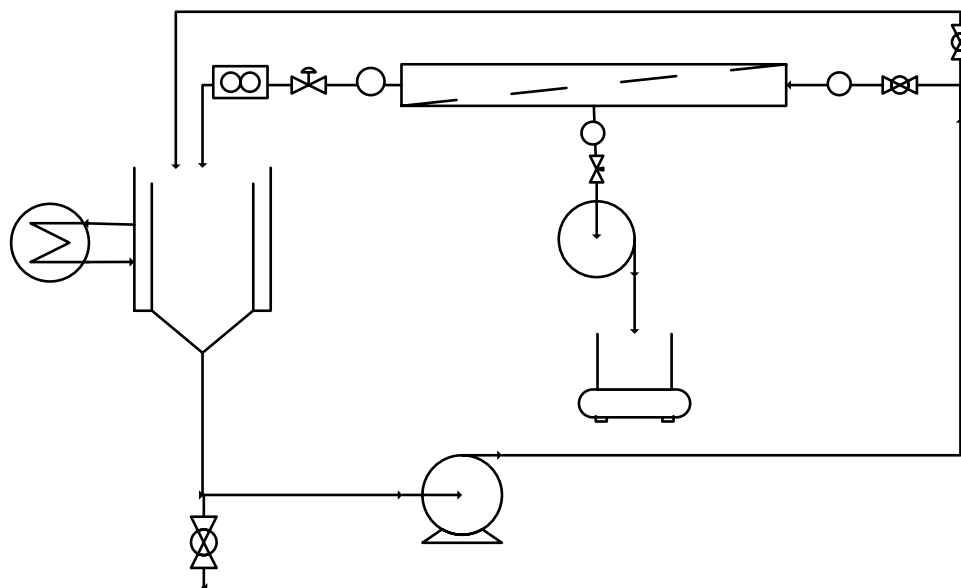
4.2.1 น้ำตาลโตนด

น้ำตาลโตนดที่มีการเติมไม้เคี่ยมในระหว่างการเก็บเกี่ยว ทำการเก็บตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 4°C ตลอดการขนส่ง และ ใช้ในการทดลองให้หมดภายใน 15 ชั่วโมง ก่อนการทดลองกรองน้ำตาลโตนดผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกตะกอนและสิ่งปะปนออก และทำการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 °C แล้วนำเข้าระบบเมมเบรน

4.2.2 เมมเบรน และระบบกรอง

1) เมมเบรนแบบเซรามิก ($\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2$)ความยาวท่อ 42 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm พื้นที่การกรอง 0.01 m^2 โดยมีขนาดรูพรุน/MWCO 0.14 μm , 300 kDa, 150 kDa และ 50 kDa

2) ระบบเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันระดับการทดลอง (Laboratory scale) ความดันขับสามารถอ่านค่าได้จากตัววัดค่าความดัน (pressure transducer) ควบคุมอุณหภูมิในการดำเนินการโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ความเร็วตามขวางสามารถปรับเปลี่ยนโดยการควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วของรีเทนเททและปรับความถี่ของปั๊ม ควบคุมอัตราการไหลของเพอมีเอทด้วยปั๊ม (Peristaltic pump) ซึ่งนำหน้าของเพอมีเอทด้วยเครื่องชั่งสองตำแหน่ง ดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 แผนภาพระบบกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน

Figure 4-1 Schematic diagram of microfiltration and ultrafiltration

Flow

4.2.3 วิธีการทดลอง

วิธีการประมาณค่าฟลักซ์วิกฤต

การประมาณค่าฟลักซ์วิกฤต ดำเนินการกรองแบบกะที่สภาวะคงที่ ความดันด้านสารป้อน (P_{in}) และรีเทนเทท (P_{out}) คงที่ 3.0 bar อุณหภูมิ $50 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ทำการควบคุมฟลักซ์ของเพอมีเอทให้เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ (flux-step) จากต่ำไปสูง โดยการควบคุมอัตราการไหลของฟลักซ์เพอมีเอทและเพิ่มฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 15 นาที ฟลักซ์ต่ำสุดเริ่มต้นที่ $30 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ และเพิ่มขึ้นระดับละประมาณ $15 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ ติดตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันขยับเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการสะสมของฟาวลิ่งอย่างรวดเร็ว โดยค่าฟลักซ์วิกฤตเป็นจุดที่มีค่าฟลักซ์ต่ำกว่าจุดที่ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Chan and Chen, 2001)

Feed ta

ศึกษาถึงผลของรูพรุนของเมมเบรนและความเร็วตามขวางซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

- 1) ผลของรูพรุน/MWCO ของเมมเบรนต่อค่าฟลักซ์วิกฤต
 - ศึกษาค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำตาล โคนดเหมือนที่การกรองของเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน $0.14 \mu\text{m}$ และระดับอัลตราฟิลเตรชันขนาด MWCO 50, 150 และ 300 kDa
- 2) ผลของความเร็วตามขวางของสารป้อนต่อฟลักซ์วิกฤตในระหว่างการกรองน้ำตาล โคนด
 - ศึกษาถึงการหาค่าฟลักซ์วิกฤตที่ความเร็วตามขวางของสารป้อน 5 ระดับคือ 0.5, 1.0,

Heat exchanger

2.0, 3.0 และ 3.5 m/s สำหรับเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และที่ความเร็วตามขวางของสารป้อน 2.0, 3.0, 3.5, 4.0 และ 5.0 m/s สำหรับเมมเบรน MWCO ขนาด 50 kDa

นำข้อมูลที่ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์วิกฤตและปัจจัยต่างๆ

4.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

1.) ผลของรูพรุน/MWCOต่อค่าฟลักซ์วิกฤต

การประมาณค่าฟลักซ์วิกฤตโดยวิธีการเพิ่มฟลักซ์ของเพอมีเอทในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนดด้วยกระบวนการเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อศึกษาผลของขนาดรูพรุนของเมมเบรนต่อค่าฟลักซ์วิกฤตและความดันขั้วที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-2 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มฟลักซ์ของเพอมีเอทในช่วงแรกความดันขั้วไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเมื่อเพิ่มค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทสูงขึ้น ความดันขั้วมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดฟาวลิง

ตารางที่ 4-2 ค่าฟลักซ์วิกฤตของรูพรุน/MWCO ระดับต่างๆ ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s

อุณหภูมิ 50 ± 1 °C

Table 4-2 Effect of membrane pores size/MWCO on critical flux values at cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature 50 ± 1 °C

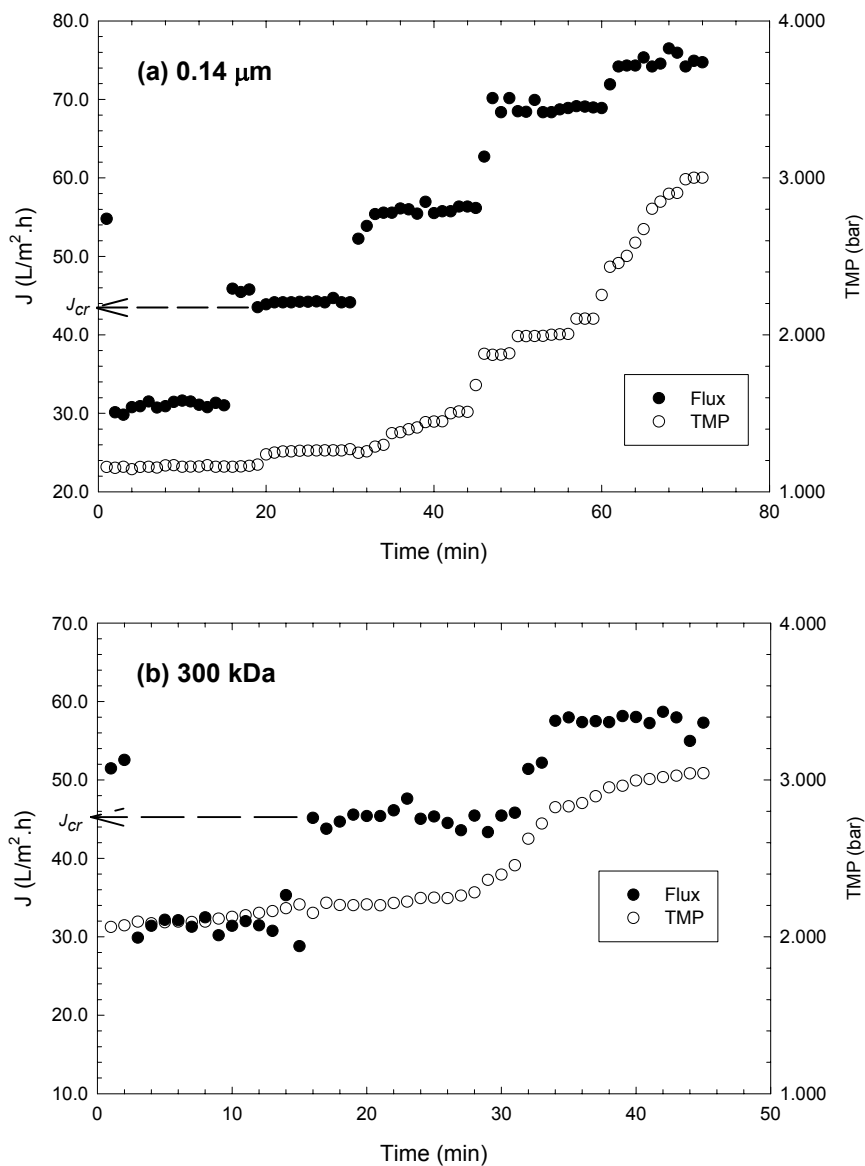
Membrane	Apparent critical flux ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	Transmembrane pressure (bar)
0.14 μm	$44.42 \pm 0.02^*$	1.218 ± 0.02
300 kDa	45.17 ± 0.12	2.264 ± 0.03
150 kDa	43.96 ± 2.41	2.702 ± 0.03
50 kDa	38.18 ± 0.57	2.567 ± 0.03

* Each value is the mean of triplicate determination \pm standard deviation

จากการทดลองในการหาค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำตาลโตนด พบว่าการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุน 0.14 μm และระดับอัลตราฟิลเตรชันขนาด MWCO 50, 150 และ 300 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s โดยฟลักซ์เริ่มต้นจะเริ่มที่ 30 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ และเพิ่มฟลักซ์ขึ้นทุกๆ 15 นาที จนกระทั่งความดันขั้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว พบว่าเมื่อรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กลงค่า

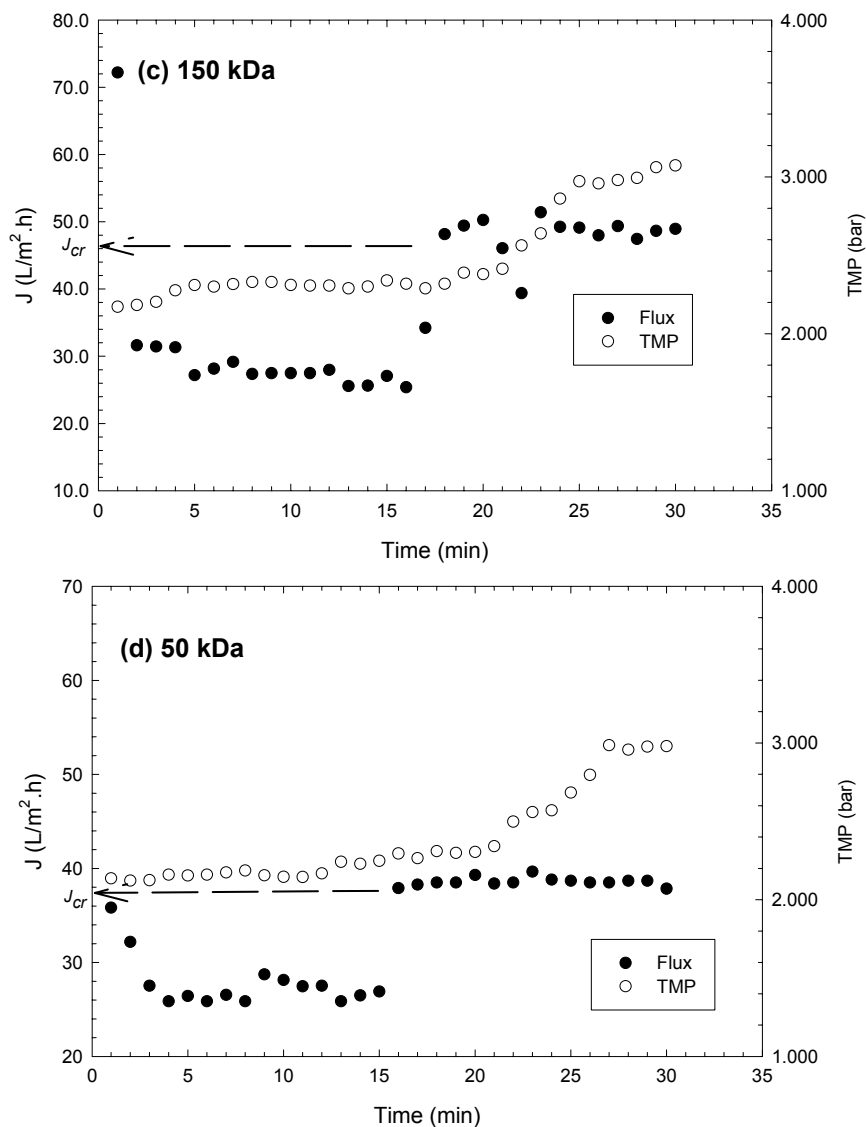
ฟลักซ์วิกฤตมีค่าลดลง ดังตารางที่ 4-2 โดยค่าฟลักซ์วิกฤตของเมมเบรน มีค่าเท่ากับ 44.4, 45.17, 43.96 และ 38.18 L/m².h สำหรับเมมเบรนรูพรุน/MWCOขนาด 0.14 μ m, 300, 150 และ 50 kDa ตามลำดับ (ภาพที่ 4-2)

การทดลองใช้น้ำตาลโตนดเป็นสารป้อน เมื่อพิจารณาน้ำตาลโตนดเป็นองค์ประกอบทางชีวภาพที่มีความซับซ้อนสูง ดังนั้นการเกิดฟาวลิงที่ส่งผลต่อค่าฟลักซ์วิกฤตจึงมีความผันแปรสูง เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำตาลโตนดและเมมเบรน น้ำผลไม้ส่วนใหญ่จะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบเล็กน้อย แต่กลไกของโปรตีนจะมีผลมากต่อการเกิดฟาวลิงเนื่องจากโปรตีนมีทั้งประจุบวกและลบ จึงสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างอนุภาค/โมเลกุลและเมมเบรนอย่างแข็งแรง จากการศึกษาข้างต้นถึงประสิทธิภาพการกักกันโปรตีนของเมมเบรน พบว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะมีการกักกันโปรตีนได้สูงจึงเป็นไปได้ว่าเกิดฟาวลิงที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนสูง (Chang *et al.*, 2001) เช่นเดียวกับ Gander และคณะ (2000) ได้ให้ความเห็นว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะมีการเกิดฟาวลิงในช่วงแรกสูงและรวดเร็ว เนื่องจากการสะสมของอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมมเบรนและคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว นอกจากนี้ Chen และคณะ (1997) ได้ทดลองหาค่าฟลักซ์วิกฤต ของคอลลอยด์ พบว่าค่าฟลักซ์วิกฤตลดลงเมื่อมีการใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง เนื่องจากอนุภาคเกิดการสะสมที่ผิวหน้าและเกิดการปิดกั้นรูพรุนเป็นชั้นเคลือบของอนุภาค



ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ ความดันขับและเวลาการกรองของน้ำตาลโตนดระหว่างกระบวนการเมมเบรนรูปทรงแท่ง/MWCO ขนาด (a) 0.14 μm (b) 300 kDa (c) 150 kDa (d) 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$

Figure 4-2 Flux and pressure vs. time of sugar palm sap using the (a) 0.14 μm (b) 300 kDa (c) 150 kDa (d) 50 kDa at cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$



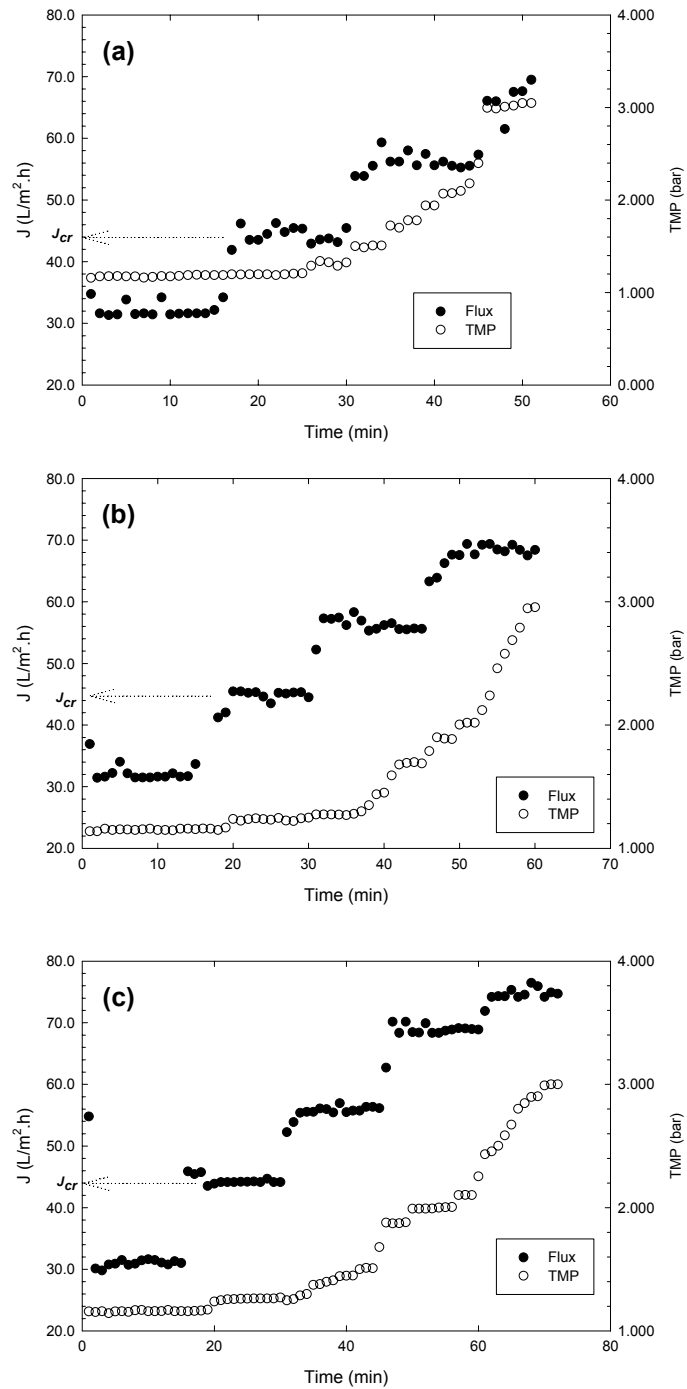
ภาพที่ 4-2(ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ ความดันขับและเวลาการกรองของน้ำตาลโตนด ระหว่างกระบวนการเมมเบรนรูพรุน/MWCOขนาด (a) 0.14 μm (b) 300 kDa (c) 150 kDa (d) 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$

Figure 4-2 Flux and pressure vs. time of sugar palm sap using the (a) 0.14 μm (b) 300 kDa (c) 150 kDa (d) 50 kDa at cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$

อย่างไรก็ตามการเกิดฟลักซ์วิกฤตเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกันยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อาทิเช่น วัสดุเมมเบรน ขนาดอนุภาค ความเข้มข้นของสารป้อน และแรงกระทำในระบบ เป็นต้น (Wu *et al.*, 1999)

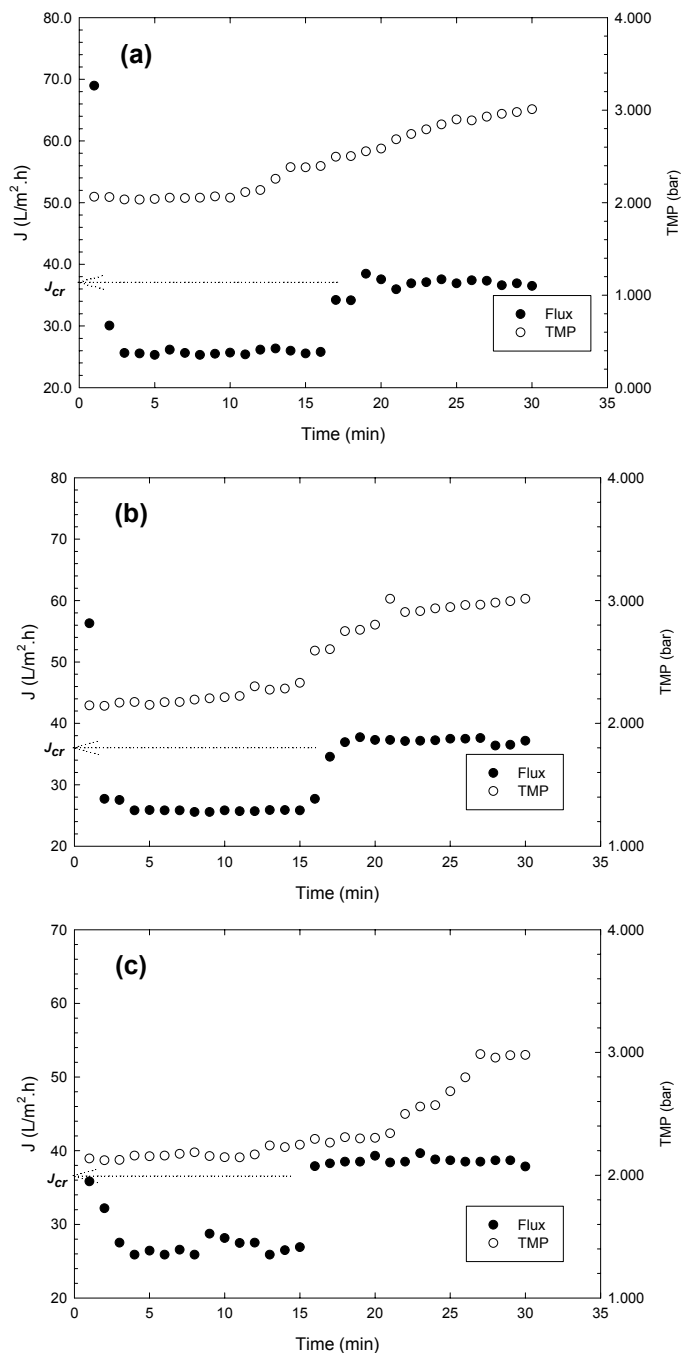
2.) ผลของความเร็วต่อค่าฟลักซ์วิกฤต

จากการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์วิกฤต โดยใช้เมมเบรน 2 ขนาดคือ 0.14 μm และ 50 kDa ที่ความเร็วตามขวางแตกต่างกัน คือ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 3.5, 4.0 และ 5.0 m/s โดยการเพิ่มค่าฟลักซ์ทุกๆ 15 นาที และติดตามการเปลี่ยนแปลงความดันขับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเกิดฟาวลิง ดังภาพที่ 4-3 และ 4-4 พบว่าในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันฟลักซ์วิกฤตอยู่ในช่วง 30-50 $\text{L/m}^2\cdot\text{h}$ เมื่อมีการใช้ความเร็วตามขวางในระบบสูงขึ้นค่าฟลักซ์วิกฤตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันค่าฟลักซ์วิกฤตอยู่ในช่วง 30 $\text{L/m}^2\cdot\text{h}$ ซึ่งค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับอัตราการไหลของเพอมีเอทเพิ่มขึ้นในแต่ละระดับมีช่วงกว้างเกินไปเพราะขีดจำกัดของปั๊ม จึงทำให้การประมาณแนวโน้มของค่าฟลักซ์วิกฤตได้อย่างคร่าวๆ



ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ ความดันขับและเวลาการกรองเมื่อกระทำการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนรูพรุนขนาด $0.14\mu\text{m}$ ที่ระดับความเร็วตามขวาง (a) 2.0 m/s (b) 3.0 m/s (c) 3.5 m/s อุณหภูมิ $50\pm 1^\circ\text{C}$

Figure 4-3 Flux and pressure versus time of sugar palm sap using the membrane pore size $0.14\mu\text{m}$ varying cross-flow velocity(a) 2.0 m/s (b) 3.0 m/s (c) 3.5 m/s, temperature $50\pm 1^\circ\text{C}$

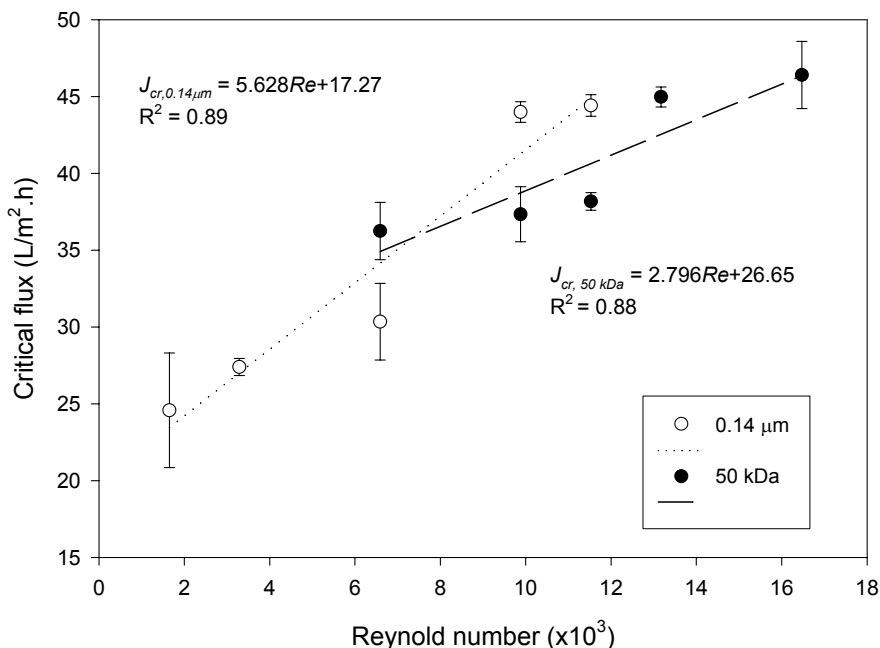


ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ ความดันขับและเวลา เมื่อทำการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรน MWCO ขนาด 50 kDa ที่ระดับความเร็วตามขวาง (a) 2.0 m/s (b) 3.0 m/s (c) 3.5 m/s อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ\text{C}$

Figure 4-4 Flux and pressure versus time of sugar palm sap using the ultrafiltration membrane MWCO 50 kDa varying cross-flow velocity (a) 2.0 m/s (b) 3.0 m/s (c) 3.5 m/s, temperature $50 \pm 1^\circ\text{C}$

เมื่อแสดงความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์วิกฤตค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re) (ภาพที่ 4-5) พบว่าความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์วิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ที่ความเร็วตามขวาง 0.5 m/s (Re 1650) เป็นช่วงการไหลแบบราบเรียบ และค่าฟลักซ์วิกฤตที่สังเกตได้มีค่าต่ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของการกรองลดลงเมื่อมีการสะสมของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของสารป้อนเพิ่มสูงกว่า 1.0 m/s การไหลในระบบเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นการไหลแบบกึ่งปั่นป่วน (Transition) และแบบปั่นป่วน (Re 3300-16470) ส่งผลให้ค่าฟลักซ์วิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วตามขวางมีแรงกระทำต่ออนุภาค/โมเลกุลในลักษณะต่างๆ อีกทั้งยังเพิ่มการแพร่กลับของโมเลกุลและอนุภาคในระบบการกรองทำให้ลดการสะสมของชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน แต่ในเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa ค่าฟลักซ์วิกฤตไม่แตกต่างกันมากนักในทุกๆ ความเร็วตามขวาง อาจเป็นเพราะเมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กจึงมีการสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนได้มากกว่าเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน และความเร็วตามขวางของระบบส่วนใหญ่อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจึงอาจมีผลไม่เด่นชัดมากนัก

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์วิกฤตกับความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ค่าที่ได้จากการทดลอง คือ $J_{cr} = 5.628Re + 17.27$ สำหรับเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ $J_{cr} = 2.796Re + 26.65$ สำหรับเมมเบรน MWCO ขนาด 50 kDa จะเห็นได้ว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันมีการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์กับค่า Re ที่น้อยมาก (ความชันน้อย) อาจสันนิษฐานได้ว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันสามารถเกิดฟาวลิงได้เร็วกว่าเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน จากการวิจัยค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิง (ตารางที่ 3-3) พบว่าค่าความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับได้ (R_{fr}) และแบบไม่ผันกลับ (R_{ir}) ของเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันมีสูงกว่าในทุกๆ ความเร็ว แต่กระนั้นการใช้ความเร็วเพิ่มขึ้นสามารถลดการเกิดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ (Yu *et al.*, 2003)



ภาพที่ 4-5 ค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำตาลโตนดกับค่าเลขเรย์โนลด์

Figure 4-5 Critical flux of sugar palm sap vs. Reynold number (Re)

เช่นเดียวกับการศึกษาของ Gésan-Guiziou และคณะ (2002) ถึงผลของสภาวะในการดำเนินการกรองสารแขวนลอยอนุภาคยาง ด้วยเมมเบรนแบบท่อเซรามิก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์วิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีค่าความเค้นเฉือน (τ_w) สูงขึ้น เช่นเดียวกับการประมาณค่าฟลักซ์วิกฤตของการกรองน้ำตาลโตนด ทั้งนี้เพราะแรงเฉือนที่สูงขึ้นสามารถทำลายการยึดเกาะและสะสมของฟาวลิงได้ จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรูปแบบต่างๆ ในระหว่างกระบวนการเมมเบรนแบบไหลขวาง อัตราการสะสมเนื่องจากฟาวลิงจะมีผลจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยแรงกระทำในลักษณะต่างๆ คือแรงพาอนุภาคมายังผิวหน้าเมมเบรน (Convection force) แรงการแพร่กลับ (Back diffusion force) และแรงลาก (Drag force) ซึ่งการควบคุมการสะสมของฟาวลิงสามารถกระทำการปรับเปลี่ยนความเร็วในระบบได้และจากแรงกระทำของการเคลื่อนที่ที่สามารถแบ่งย่อยเป็นรายละเอียดการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ ได้อีกนั้นขึ้นกับขนาดอนุภาคด้วย คือ Brownian diffusion (สำหรับอนุภาค <100 nm) Shear-induced diffusion (สำหรับอนุภาค >100 nm) และ Inertial migration (สำหรับอนุภาค >1000 nm) (Huisman *et al.*, 1997; Espinasse *et al.*, 2002)

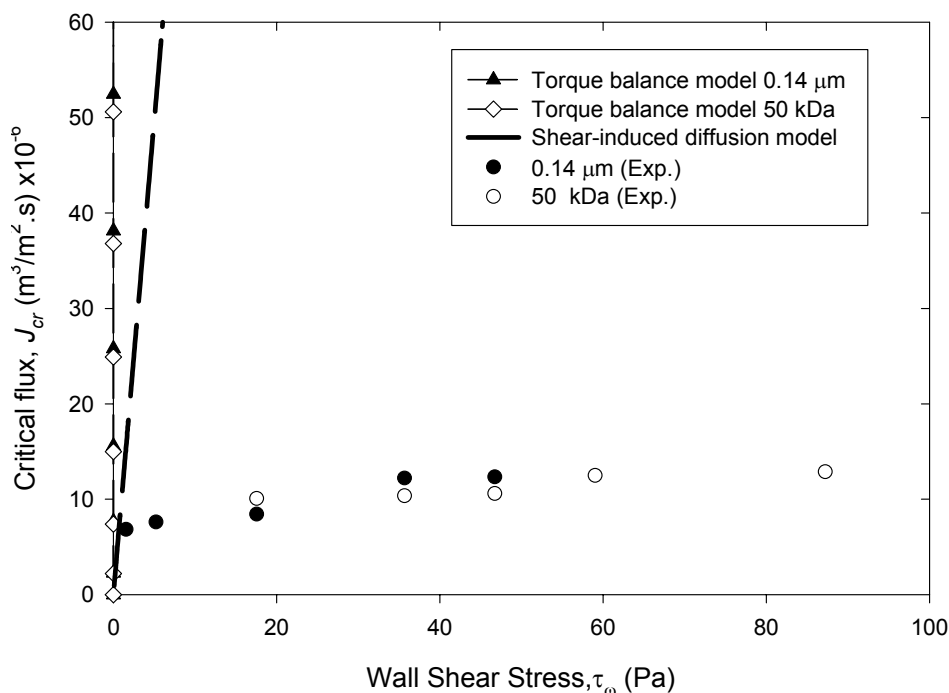
จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าการศึกษาถึงฟลักซ์วิกฤตเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปกลับจากผิวหน้าเมมเบรน การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนมีความสำคัญมาก ความเร็วตามขวางจึงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการเมมเบรนมากปัจจัย

หนึ่ง นอกจากนี้กลไกของการเคลื่อนที่ของอนุภาคยังขึ้นกับปัจจัยทางด้านสมบัติทางเคมีกายภาพของสารป้อนอีกด้วย (Bacchin *et al.*, 2005)

3.) การทดสอบการทำนายค่าฟลักซ์วิกฤตโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

จากการทดลองได้นำการเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าฟลักซ์วิกฤตโดยใช้แบบจำลอง Shear-induced diffusion และ Torque balance จากภาพที่ 4-6 นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์วิกฤตกับความเค้นเฉือน (τ_w) ของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน $0.14 \mu\text{m}$ และ 50 kDa พบว่าค่าฟลักซ์วิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงเฉือน จากภาพที่ 4-5 พบว่าค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง Torque balance และแบบจำลอง Shear-induced diffusion แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการทดลองของเมมเบรน $0.14 \mu\text{m}$ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีค่าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดลองของเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa ที่มีค่าค่อนข้างคงที่ จากผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ถึงความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์วิกฤตกับความเร็วตามขวางในชั้นคั้น

เช่นเดียวกับการศึกษาของ Huisman และคณะ (1999) ในการใช้แบบจำลอง Torque balance และ Shear-induced diffusion เพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์วิกฤตกับแรงเฉือนของสารแขวนลอยซิลิกาขนาดรัศมีอนุภาค 230 nm ที่พีเอช 2 ระดับ คือ 3 และ 10 โดยการกรองด้วยเมมเบรนแบบเซรามิกไททานเนียม (titania) ซึ่งแบบจำลองทั้งสองไม่สามารถนำมาอธิบายการเกิดฟลักซ์วิกฤตของอนุภาคซิลิกาที่ระดับพีเอชดังกล่าว โดยค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองเป็นอย่างมาก และจากการศึกษาของ Li และคณะ (2001) เปรียบเทียบค่าฟลักซ์วิกฤตของอนุภาคขนาดใหญ่ ($3-5 \mu\text{m}$) จากแบบจำลอง modified shear-induced diffusion และแบบจำลอง shear-induced diffusion กับค่าฟลักซ์วิกฤตจากการทดลอง พบว่าค่าฟลักซ์วิกฤตจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์วิกฤตของแบบจำลอง modified shear-induced diffusivity มากกว่า แบบจำลอง shear-induced diffusion มีค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤตจากการทดลองประมาณ 2 เท่า แต่ค่าฟลักซ์วิกฤตตามแบบจำลอง modified shear-induced diffusion อธิบายได้ดีเมื่อสารป้อนไหลแบบราบเรียบ ซึ่ง Zydney และ Colton (1986) ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าฟลักซ์วิกฤตจากการทดลองกับแบบจำลอง shear-induced diffusion เมื่อทำการกรองอนุภาคขนาด $0.25-5 \mu\text{m}$ แรงเฉือน (shear) $40-220000 \text{ s}^{-1}$ พบว่าค่าจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดลอง



ภาพที่ 4-6 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์วิกฤตจากการทดลอง กับแบบจำลอง Shear-induced diffusion และ Torque balance ของน้ำตาลโตนดเมื่อผ่าน เมมเบรนรูพรุนขนาด 0.14 μm และ MWCO ขนาด 50 kDa

Figure 4-6 Critical flux versus wall shear stress for 0.14 μm and 50 kDa. Experimental values are compared with the Shear-induced diffusion model and Torque balance model.

4.4 บทสรุป

จากการศึกษาการประมาณค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำตาลโตนดในระหว่างเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันแบบไหลขวาง โดยวิธีการเพิ่มฟลักซ์ของเพอมีเอท สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำตาลโตนดมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เพราะเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลงความสามารถในการกักกันสารและสะสมของชั้นเค้กเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะสมหรือเกิดการกักกันของชั้นเค้กง่ายขึ้น
2. ค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำตาลโตนดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re ในการดำเนินการทดลองเพิ่มขึ้น เพราะการเคลื่อนที่ของน้ำตาลโตนดในระบบเป็นการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน ส่งผลให้ความ

ต้านทานเนื่องจากฟาวล์ลดลงเนื่องจากเกิดแรงเฉือนระหว่างอนุภาคและผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น จึงสามารถลดการสะสมของชั้นเค้กได้

3. การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์วิกฤตจากการทดลอง และแบบจำลอง Shear-induced diffusion และ Torque balance พบว่า แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถทำนายค่าฟลักซ์วิกฤตกับความเค้นเฉือนที่ผนังเมมเบรน (τ_w) ได้ เนื่องจากน้ำตาลโตนดมีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวสูง ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบเมมเบรนเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบตามกลไกใดกลไกหนึ่งได้