บทที่ 3

ค่าฟลักซ์วิกฤติของกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นน้ำตาลโตนด

3.1 บทนำ

กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นเป็นระบบการกรองที่อาศัยความดันเป็นแรงขับดันที่ได้มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด แต่ข้อจำกัดของการใช้งานที่สำคัญคือการลดลงของฟลักซ์และการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการแยกหรือกักกันสาร เนื่องจากการสะสมของฟาวลิ่งและปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของกระบวนการกรองโดยตรง ดังนั้นการป้องกันการเกิดหรือลดฟาวลิ่งจึงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการได้ รวมทั้งช่วยลดความเข้มข้นของสารเคมีและความถี่ในการทำความสะอาดซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน ลดการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบการกรอง การลดการเกิดฟาวลิ่งของเมมบรนสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การล้างกลับทาง (Backflushing) การใช้อัลตราซาวด์ (Ultrasound) การใช้เมมเบรนแบบสั่นสะเทือน (Vibration membrane) การปรับคุณสมบัติของสารป้อน การเลือกชนิดและคุณสมบัติของเมมเบรนที่เหมาะสมกับสารป้อน การออกแบบระบบเมมเบรน และการเลือกสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม เช่น ระดับความดัน ความเร็วตามขวาง รวมทั้งการดำเนินการกรองภายใต้สภาวะที่ฟลักซ์ของเพอมิเอทต่ำกว่าจุดที่ไม่เกิดฟาวลิ่งหรือที่เรียกว่า "ฟลักซ์วิกฤติ" (Critical flux, J_c) (Li *et al.*, 2002; Lipp and Baldauf, 2002; Chan and Chen, 2001.,Chen *et al.*, 1997) Field และคณะ (1995) ได้เสนอแนวคิดค่าลักซ์วิกฤติเพื่อใช้ลดหรือควบคุมการเกิดฟาวลิ่งทั้งแบบผันกลับได้ (Reversible fouling, R_{rf}) และฟาวลิ่งที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling, R_{irr}) โดยพบว่าสามารถป้องกันการเกิดฟาวลิ่งที่ผิวหน้าของเมมเบรน (External fouling) ได้ทั้งหมดเมื่อดำเนินงานที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤติ ในระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นเพื่อแยกเชื้อยีสต์

ค่าฟลักซ์วิกฤติหมายถึงค่าฟลักซ์สูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดฟาวลิ่งบนผิวหน้าของเมมเบรน หากดำเนินการกรองที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าฟลักซ์วิกฤติจะเกิดการดูดซับและสะสมของตัวถูกละลายหรืออนุภาคบนผิวหน้าของเมมเบรนในระดับความเข้มข้นที่สามารถเปลี่ยนเป็นชั้นเจลหรือชั้นเค้กได้ รูปแบบของการเกิดค่าฟลักซ์วิกฤติสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ แบบเข้ม (Strong form) และแบบอ่อน (Weak form) โดยมีความแตกต่างกันคือเมื่อดำเนินการกรองสารป้อนที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤติในแบบเข้มจะไม่มีฟาวลิ่งทั้งแบบผันกลับได้และผันกลับไม่ได้เกิดขึ้น โดยมีค่าฟลักซ์ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดทุกๆ ความดัน แต่ในรูปแบบอ่อนพบว่าเป็นผลมาจากฟาวลิ่งที่ผัน

กลับได้และอาจมีการอุดตันของโมเลกุลหรืออนุภาคทั้งที่ผิวหน้าหรือในรูพรุนซึ่งเป็นฟาวลิ่งที่ผันกลับไม่ได้เล็กน้อย โดยค่าฟลักซ์ของสารป้อนต่ำกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดในทุกๆ ความดัน (Huisman *et a.*, 1999 ; Wu *et al.*, 1999, Youravong *et al.*, 2003) การประมาณค่าฟลักซ์วิกฤติสามารถกระทำได้หลายวิธี ดังนี้ (1) การใช้กล้องส่องติดตามการเปลี่ยนแปลงการสะสมของฟาวลิ่งที่ผิวหน้าเมมเบรนโดยตรง (Direct Observation Through the Membrane, DOTM) และ (2) การเพิ่มหรือลดค่าฟลักซ์เพอมิเอทเป็นระดับขั้น แล้วติดตามการเปลี่ยนแปลงของความดันขับ หรือการเพิ่มหรือลดความดันเป็นระดับขั้นแล้วติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์ (Huisman *et al.*, 1999, Le Clech *et al.*, 2003, Youravong *et al.*, 2003) ซึ่งหลังวิธีนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย (Howell, 1995)

ค่าฟลักซ์วิกฤติในระหว่างกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนขึ้นกับปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัย เช่น ความเร็วตามขวางของสารป้อน ขนาดรูพรุน ขนาดของอนุภาค คุณสมบัติทางเคมีกายภาพและความเข้มข้นของสารป้อน โดยทั่วไปพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วหรือความเค้นเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนส่งผลให้ค่าฟลักซ์วิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องการเพิ่มความเร็วตามขวางสามารถลดการสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ โดยเคลื่อนที่กลับไปกับรีเทนเททด้วยกลไกหลายกลไก เช่น การแพร่กลับแบบบราวเนี่ยน (Brownian diffusion) การแพร่กลับแบบเหนี่ยวนำด้วยแรงเฉือน (Shear-induce diffusion) เป็นต้น (Huisman *et al.*, 1999, Youravong *et al*, 2003) ค่าฟลักซ์วิกฤติมีค่าลดลงเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง (Kwon *et al.*, 2000) Kelly และ Zydney (1995) พบว่าค่าฟลักซ์วิกฤติของกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นโปรตีน มีค่าสูงขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้นและค่าฟลักซ์วิกฤติลดลงเมื่อสารป้อนมีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจากการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนอย่างรวดเร็ว (Wu *et al*, 1999) Youravong และคณะ (2003) ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติ แบบจำลองที่สมมุติให้การเคลื่อนกลับของอนุภาคเป็นแบบเหนี่ยวนำด้วยแรงเฉือน (Shear induce diffusion model) แบบจำลองที่สมมุติให้อนุภาคเคลื่อนที่จากผิวหน้าเมมบรนโดยใช้หลักสมดุลทอร์ค (Torque balance model)

ได้มีการใช้หลักการดำเนินงานกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นกับสารป้อนหลายชนิด เช่น สารละลายโปรตีน น้ำนมโคชนิดพร่องมันเนย อุตสาหกรรมเบียร์ และกับสารป้อนที่เป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามยังไม่ได้มีการศึกษาค่าฟลักซ์วิกฤติในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้มากนัก ทั้งที่ฟาวลิ่งที่เกิดขึ้นจากการกรองน้ำผลไม้มักเกิดจากการอุดตันรูพรุนของอนุภาคขนาดใหญ่โดยการเกิดชั้นเค้กที่ผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งเหมาะที่จะใช้หลักของฟลักซ์วิกฤติควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ ศึกษาถึงผลของขนาดรูพรุนและความเร็วตามขวางต่อค่าฟลักซ์วิกฤติของน้ำตาลโตนดในระหว่างกระบวนการกรองระดับ

ไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น รวมทั้งการทดสอบแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติ

3.1.1 สมการสำหรับทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติ

การสะสมอนุภาคหรือโมเลกุลบนผิวหน้าของเมมเบรนเกิดจากการพาไปกับเพอมิเอทจนเกิดเป็นชั้นคอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นและอาจพัฒนาเป็นชั้นของเจลหรือเค้กเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคหรือโมเลกุลถึงระดับหนึ่ง ขณะเดียวกันอนุภาคหรือโมเลกุลบนผิวหน้าของเมมเบรนเคลื่อนกลับไปกับรีเทนเททด้วยหลายกลไก ดังนั้นการดำเนินกระบวนการโดยใช้ค่าฟลักซ์ก็คือการพยายามสร้างความสมดุลระหว่างอัตราการสะสมของอนุภาคหรือโมเลกุลบนผิวหน้าเมมเบรนและอัตราการเคลื่อนออกจากผิวหน้าของเมมเบรน โดยควบคุมไม่ให้ความเข้มข้นของอนุภาคหรือโมเลกุลที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงในระดับที่ทำให้ความต้านตามการไหลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อาจจะกล่าวได้ว่าในกรณีที่เป็นค่าฟลักซ์วิกฤติแบบเข้มเป็นการป้องกันการเกิดขึ้นของชั้นคอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น (Onset concentration polarization) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของฟาวลิ่งที่ผันกลับได้ จะพบได้กับสารป้อนที่เจือจางมากๆ แต่สำหรับค่าฟลักซ์วิกฤติแบบอ่อนเป็นการป้องกันการเกิดขึ้นของฟาวลิ่งที่ผิวของเมมเบรนซึ่งมีบางส่วนที่เป็นฟาวลิ่งที่ผันกลับไม่ได้ (Onset fouling) โดยทั่วไปเป็นการควบคุมไม่ให้ความเข้มข้นเกินระดับที่ทำให้เกิดชั้นเจลหรือเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน

ได้มีการพัฒนาสมการสำหรับการทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติโดยอาศัยสมมุติฐานของกลไกการเคลื่อนที่กลับของอนุภาคหรือโมเลกุลไปกับรีเทน (Back transport) สามารถแบ่งได้ 4 กลไกหลัก คือ การเคลื่อนที่แบบยกตัว (Inertial lift) การแพร่กลับที่เหนี่ยวนำเนื่องจากแรงเฉือน (Shear-induce diffusion) การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) และการเคลื่อนที่บนผิวหน้า (Surface transport) จากพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังกล่าว สามารถนำมาพัฒนาเป็นสมการใช้ทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนดังนี้

แบบจำลองที่ให้อนุภาคแพร่เนื่องจากการเหนี่ยวนำของแรงเฉือน (Shear-induced diffusion model)

อนุภาคเคลื่อนที่พร้อมๆ กับหมุนหรือกลิ้งไปบนอนุภาคอื่นๆ หรือพื้นผิวของเมมเบรน ทำให้เกิดสนามแรงเฉือนรอบๆ รอบๆ อนุภาค ส่งผลให้อนุภาคอื่นๆ ที่อยู่รอบๆ แพร่หรือเคลื่อนที่ โดยแปรผันโดยตรงกับความเร็วตามขวาง แบบจำลองนี้ให้ผลการทำนายฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับความเค้นเฉือนที่ผนังเมมเบรน (Zydney and Colton, 1986; Belfort *et al.*, 1994) ดังสมการ [3.1]

$$J_{cr,SI} = \frac{\tau_w}{\mu}\left(\frac{1.0\times10^{-4}a^4}{\phi_b L}\right)^{1/3} \qquad [3.1]$$

เมื่อ $J_{cr,SI}$ = ค่าฟลักซ์วิกฤติตามแบบจำลอง Shear- induced diffusion (m/s)

τ_w = ความเค้นเฉือนที่ผนังเมมเบรน (Pa)

μ = ความหนืดของเพอมิเอท (Pa.s)

a = รัศมีของอนุภาคสารป้อน (m)

ϕ_b = สัดส่วนของปริมาตรอนุภาคใน bulk (Particle volume fraction in bulk) (-)

L = ความยาวของเมมเบรน (m)

แบบจำลอง Torque balance

แบบจำลองนี้มีสมมุติฐานให้อนุภาคเคลื่อนแบบหมุนบนผิวของเมมบรนได้ตราบใดที่ทอร์คที่เกิดจากความเค้นเฉือนที่ผนังของเมมเบรน แรงยก และแรงผลัก มีค่ามากกว่าทอร์คที่เกิดจากการลากพาอนุภาคด้วยเพอมิเอท เมื่อเพิ่มค่าฟลักซ์แรงเนื่องจากเพอมิเอทจะสูงขึ้น จนถึงจุดที่ทอร์คบนอนุภาคเท่ากับศูนย์ อนุภาคจะไม่เคลื่อนที่อีกต่อไป (Huisman *et al.*, 1999) ค่าฟลักซ์วิกฤติตามแบบจำลองนี้คือค่าฟลักซ์สูงสุดที่ไม่ทำให้อนุภาคหยุดการเคลื่อน สามารถคำนวณได้จากสมการ [3.2]

$$J_{cr,Tr} = \frac{2.36.a\tau_w}{\mu\tan\theta\left(a^2\hat{R}_m\right)^{2/5}} + \frac{0.463.F_i}{\pi\mu\, a\sin\theta\left(a^2\hat{R}_m\right)^{2/5}} \qquad [3.2]$$

โดย $J_{cr,Tr}$ = ค่าฟลักซ์วิกฤติของแบบจำลอง Torque balance (m/s)

θ = angle of repose ซึ่งขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิว

$\hat{R}_m$ = ความต้านทานเมมเบรนจำเพาะ (m^{-2})

F_i = แรงกระทำของอนุภาคกับเมมเบรน โดยค่า F_i จะมีค่าเป็นบวก (+) หากประจุเมมเบรนและอนุภาคมีประจุเดียวกัน และจะเป็นลบ (-) หากเมมเบรนและอนุภาคมีประจุตรงข้ามกัน ค่า F_i จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อเมมเบรน และอนุภาคไม่มีประจุ

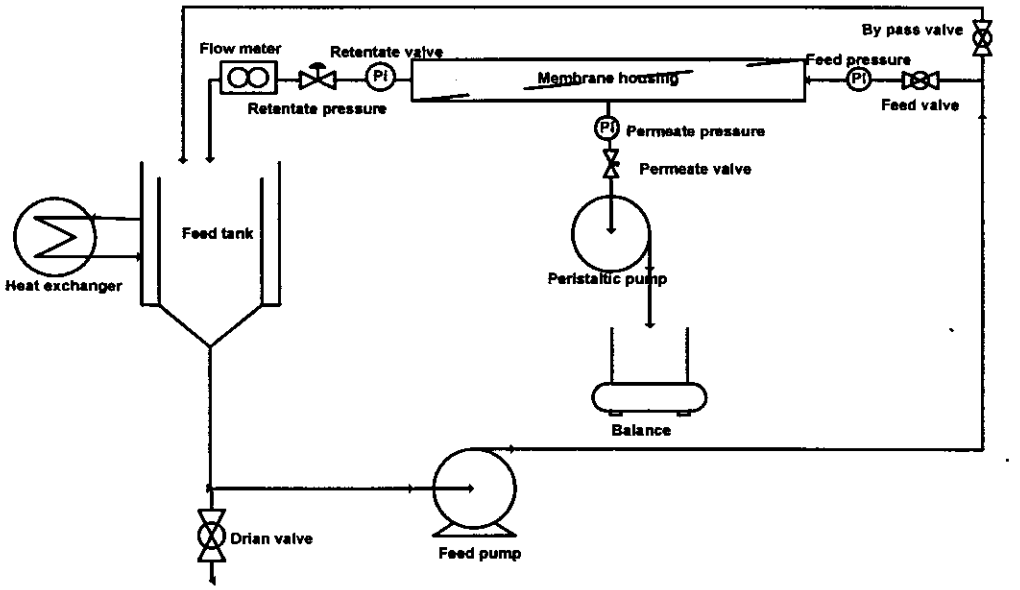
3.2 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.2.1 น้ำตาลโตนด

ใช้น้ำตาลโตนดที่มีการเติมไม้เคี่ยมในระหว่างการเก็บเกี่ยว บรรจุในขวดพลาสติกที่สะอาดและเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C ตลอดการขนส่งและก่อนทำการทดลอง โดยต้องทำการทดลองภายใน 15 ชั่วโมง ก่อนการทดลองกรองผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกตะกอนและสิ่งปะปนในน้ำตาลโตนด และทำการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 °C เพื่อลดอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

3.2.2 เมมเบรน และระบบกรอง

เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบท่อทำจากเซรามิก (ZrO_2-TiO_2) มีความยาวท่อ 42 cm เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm พื้นที่การกรอง 0.01 m^2 เมมเบรนที่ใช้มีขนาดรูพรุนและ Molecular weight cut off (MWCO) 0.14μm, 300 kDa, 150 kDa และ 50 kDa ระบบมีรายละเอียดดังรูปที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ระบบกรองระดับไมโครฟิลเตรชั่น และอัลตราฟิลเตรชั่น

3.2.2 วิธีการทดลอง

3.2.2.1 วิธีการประมาณค่าฟลักซ์วิกฤติ

การประมาณค่าฟลักซ์วิกฤติ โดยให้ความสารป้อนและรีเทนเททมีความดันเฉลี่ย 3.0 bar ดังนั้นที่ความดันขับเท่ากับ 0 bar ความดันของเพอมิเอทเท่ากับ 3 bar อุณหภูมิสารป้อน 50±1°C ควบคุมฟลักซ์ของเพอมิเอทให้เพิ่มขึ้นเป็นลำดับขั้น (flux-step) จากต่ำไปสูงโดยใช้เพอริสตัลติกปั๊ม ใช้เวลาแต่ละระดับของค่าฟลักซ์ประมาณ 15 นาที ติดตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันขับซึ่งเกิดจากการลดลงของความดันเพอมิเอท โดยติดตามตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความดันขับเมื่อเพิ่มฟลักซ์ของเพอมิเอทให้สูงขึ้นและกรองด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น ค่าฟลักซ์วิกฤติเป็นจุดที่มีค่าฟลักซ์ต่ำกว่าจุดที่ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Chan and Chen, 2001) ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของรูพรุนของเมมเบรน 4 ขนาด คือ 0.14 μm 50, 150 และ 300 kDa และความเร็วตามขวาง ของสารป้อน 5 ระดับคือ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 3.5 m/s สำหรับเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.14 μm และที่ 2.0, 3.0, 3.5, 4.0 และ5.0 m/s สำหรับเมมเบรน MWCOขนาด 50 kDa ทำการทดลอง 3 ซ้ำในทุกสภาวะการทดลอง

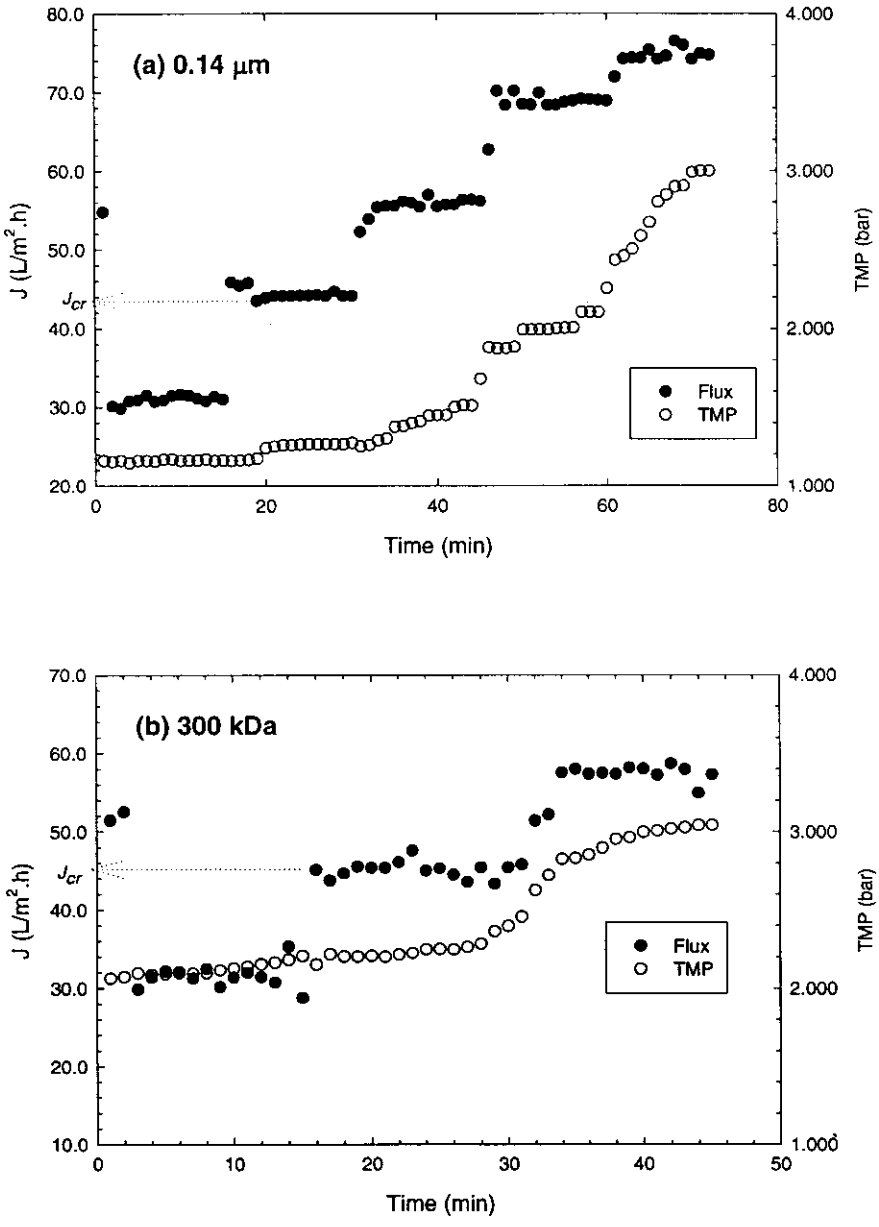
3.2.2.2 การประเมินการทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติของแบบจำลอง

ประเมินแบบจำลองสำหรับทำทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติ 2 แบบจำลองคือ Shear induce diffusion model) และ Torque balance model

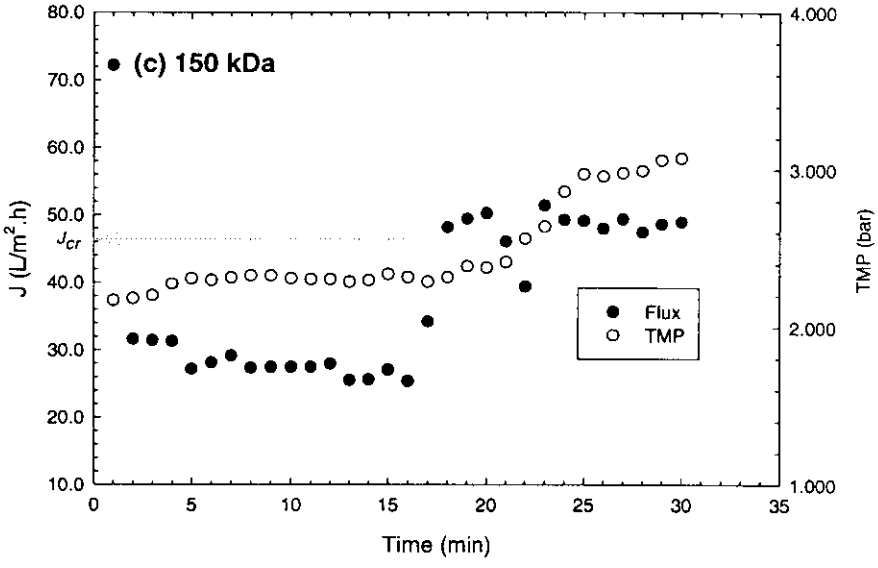
3.3 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

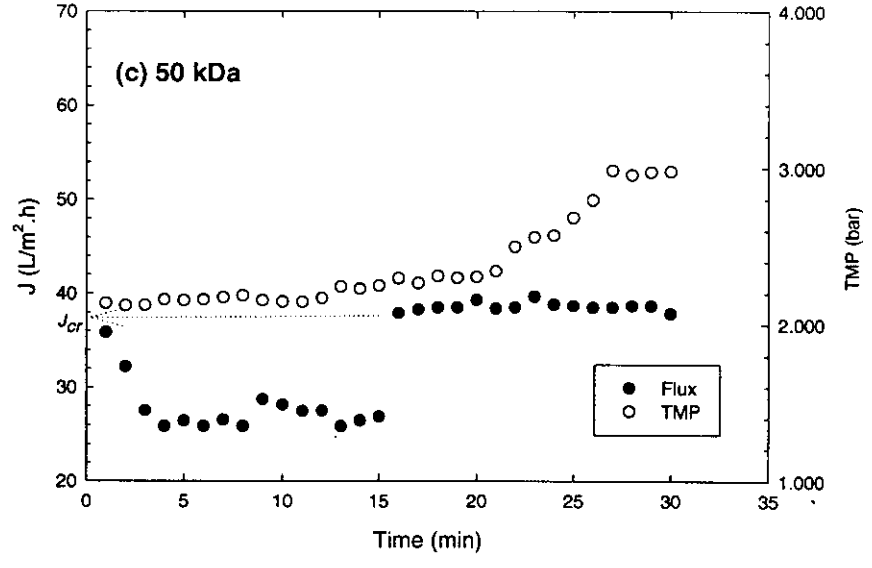
3.3.1 ผลของขนาดรูพรุนต่อค่าฟลักซ์วิกฤติ

การตอบสนองของความดันขับเมื่อเพิ่มฟลักซ์ของเพอมิเอทเป็นระดับขั้นระหว่างการกรองน้ำตาลโดนดด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น แสดงดังภาพที่ 3-2 พบว่าเมื่อฟลักซ์ของเพอมิเอทมีค่าต่ำๆ ความดันขับค่อนข้างคงที่กับเวลา จนกระทั่งเมื่อเพิ่มค่าฟลักซ์ของเพอมิเอทสูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง ความดันขับจะเพิ่มขึ้นตามแต่จะไม่คงที่โดยจะเพิ่มอย่างรวดเร็วเมื่อเวลากรองนานขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่าฟลักซ์ที่กำลังดำเนินการมีค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤติแล้ว



ภาพที่ 3-2 ค่าฟลักซ์วิกฤติ ความดันขับและเวลาการกรองของน้ำตาลโตนดระหว่างกระบวนการเมมเบรนรูพรุน/MWCO ขนาด (a) 0.14 μm (b) 300 kDa(c) 150 kDa (d) 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s ความดันขับ 3.0 bar อุณหภูมิ 50±1 °C





ภาพที่ 3-2(ต่อ) ค่าฟลักซ์วิกฤติ ความดันขับและเวลาการกรองน้ำตาลโตนดระหว่างกระบวนการเมมเบรนรูพรุน/MWCO ขนาด (a) 0.14 μm (b) 300 kDa(c) 150 kDa (d) 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/sความดันขับ 3.0 bar อุณหภูมิ 50±1 °C

ค่าฟลักซ์วิกฤติของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3-1 โดยพบว่าค่าฟลักซ์วิกฤติลดลงเมื่อขนาดรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้อาจจะเนื่องาจากเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าสามารถกักกันโมเลกุลหรืออนุภาคได้มากกว่า จึงมีการสะสมผิวหน้าเมมเบรนได้มากกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้ให้เกิดชั้นเค้กที่ผิวหน้าของเมมเบรนได้ง่ายกว่า และมีค่าฟลักซ์วิกฤติต่ำ ผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen และคณะ (1997) ที่พบว่าค่าฟลักซ์วิกฤติของคอลลอยด์ ลดลงเมื่อมีการใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง

ตารางที่ 3-1 ค่าฟลักซ์วิกฤติ ของรูพรุนระดับต่างๆ ที่ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C

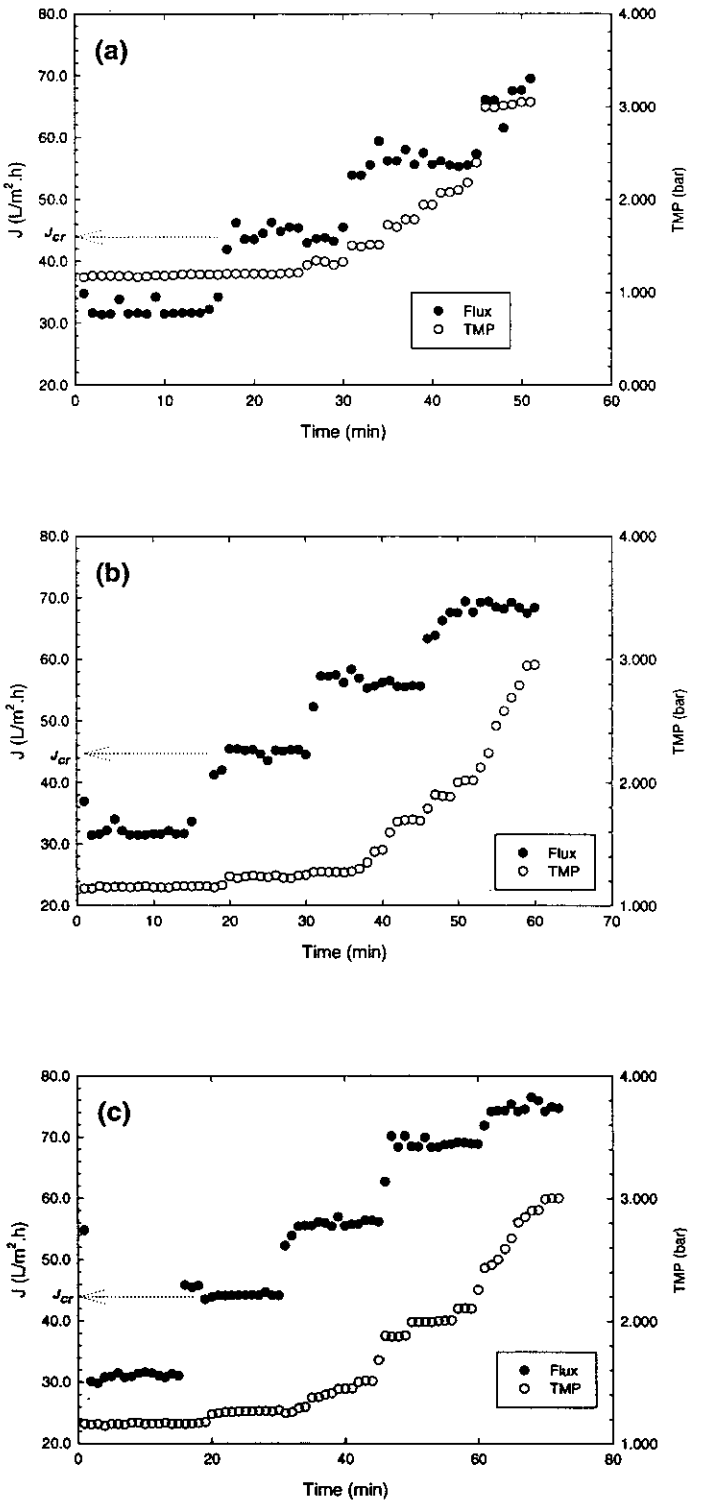
Membrane	Apparent critical flux ($L/m^2.h$)
0.14 μm	44.42 ± 0.02*
300 kDa	45.17 ± 0.12
150 kDa	43.96 ± 2.41
50 kDa	38.18 ± 0.57

* Each value is the mean of triplicate determinations ± standard deviation

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

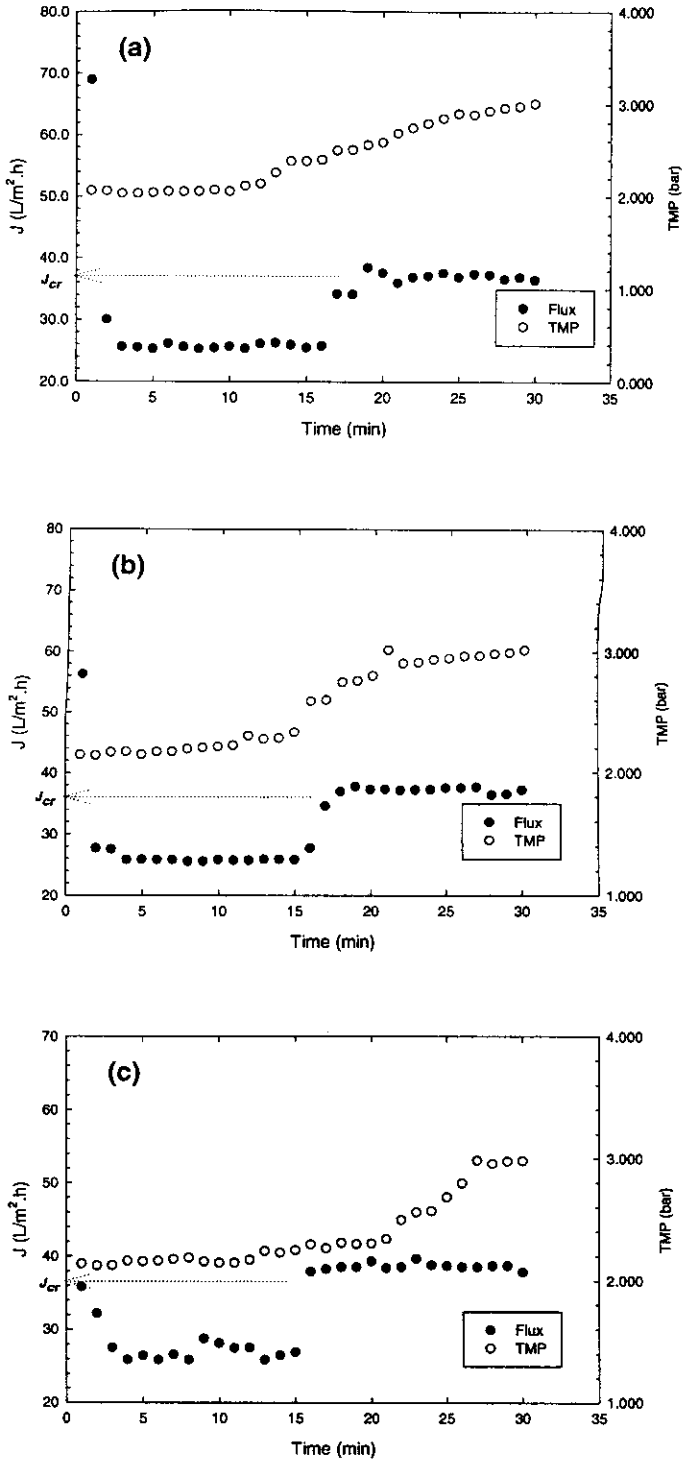
3.3.2 ผลของความเร็วต่อค่าฟลักซ์วิกฤติ

การเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อให้ค่าเพอมิเอทฟลักซ์สูงขึ้นเป็นลำดับขั้นของเมมเบรน 2 ขนาด คือ 0.14 μm และ 50 kDa ที่ความเร็วตามขวางในระดับความเร็วต่างๆ แสดง ดังภาพที่ 3-3 และ 3-4 จากผลการทดลองพบว่าค่าพบว่าค่าฟลักซ์วิกฤติของเมมเบรนทั้ง 2 ขนาดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วตามขวางสูงขึ้น ภาพที่ 3-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์วิกฤติกับเลขเรย์โนลด์ (Reynold number, *Re*) ซึ่งพบว่าค่าฟลักซ์วิกฤติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเลขเรย์โนลด์ โดยมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้ คือ J_{cr} = 5.628*Re*+17.27 สำหรับเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.14 μm และ J_{cr} = 2.796*Re*+26.65 สำหรับเมมเบรน MWCO 50 kDa



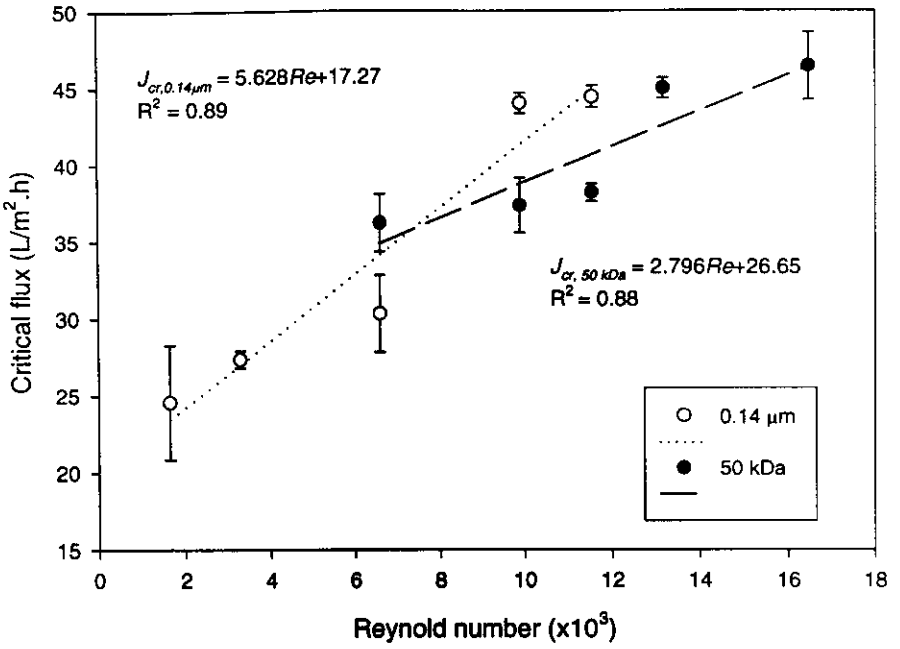
ภาพที่ 3-3 ค่าฟลักซ์วิกฤติเมื่อกระทำการกรองด้วยความเร็วระดับต่างๆ

(a) 2.0 m/s (b) 3.0 m/s (c) 3.5 m/s เมมเบรนรูพรุนขนาด 0.14 μm



ภาพที่ 3-4 ค่าฟลักซ์วิกฤติเมื่อกระทำการกรองด้วยความเร็วระดับต่างๆ

(a) 2.0 m/s (b) 3.0 m/s (c) 3.5 m/s เมมเบรน MWCO ขนาด 50 kDa



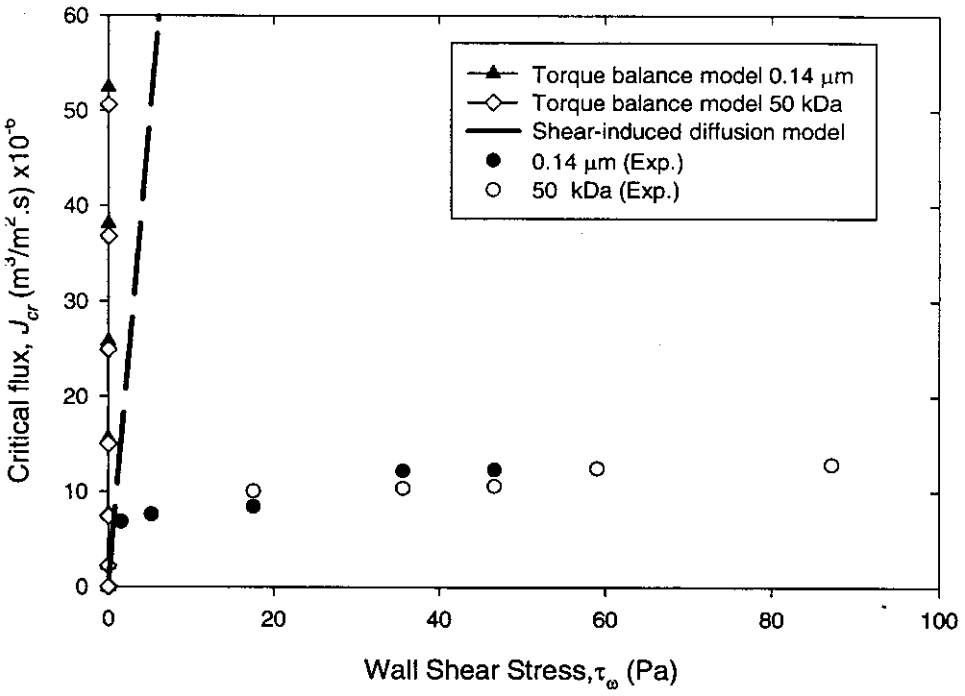
ภาพที่ 3-5 ค่าฟลักซ์วิกฤติของน้ำตาลโตนดกับค่าเลขเรย์โนล์

จะเห็นได้การเพิ่มความเร็วตามขวางหรือเลขเรย์โนลด์มีผลต่อค่าฟลักซ์วิกฤติของเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชั่นน้อยกว่าระดับไมโครฟิลเตรชั่นมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชั่นสามารถกักกันโมเลกุลหรืออนุภาคโดยเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กได้มากกว่าเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่น ทำให้แรงลากที่กระทำต่ออนุภาคให้เคลื่อนออกจากผิวเมมเบรนอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงกระทำกับอนุภาคขนาดใหญ่กว่าที่สะสมบนผนังเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่น ส่งผลให้ความเร็วตามขวางหรือเลขเรย์โนลด์ไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์วิกฤติของเมมเบรนระดับอัตราฟิลเตรชั่นมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Gésan-Guiziou และคณะ (2002) ที่ศึกษาถึงผลของสภาวะในการดำเนินการกรองสารแขวนลอยยางพารา (Latex suspension) ด้วยเมมเบรนแบบท่อเซรามิก (Kerasep membrane) ที่พบว่าค่าฟลักซ์วิกฤติมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีค่าความเค้นเฉือน (τ_w) สูงขึ้น ทั้งนี้เพราะแรงเฉือนที่สูงขึ้นสามารถทำลายการยึดเกาะและสะสมของฟาวลิ่งได้ และทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรูปแบบต่างๆ สูงขึ้น โดยทั่วไปอนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวเมมเบรนเนื่องจากการพาของเพอมิเอท (Convection force) ส่วนอนุภาคเคลื่อนที่ออกจากผิวเมมเบรนด้วยการแพร่ (Diffusion force) และแรงลาก (Drag force) ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่า 100 nm อนุภาคเคลื่อนที่แบบบราวเนี่ยน (Browning diffusion) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่แบบ Shear-induced diffusion และสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1000 nm จะเคลื่อนที่เนื่องจาก

Inertial migration (Huisman *et al.*, 1997; Espinasse *et al.*,2002) แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสารป้อนอีกด้วย (Bacchin *et al.*, 2005)

3.3.3 การทดสอบโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของค่าฟลักซ์วิกฤติ

เพื่อประเมินความใช้ได้ของแบบจำลอง จึงได้ทดสอบความสามารถในการทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติโดยใช้แบบจำลอง Shear-induced diffusion และ Torque balance แบบจำลองทั้ง 2 แบบทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเค้นเฉือนดังภาพที่ 3-6 พบว่าแบบจำลองทั้งสองไม่สามารถทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติได้ถูกต้อง โดยค่าฟลักซ์วิกฤติที่ทำนายสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองมาก



ภาพที่ 3-6 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์วิกฤติจากการทดลอง กับแบบจำลอง Shear-induced diffusion และ Torque balance ของน้ำตาลโตนดเมื่อผ่าน เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ MWCO ขนาด 50 kDa

Huisman และคณะ (1999) ใช้แบบจำลอง Torque balance และ Shear-induced diffusion ทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติของสารแขวนลอยซิลิกาขนาดรัศมีอนุภาค 230 nm ที่พีเอช 2 ระดับ คือ 3 และ 10 โดยการกรองด้วยเมมเบรนทำจากไททาเนีย (titania) ซึ่งพบว่าแบบจำลองทั้งสองไม่สามารถใช้มาอธิบายการเกิดฟลักซ์วิกฤติของซิลิการที่ระดับพีเอชดังกล่าว โดยค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าที่ทำนายด้วยแบบจำลองเป็น การที่แบบจำลองต่างๆ ไม่สามารถทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติจากผลการทดลองได้อาจจะมา

จากมีสาเหตุอย่างโดยเฉพาะเมื่อสารป้อนคือน้ำตาลโตนด เนื่องจากน้ำตาลโตนดประกอบด้วยสารหลายชนิดที่อาจมีบทบาทสำคัญต่อค่าฟลักซ์วิกฤติ จากผลการศึกษาของ Youravong และคณะ (2003) พบว่าอนุภาคขนาดเล็กมีบทบาทสำคัญต่อค่าฟลักซ์วิกฤติระหว่างกระบวนการอัลตราฟิลเตรชั่นนมพร่องมันเนย เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กแพร่ออกจากผิวเมมเบรนได้ช้ากว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ การใช้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเพื่อใช้ทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติอาจจะไม่ถูกต้อง แบบจำลองทั้ง 2 แบบ ไม่ได้รวมเอาผลของคุณสมบัติสารป้อนด้านอื่นนอกจากขนาดและประจุของอนุภาค ทำให้แบบจำลองที่ได้ไม่สมบูรณ์

นอกจากนี้จากผลการทดลองได้ชี้ให้เห็นว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนมีอิทธิพลต่อค่าฟลักซ์วิกฤติและยังส่งผลต่อผลของความเร็วตามขวางต่อค่าฟลักซ์วิกฤติ ดังนั้นแบบจำลองจึงต้องมีความซับซ้อนมากกว่านี้มากซึ่งเป็นการยากในการนำเอาปัจจัยต่างๆ มาได้หมด แบบจำลองที่พัฒนาจากผลการทดลองจึงน่าจะเป็นแบบจำลองที่ยังคงต้องใช้ โดยเฉพาะเมื่อสารป้อนมีความซับซ้อนสูง

4.4 บทสรุป

จากการศึกษาการประมาณค่าฟลักซ์วิกฤติของน้ำตาลโตนดในระหว่างกระบวนการกรองระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นแบบไหลขวางโดยวิธีการเพิ่มฟลักซ์ของเพอมิเอท สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ค่าฟลักซ์วิกฤติของน้ำตาลโตนดมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เพราะเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลงความสามารถในการกักกันสารและสะสมของชั้นเค้กเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะสมหรือเกิดการกักกันของชั้นเค้กง่ายขึ้นและค่าฟลักซ์วิกฤติที่ได้เป็นแบบอ่อน

2. ค่าฟลักซ์วิกฤติของน้ำตาลโตนดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า *Re* ในการดำเนินการทดลองเพิ่มขึ้น เพราะการเคลื่อนที่ของน้ำตาลโตนดในระบบเป็นการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน ส่งผลให้ความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่งในเมมเบรนลดลงเนื่องจากเกิดแรงเฉือนระหว่างอนุภาคและผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นและเพิ่มอัตราการแพร่ของอนุภาคออกจากผิวเมมเบรน จึงสามารถลดการสะสมของชั้นเค้กได้

3. การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์วิกฤติจากการทดลอง และแบบจำลอง Shear-induced diffusion และ Torque balance พบว่า แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถทำนายค่าฟลักซ์วิกฤติได้ถูกต้อง