

บทที่ 2

ฟาวลิงและกลไกการเกิดฟาวลิงในระหว่างกระบวนการกรองน้ำตาลโตนด ด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

2.1 บทนำ

ข้อจำกัดของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน คือการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากการเกิดคอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชันและฟาวลิง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลต่อสมรรถนะของกระบวนการโดยตรง คอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าในส่วนของสารละลายทั้งหมด ทำให้ฟลักซ์ลดลง สามารถกำจัดออกหรือลดด้วยการปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการ โดยถูกจัดเป็นส่วนหนึ่งของฟาวลิงที่ผันกลับได้ (Reversible fouling) ส่วนฟาวลิงที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling) เกิดจากการอุดตันรูพรุนด้วยโมเลกุลหรืออนุภาคทั้งภายในและภายนอกรูพรุนหรือผิวหน้าของเมมเบรน โดยทั่วไปสามารถกำจัดออกด้วยการล้างด้วยสารเคมีเท่านั้น ระดับความรุนแรงของฟาวลิงและกลไกหรือตำแหน่งในการเกิดฟาวลิงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาวะการดำเนินงานของกระบวนการ คุณสมบัติของสารป้อนและคุณสมบัติของเมมเบรน เป็นต้น (Dal-Cin *et al.*, 1996)

โดยทั่วไปการดำเนินงานของกระบวนการเมมเบรนมักทำให้ความดันสูงๆ ซึ่งส่งผลให้ค่าฟลักซ์เริ่มต้นสูง แต่อย่างไรก็ตามค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเกิดฟาวลิงในรูปแบบต่างๆ ทั้งที่บริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของเมมเบรน และในบางกรณียังส่งผลต่อค่าการกักกันองค์ประกอบในสารป้อนให้เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากฟาวลิงอาจทำให้รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กลงหรือบางครั้งชั้นฟาวลิงที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำหน้าที่เป็นเยื่อกรองอีกชั้นหนึ่ง (Vernhet *et al.*, 2003) การกรองในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้ระบบการกรองแบบไหลขวาง โดยทั่วไปการใช้ความเร็วตามขวางสูงสามารถลดการสะสมของฟาวลิงทั้ง 2 ประเภท เป็นการลดความต้านทานการไหลของเพอมีเอทซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์ที่ความเร็วตามขวางต่ำกว่า การเพิ่มความเร็วตามขวางจะทำให้อัตราการแพร่กลับหรือการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากผิวหน้าเมมเบรนไปกับริเทนเททสูงขึ้นช่วยลดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนและฟาวลิงของเมมเบรนได้ ดังนั้นการดำเนินระบบการกรองมักทำให้ความดันไม่สูงมากแต่ใช้ความเร็วตามขวางสูง (Song, 1998)

การศึกษาถึงฟาวลิงและกลไกการเกิดฟาวลิงในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ช่วยทำให้เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อความรุนแรงและรูปแบบหรือลักษณะการอุดตันรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งสามารถนำไปสู่การควบคุมฟาวลิงและยืดอายุการใช้งานของ

เมมเบรน ลดค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดเมมเบรนได้ Kim และคณะ (1992) ศึกษาการเกิดฟาว์ลิงของโปรตีนโบวีนเซรัมอัลบูมิน (Bovine serum albumin, BSA) โดยใช้กล้องแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) ตรวจสอบพฤติกรรมการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนของโปรตีนเมื่อกรองผ่านเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟนที่มีขนาด Molecular weight cut-off (MWCO) 30, 100 และ 300 kDa ที่ความดัน 100 kPa ความเร็วในการกวน (stirring) 400 รอบต่อนาที (rpm) พบว่านอกจากฟาว์ลิงที่ผันกลับไม่ได้การเกิดชั้นคอนเซ้นเตรชันโพลาริเซชันทำให้ค่าความต้านทานไหลของเพอมีเอทสูงขึ้นและค่ากักกันสารในระหว่างการกรองเปลี่ยนแปลง Belfort และคณะ (1994) ให้ความเห็นว่า การเกิดฟาว์ลิงในชั้นแรกที่เกิดกับผิวหน้าเมมเบรนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และฟาว์ลิงที่เกิดจากการอุดตันรูพรุน (Pore blocking) เป็นความต้านทานหลักในระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันซึ่งมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน Bowen และคณะ (1995) พบว่าขนาดของรูพรุนมีผลต่อตำแหน่งและลักษณะการเกิดฟาว์ลิงของเมมเบรน นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าขนาดโมเลกุลและอนุภาคส่งผลต่อลักษณะหรือกลไกการเกิดฟาว์ลิงของเมมเบรน (Prádanos *et al.*, 1996) Blanpain และ Lalande (1997) ศึกษากลไกการเกิดฟาว์ลิงในระหว่างการกรองเบียร์ด้วยเมมเบรนที่ทำจากโพลีคาร์บอนเนต ขนาดรูพรุน $0.22 \mu\text{m}$ ที่ความดัน 100 kPa และกวนด้วยความเร็ว 800 rpm พบว่าในทุกการทดลองเกิดการสะสมของฟาว์ลิงในลักษณะอุดตันทางเข้ารูพรุนและดูดซับภายในรูพรุนทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลง (Pore narrowing) และการเกิดชั้นเค้กที่ผิวหน้าของเมมเบรน (Cake formation) de Barros และคณะ (2003) ศึกษาการเกิดฟาว์ลิงของกระบวนการกรองน้ำตับประคด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน พบว่าเกิดฟาว์ลิงในรูปแบบการอุดตันรูพรุนและการเกิดเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน Al-Malack และคณะ (2004) ศึกษากลไกการเกิด ฟาว์ลิงของคินขาวพบว่าลักษณะการเกิดฟาว์ลิงเป็นแบบการอุดตันรูพรุนและการเกิดชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน

จากการศึกษาผลของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันน้ำตาลโดนดโดย Rhittipairote และคณะ(2004) พบว่าสามารถใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันในการปรับปรุงคุณภาพน้ำตาลโดนดทั้งด้านจุลินทรีย์และความใสได้ แต่ปัญหาที่พบคือการเกิดฟาว์ลิงอย่างรุนแรงในระหว่างกระบวนการส่งผลให้ฟลักซ์ที่ได้ต่ำและทำความสะอาดออกยาก วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อศึกษาถึงผลของรูพรุน ความดันและความเร็วตามขวางของเมมเบรนต่อความรุนแรงของการเกิดฟาว์ลิง อีกทั้งทำความเข้าใจกลไกการเกิดฟาว์ลิงในระหว่างการกรองน้ำตาลโดนดด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางควบคุมการเกิดฟาว์ลิงให้เหมาะสม

2.2 ทฤษฎีกลไกการเกิดฟาวลิง

ได้มีการศึกษากลไกการเกิดฟาวลิงครั้งแรกโดย Hermans และ Bredée (1935) (อ้างโดย Hermia, 1982) ต่อจากนั้นได้มีการพัฒนาแก้ไขโดย Hermia (1982) โดยเสนอรูปแบบการเกิดฟาวลิง ทั้งที่เกิดภายในรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรนในระหว่างการกรองของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-newtonian) แบบปิดตาย (Dead-end filtration) ภายใต้สภาวะความดันคงที่ ต่อมา Prádanos และคณะ (1996) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายกลไกการเกิดฟาวลิงสำหรับระบบกรองแบบไหลขวางและประยุกต์ใช้กับของไหลนิวโตเนียน (Newtonian) โดยแบ่งกลไกการเกิดฟาวลิง 4 ลักษณะตามตำแหน่งและลักษณะของฟาวลิง ซึ่งส่งผลให้มีรูปแบบลดลงของค่าฟลักซ์ที่มีลักษณะเฉพาะและแตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) Complete Blocking Model, (CBM)

แบบจำลองนี้มีสมมติฐานว่า โมเลกุลหรืออนุภาคที่มาถึงเมมเบรนอุดรูพรุนอย่างสมบูรณ์ โดยทุกๆ โมเลกุลหรืออนุภาคมีส่วนในการอุดตันทางเข้ารูพรุนโดยไม่ซ้อนทับกัน ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการดังนี้

$$\ln J_v = -k_b t + \ln J_{v,0} \quad [2.1]$$

- เมื่อ J_v = ฟลักซ์ของเพอมีเอทที่เวลาใดๆ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
 $J_{v,0}$ = ฟลักซ์ของเพอมีเอทเริ่มต้น ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
 t = เวลา (s)
 k_b = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง CBM (s^{-1})

2.) Intermediate Blocking Model (IBM)

แบบจำลอง IBM แสดงถึงการอุดตันรูพรุนของอนุภาค โดยมีสมมติฐานว่าอนุภาคหนึ่งสามารถซ้อนทับบนอนุภาคอื่นได้ ค่าฟลักซ์เปลี่ยนแปลงตามสมการ

$$\ln J_v = -k_i V + \ln J_{v,0} \quad [2.2]$$

- เมื่อ J_v = ฟลักซ์ของเพอมีเอทที่เวลาใดๆ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
 V = ปริมาตรของเพอมีเอท (m^3)
 k_i = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง IBM (m^{-1})

3) Standard Blocking Model (SBM)

เป็นการอุดตันเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนมาก โดยอนุภาคสามารถผ่านรูพรุนได้ แต่มีบางส่วนที่คกค้างและถูกดูดซับที่ผนังของรูพรุน ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงและเกิดการอุดตันภายในรูพรุน ค่าพลักซ์เปลี่ยนแปลงไปตามสมการ

$$J_v^{1/2} = J_{v,0}^{1/2} - \frac{k_s}{2} J_{v,0}^{1/2} A_0 V \quad [2.3]$$

เมื่อ A_0 = พื้นที่กรองของเมมเบรน (m^2)

k_s = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง SBM (m^3)

4) Cake Filtration Model (CFM)

เป็นแบบจำลองที่อธิบายการกรองอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ คือถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน อนุภาคจะถูกสะสมและเกิดชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน หรือ ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน อนุภาคขนาดเล็กจะสะสมภายในรูพรุนและต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน สมการอธิบายค่าพลักซ์ตามแบบจำลองนี้คือ

$$\frac{t}{V} = \frac{k_c A_0^2}{2} V + \frac{1}{J_{v,0}} \quad [2.4]$$

เมื่อ t = เวลา (s)

A_0 = พื้นที่ตัดขวางของเมมเบรน (m^2)

k_c = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง CFM (s/m^6)

2.3 วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

2.3.1 น้ำตาลโตนด

น้ำตาลโตนดที่มีการเติมไม้เคี่ยมในระหว่างการเก็บเกี่ยว ทำการเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C ตลอดจนการขนส่งและก่อนการทดลองและต้องใช้ให้หมกภายใน 15 ชั่วโมง โดยก่อนการทดลองกรองผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกตะกอนและสิ่งปะปนในน้ำตาลโตนดออกและทำให้อุ่นจนมีอุณหภูมิ 50 °C เพื่อลดอัตราการเจริญของจุลินทรีย์

2.3.2 ระบบกรองระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน และเมมเบรน

ระบบกรองมีรายละเอียดดังแสดงในบทที่ 1 โดยใช้เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ MWCO 300, 150 และ 50 kDa

2.3.1 วิธีการทดลอง

2.3.1.1 ผลของขนาดรูพรุนของเมมเบรน, ความดัน และความเร็วตามขวางต่อฟลักซ์ของเพอมีเอท การกักกันปริมาณโปรตีน และความต้านทานของเมมเบรนที่เกิดจากฟาวลิง

- ศึกษาผลของรูพรุน/MWCOของเมมเบรน 4 ขนาด ได้แก่ 0.14 μm , 300, 150 และ 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s ความดันขับ 1.5 bar
- ศึกษาผลของของความดันขับ 3 ระดับ ได้แก่ 1.0, 1.5 และ 3.0 bar ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s โดยใช้เมมเบรน 2 ขนาด คือไมโครฟิลเตรชัน ขนาดรูพรุน 0.14 μm และอัลตราฟิลเตรชัน ขนาด MWCO 50 kDa
- ศึกษาผลของความเร็วตามขวาง 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s ความดันขับ 1.5 bar โดยใช้เมมเบรน 2 ขนาด คือไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.14 μm และอัลตราฟิลเตรชัน ขนาด MWCO 50 kDa
- ทุกสภาวะการทดลองดำเนินการกรองแบบป้อนกลับ ที่อุณหภูมิ 50 ± 1 °C เป็นเวลา 150 นาที ตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 นาทีโดยวิธีการชั่งน้ำหนักเพอมีเอท สุ่มตัวอย่างจากเพอมีเอทและรีเทนเทททุกๆ 10 นาที จนกระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการ นำตัวอย่างจากการสุ่มมาตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณโปรตีนโดยวิธี Lowry (Lowry *et al.*, 1951)
- ทำการทดลองตามสภาวะต่างๆ ที่กำหนด 3 ซ้ำ นำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

2.3.1.2 การศึกษาผลของรูพรุนของเมมเบรน, ความดัน และความเร็วตามขวาง ต่อกลไกการเกิดฟาวลิง

- ศึกษาผลของรูพรุน/MWCOของเมมเบรน 4 ขนาด ได้แก่ 0.14 μm , 300, 150 และ 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s ความดันขับ 1.5 bar
- ศึกษาผลของของความดันขับ 3 ระดับ ได้แก่ 1.0, 1.5 และ 3.0 bar ที่ความเร็วของตามขวาง 3.5 m/s โดยใช้เมมเบรน 2 ขนาด คือไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.14 μm และ อัลตราฟิลเตรชันขนาด MWCO 50 kDa
- ศึกษาผลของความเร็ว 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s ความดันขับ 1.5 bar โดยใช้ เมมเบรน 2 ขนาด คือ ไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.14 μm และอัลตราฟิลเตรชันขนาด

MWCO 50 kDa

- ทุกสภาวะการทดลองทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงตามวิธีของ Prádanos และคณะ (1996)

2.3.2 วิธีการวิเคราะห์ฟาวลิง (Grandison, et al., 2000)

ในการวิเคราะห์ความต้านทานของกระบวนการกรอง สามารถแยกความต้านทานการไหลของเพอมีเอทเป็นความต้านทานของเมมเบรน (R_m) ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling, R_{irf}) และความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงที่ผันกลับได้ (Reversible, R_{rf}) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชั้นโพลาริเซชันแต่ในบางครั้งอาจเป็นชั้นของเจลหรือเค้กที่ชะออกได้ด้วยน้ำ ดังนั้นความต้านทานรวม (R_t) ประกอบด้วย

$$R_t = R_m + R_{rf} + R_{irf} \quad [2.5]$$

ความต้านทานแต่ละชนิดสามารถคำนวณได้ดังนี้ คือความต้านทานรวม (R_t) สามารถคำนวณได้จากฟลักซ์ของสารละลายดังสมการ

$$R_t = \frac{TMP}{\mu_p J} \quad [2.6]$$

เมื่อ TMP คือความดันขับ (Pa) J คือ ฟลักซ์ของสารละลาย ($m^3/m^2.s$) และ μ_p คือความหนืดของเพอมีเอท (Pa.s)

ความต้านทานเมมเบรน (R_m) สามารถคำนวณได้จากฟลักซ์ของน้ำจากสมการ

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_p J_w} \quad [2.7]$$

เมื่อ J_w คือ ฟลักซ์ของน้ำของเมมเบรนสะอาด ($m^3/m^2.s$)

หลังจากการใช้งานแล้วทำการไล่สารป้อนออกจากระบบและกำจัดชั้นฟาวลิงที่ผันกลับได้ด้วยน้ำสะอาด ค่าความต้านทานที่เหลืออยู่หลังไล่น้ำจึงประกอบด้วย ความต้านทานเมมเบรน (R_m) และความต้านทานของฟาวลิงที่ผันกลับไม่ได้ (R_{irf}) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ [2.8]

$$R_m + R_{irf} = TMP / \mu_w J'_w \quad [2.8]$$

เมื่อ J'_w คือ ฟลักซ์น้ำสะอาดของเมมเบรนหลังการกรอง ($m^3/m^2.s$)

ความต้านทานของฟาวลิง (R_{irf}) สามารถคำนวณโดยการแทนค่าของ R_m จากสมการ

[2.7] ลงในสมการ [2.9] จะได้ดังนี้

$$R_{irf} = TMP / (\mu_w J'_w) - R_m \quad [2.9]$$

ในทดลองครั้งนี้ใช้ความดัน 1.0 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 30 ± 5 °C

เพื่อวิเคราะห์ค่า R_m , R_f และ R_{irf}

2.3.3 วิธีการล้างเมมเบรน

หลังจากกระบวนการกรองแต่ละครั้งทำการล้างเมมเบรนด้วยน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อชะล้างสิ่งอุดตันออกและวิเคราะห์ค่า R_{irf} ต่อจากนั้นทำการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.5% (v/v) พีเอช 11 ที่อุณหภูมิห้อง ($\sim 30^\circ\text{C}$) นาน 30 นาที ไล่ค้างออกจากระบบด้วยน้ำสะอาดจนหมด แล้วจึงล้างด้วยกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 0.5% (v/v) พีเอช 2 ที่อุณหภูมิห้อง ($\sim 30^\circ\text{C}$) นาน 30 นาที หลังจากนั้นจึงไล่กรดด้วยน้ำสะอาด แล้วทำการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำที่สภาวะคงที่เพื่อหาค่า R_m และใช้โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์เข้มข้น 0.5 % (w/v) วนทั้งระบบนาน 10 นาที ก่อนทำการปิดระบบการกรอง

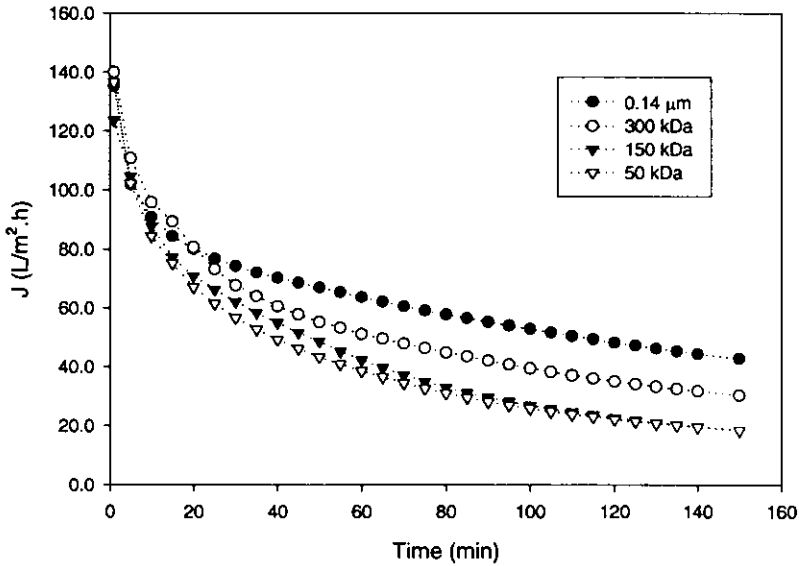
2.4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง

2.4.1 ผลของขนาดรูพรุนเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวางต่อฟลักซ์ ค่ากักกันโปรตีน และความต้านทานฟาวลิง

2.4.1.1 ผลของขนาดรูพรุน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ระหว่างการกรองน้ำตาลโคคนคด้วยเมมเบรนที่มีรูพรุน/ MWCO 0.14 μm , 300, 150 และ 50 kDa (ดังภาพที่ 2-1) พบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าจะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า โดยค่าฟลักซ์เฉลี่ยที่เวลา 150 นาที เท่ากับ 42.8 30.4 18.4 และ 18.3 $\text{L}/\text{m}^2.\text{h}$ ตามลำดับ ค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สภาวะคงตัวในช่วงท้าย (แต่ในการทดลองนี้ใช้เวลา 150 นาที อาจไม่ถึงสภาวะคงตัว) สาเหตุ

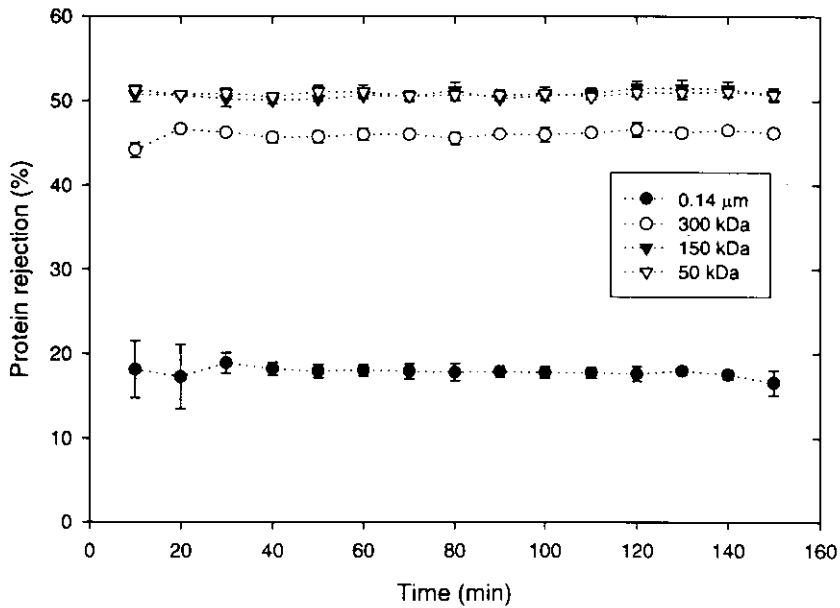
ของการลดลงของฟลักซ์ระหว่างการกรองด้วยไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันคือ
ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันและการเกิดฟาวลิงซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป



ภาพที่ 2-1 ผลของรูพรุนต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอทที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 °C

ผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ Jiffin และคณะ (1993) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของไวน์เมื่อกรองผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนต่างๆ คือ 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.5 และ 3.0 μm โดยพบว่าค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก และเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีค่าฟลักซ์ที่สูงกว่า

ความสามารถในการกักกัน โปรตีนในน้ำตาลโคคนคของเมมเบรนที่มีรูพรุนและ MWCO ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2-2 เมมเบรนที่มี MWCO 50 150 และ 300 kDa ให้ค่าการกักกันโปรตีนเฉลี่ย 45-60% ขณะที่เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.14 μm สามารถกักกัน โปรตีนเฉลี่ย 17-20%



ภาพที่ 2-2 ผลของรูพรุนต่อการกักกัน โปรตีน ที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 °C

โดยค่าการกักกันโปรตีนของเมมเบรนขนาด MWCO 50 และ 150 kDa มีความแตกต่างจากค่าการกักกันโปรตีนของเมมเบรนขนาด 300 kDa และ 0.14 μm อย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ค่ากักกันโปรตีนอาจจะมีความเกี่ยวข้องสัดส่วนของอนุภาคที่สะสมบนผิวหน้าเมมเบรน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของฟาวลิงที่เกิดขึ้นทั้งต่อกลไกหรือความรุนแรงของการเกิดฟาวลิง ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป ผลการศึกษาดังนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chen (1998) ระหว่างการกรองโปรตีน BSA ด้วยเมมเบรนขนาด 0.1, 0.2 และ 0.4 μm ที่ความดัน 5 kPa ซึ่งพบว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนเล็กมีความสามารถในการกักกันโปรตีนมีสูงกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า

การศึกษาด้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงทั้งแบบ R_{ff} และ R_{fr} ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2-1 จากตารางจะเห็นว่า R_{fr} มีค่าสูงกว่า R_{ff} ทุกขนาดรูพรุน ทั้ง R_{ff} และ R_{fr} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเมมเบรนมีขนาดรูพรุนลดลง โดยทั่วไปการเกิดฟาวลิงของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่มักเกิดรุนแรงกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เนื่องจากมีการเกิดฟาวลิงภายในรูพรุนได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามอาจเป็นไปได้ฟาวลิงที่เกิดบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนส่งผลกระทบต่อค่า R_{fr} มากกว่าฟาวลิงที่เกิดภายในรูพรุน เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ค่ากักกันโปรตีนซึ่งอาจรวมถึงอนุภาคขนาดเล็กถูกกักกันไว้ที่ผิวหน้าของเมมเบรนได้มากกว่าเมื่อใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนเล็ก จึงอาจเป็นไปได้ว่า

โปรตีนและอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเป็นสารที่มีความสำคัญต่อคุณลักษณะของชั้นฟาว์ดิงที่ผิวหน้าของเมมเบรนและส่งผลให้เกิดชั้นฟาว์ดิงที่หนาและแข็งแรงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ R_{irr} ของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ และด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันทำให้ค่า R_{rr} สูงขึ้นเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง

ตารางที่ 2-1 ผลของรูพรุนต่อค่าความต้านทานเมมเบรน และความต้านทานฟาว์ดิง ที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 °C.

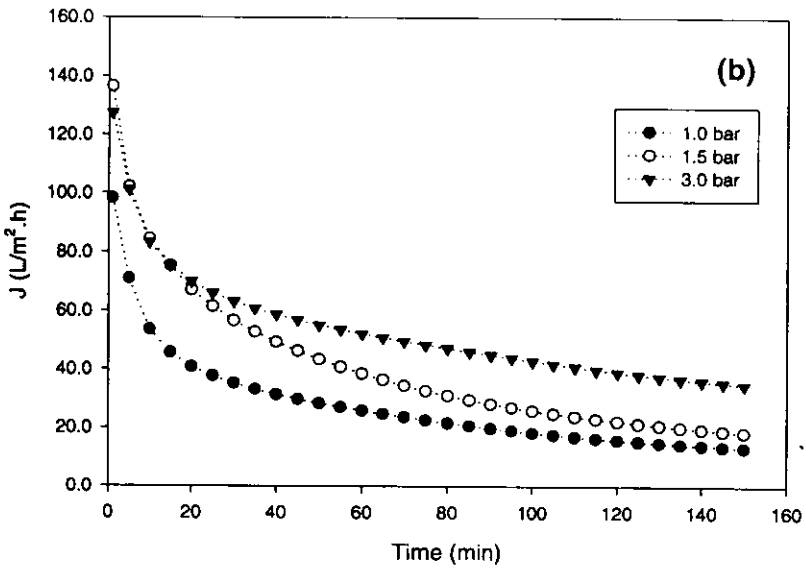
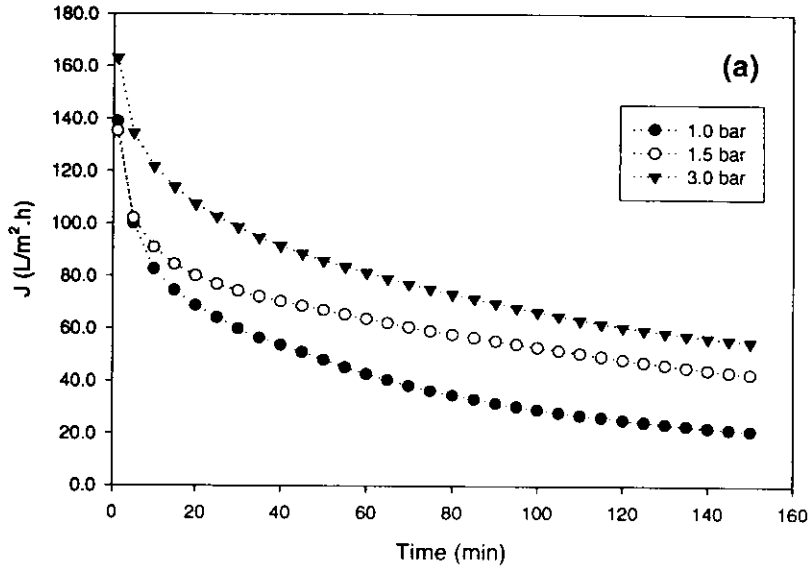
Pore size/MWCO	0.14 μm	300 kDa	150 kDa	50 kDa
Resistance (m^{-1}) $\times 10^{12}$				
R_m	1.69 $\pm 0.07^a$	1.73 $\pm 0.04^b$	1.80 $\pm 0.04^b$	1.80 $\pm 0.05^b$
R_{irr}	5.33 $\pm 0.26^a$	5.57 $\pm 0.09^a$	8.13 $\pm 2.10^{ab}$	9.42 $\pm 3.31^b$
R_{rr}	40.66 $\pm 5.41^a$	51.57 $\pm 0.68^b$	55.34 $\pm 6.15^b$	74.06 $\pm 4.16^c$

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

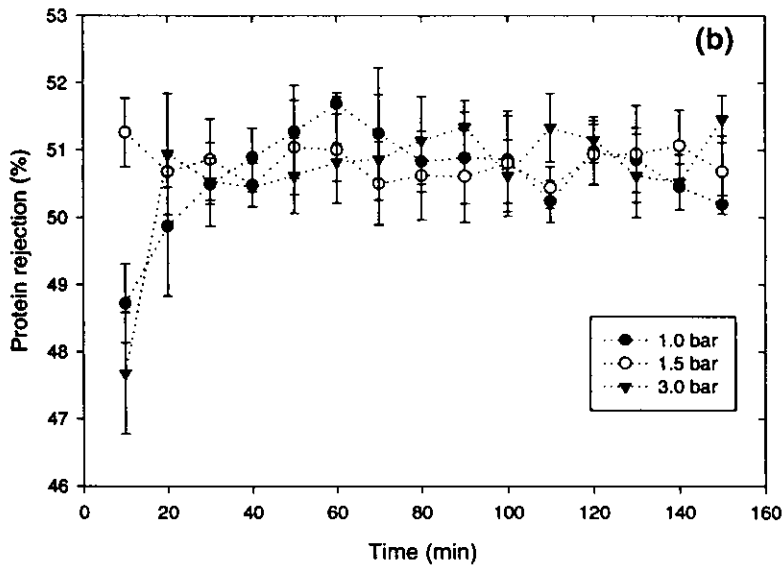
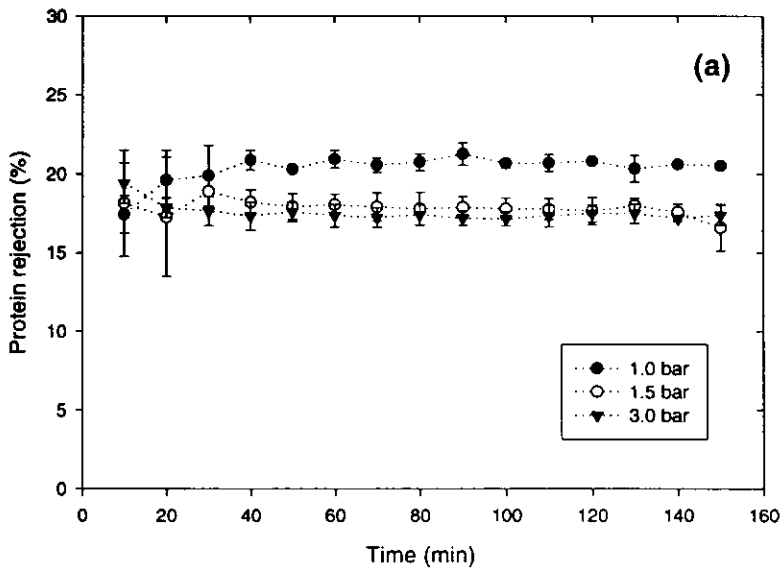
^{ac}, Mean within rows of permeate followed by the same letter are not significantly different at the $p > 0.05$

2.4.1.2 ผลของความดันขับ

จากการศึกษาผลของความดันต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของน้ำตาลโตนด พบว่าค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกของการกรอง(ภาพที่ 2-3) เมื่อระยะเวลาการกรองนานขึ้นมีแนวโน้มที่ฟลักซ์เข้าสู่สภาวะคงตัวดังภาพที่ 2-3 ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน โดยที่ฟลักซ์ที่เวลา 150 นาที เมื่อกรองด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm ที่ความดันขับ 1.0 1.5 และ 3.0 bar มีค่าเท่ากับ 21.2, 42.8 และ 55.0 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ และเมื่อกรองด้วยเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa ที่ความดันขับ 1.0, 1.5 และ 3.0 bar มีค่าเท่ากับ 13.2 18.4 และ 34.8 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองครั้งนี้แสดงค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทอยู่ในช่วงที่ขึ้นกับความดัน ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มความดันทำให้ ฟลักซ์สูงขึ้น การเพิ่มความดันในช่วงนั้นนอกจากทำให้ค่าฟลักซ์สูงขึ้นแล้วยังทำให้อนุภาคและโมเลกุลถูกพามาสู่ผิวหน้าเมมเบรนมากขึ้น และหากเพิ่มความดันจนอยู่ในระดับที่ค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดันจะทำให้ชั้นเค้กมีความหนาหรืออัดตัวแน่นแลซึ่งเป็นการเพิ่มความต้านทานการไหลของเพอมีเอท และการดำเนินการที่ความดันต่ำๆ จะเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันได้น้อยกว่าจึง



ภาพที่ 2-3 ผลของความดันต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอท
 (a) 0.14 μm (b) 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 2-4 ผลของความดันขับต่อค่าการกักกันโปรตีน (a) 0.14 μm (b) 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C

ทำให้เกิดการแพร่กลับของสารละลายได้ช้า ดังนั้นฟลักซ์จึงเข้าสู่ภาวะคงตัวได้เร็วกว่าที่ความดันสูง (Hong *et al.*, 1997)

ค่าการกักกันของโปรตีนที่ความดันต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2-4 พบว่าความดันไม่มีผลต่อค่าการกักกันโปรตีน โดยเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa มีค่าการกักกันโปรตีนอยู่ในช่วง 15-20% และ 35-65% ตามลำดับ เนื่องจากระดับความดันที่ใช้อยู่

ในช่วงที่ค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดัน ชั้นเค้กและฟาวลิ่งที่อยู่บนผิวหน้าเมมเบรนอาจจะไม่แน่นและหนาพอที่จะเปลี่ยนค่าการกักกันของโปรตีนเห็นได้ว่าการกักกันของเมมเบรน โดยทั่วไปการเพิ่มความดันจะทำให้ชั้นเค้กหรือฟาวลิ่งอัดตัวแน่นมากขึ้นทำหน้าที่เป็นเมมเบรนอีกชั้น ซึ่งในบางกรณีจะส่งผลให้สามารถกักกันไว้ในส่วนของรีเทนเทอร์ได้มากขึ้น โดยยังพบว่าเมื่อกรองน้ำคาลโดนคด้วยเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa ค่าการกักกันโปรตีนมีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วงแรก ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นของฟาวลิ่ง

ความต้านทานการไหลของเพอมีอัทที่ความดันต่าง ๆ พบว่าการเพิ่มความดันขั้บทำให้ค่า R_{fp} และ R_{fr} ของเมมเบรนเพิ่มขึ้นแสดงดังตารางที่ 2-2 การเพิ่มความดันขั้บจะมีผลให้ชั้นคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันและชั้นเจลหรือเค้กหนาขึ้นและชั้นเจลหรือเค้กสูงมีความแน่นสูงขึ้น แต่ทั้งนี้คุณสมบัติของชั้นเจลหรือเค้กก็ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิในการดำเนินการกรองและคุณสมบัติสารป้อน เป็นต้น (Vernhet *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2003)

ตารางที่ 2-2 ผลของความดันต่อค่าความต้านทานเมมเบรน และความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่ง เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ MWCO 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$

Resistance (m^{-1}) $\times 10^{12}$	0.14 μm			50 kDa		
	1.0 bar	1.5 bar	3.0 bar	1.0 bar	1.5 bar	3.0 bar
R_n		1.61* ± 0.13			1.76 ± 0.08	
R_{fr}	6.93 $\pm 0.19^a$	5.33 $\pm 0.26^b$	5.66 $\pm 0.08^b$	7.80 $\pm 1.36^{ns}$	9.42 $\pm 3.31^{ns}$	11.90 $\pm 1.23^{ns}$
R_{fp}	32.74 $\pm 17.93^b$	40.66 $\pm 5.41^{ab}$	61.59 $\pm 7.84^a$	79.04 $\pm 7.43^{ns}$	74.06 $\pm 4.16^{ns}$	89.80 $\pm 7.13^{ns}$

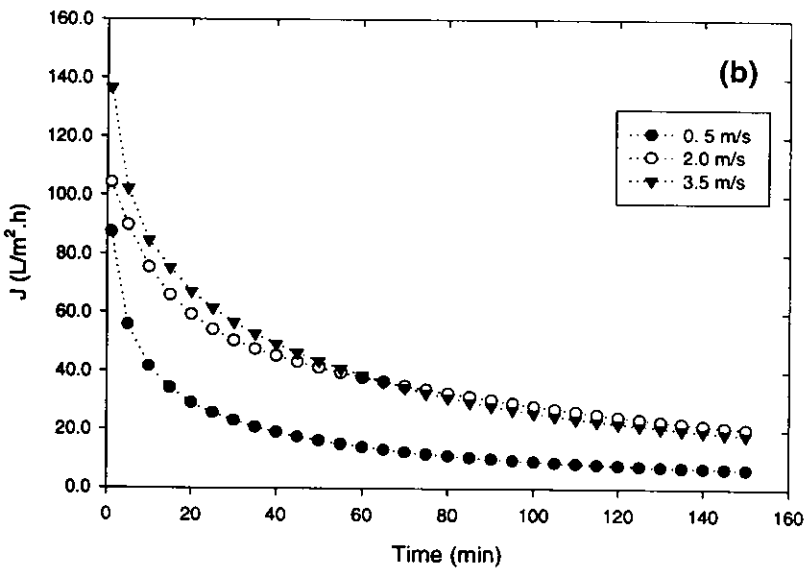
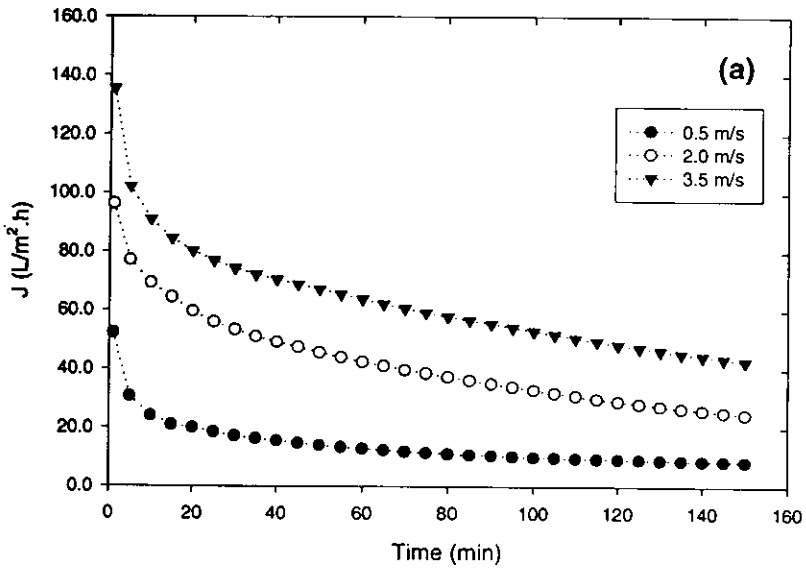
Note * Each value is the mean of triplicate determinations \pm standard deviation
^{a,c}, Mean within rows of permeate followed by the same letter are not significantly at the $p > 0.05$
^b different at the $p > 0.05$

2.4.1.3 ผลของความเร็วตามขวาง

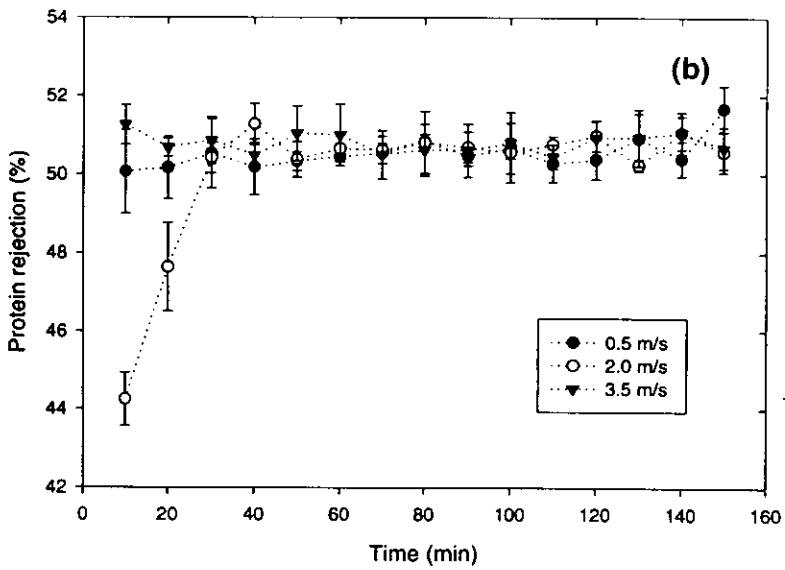
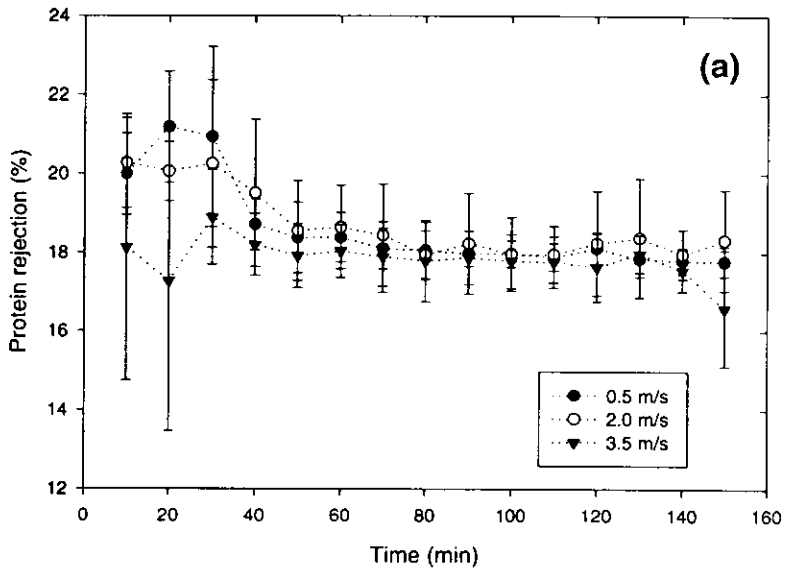
จากการศึกษาผลของความเร็วตามขวางต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ พบว่าเมื่อมีความเร็วตามขวางสูงขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีอัทเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 2-5) โดยมีค่าฟลักซ์เฉลี่ยที่เวลา 150 นาที เท่ากับ 8.5, 24.6 และ 42.8 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ เมื่อกรองด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm ที่ความเร็วตามขวาง 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s ตามลำดับ ส่วนเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa มีค่าฟลักซ์เท่ากับ

6.6, 20.3 และ 18.3 L/m².h ที่ความเร็วตามขวาง 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเร็วตามขวางทำให้เกิดความดันเนื่องที่ผิวของเมมเบรนสูงขึ้น ลดความหนาของชั้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและส่งผลกระทบต่ออัตราการแพร่กลับของอนุภาคจากผิวหน้าเมมเบรน ลดการขีดเกาะระหว่างเมมเบรนและอนุภาค/โมเลกุล และอนุภาค/โมเลกุลด้วยตัวเอง ฟาวลิงที่เกิดจึงลดลง ทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดำเนินการกรองที่ความเร็วตามขวางต่ำ (Lee *et al.*, 2002)

จากการศึกษาผลของความเร็วตามขวางต่อการการกักกันโปรตีน พบว่ามีการการเพิ่มความเร็วตามขวางไม่ส่งผลต่อค่าการกักกันโปรตีน (ภาพที่ 2-6) จากการศึกษาผลของความเร็วต่อความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงในกระบวนการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-3 โดยพบว่าการเพิ่มความเร็วส่งผลให้ค่า R_{ff} และ R_{mf} ลดลง ที่ความเร็วตามขวางต่ำ (0.5 m/s) มีความต้านทาน R_{ff} สูงมาก เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และมีการสะสมของฟาวลิงภายในรูพรุนและ/หรือผิวหน้าเมมเบรนอย่างรวดเร็ว เพราะดำเนินการกรองอยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ แต่ในทางกลับกันที่ความเร็วตามขวางสูง (3.5 m/s) น้ำตาลโตนดเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนทำให้เกิดการพาและถากอนุภาคให้เคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ กลับไปยัง bulk เนื่องจากเกิดแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนและผิวอนุภาค สามารถลดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ (Tadei *et al.*, 1998) ส่วนค่าความต้านทาน R_{ff} ซึ่งเป็นความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงที่ไม่ผันกลับมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้ความเร็วเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดฟาวลิงรูปแบบนี้จะเป็นฟาวลิงที่อยู่ใกล้ชิดกับผนังรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรนมาก และมีแรงกระทำยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับ เมมเบรนสูง แรงเฉือนที่สูงขึ้นในระดับที่ทดลองจึงอาจไม่มีผลต่อความต้านทาน R_{ff} มากนัก (Merin and Shomer, 1999; Chilukuri *et al.*, 2001) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Vladisavljević และคณะ (2003) ของกระบวนการกรองน้ำแอปเปิ้ลด้วยเมมเบรนชนิดท่อเซรามิกขนาด MWCO 300, 50 และ 30 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 100-900 ml/min พบว่า ความต้านเนื่องจากฟาวลิง (R_p) มีค่าลดลงเมื่อความเร็วของสารป้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงคือความต้านทานแบบผันกลับได้ (R_{fr})



ภาพที่ 2-5 ผลของความเร็วดำรงต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอท
 (a) 0.14 μm (b) 50 kDa ที่ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 2-6 ผลของความเร็วดำเนินการ ต่อค่าการกักกันโปรตีน (a) 0.14 μm (b) 50 kDa ที่ความดัน 1.5 bar อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 2-3 ผลของความเร็วต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิง เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ MWCO 50 kDa ที่ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$

Resistance (m^{-1}) $\times 10^{12}$	0.14 μm			50 kDa		
	0.5 m/s	2.0 m/s	3.5 m/s	0.5 m/s	2.0 m/s	3.5 m/s
R_m		1.65 \pm 0.04*			1.71 \pm 0.03	
R_{ir}	6.37 \pm 0.39 ^a	7.10 \pm 0.80 ^b	5.33 \pm 0.26 ^c	15.91 \pm 1.04 ^a	16.66 \pm 0.60 ^a	9.42 \pm 3.31 ^b
R_{tr}	94.15 \pm 4.27 ^a	66.45 \pm 9.68 ^b	40.66 \pm 5.41 ^c	94.82 \pm 5.37 ^a	87.19 \pm 2.41 ^a	74.06 \pm 4.16 ^b

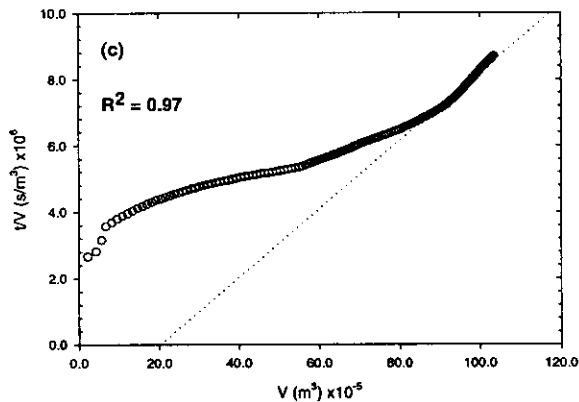
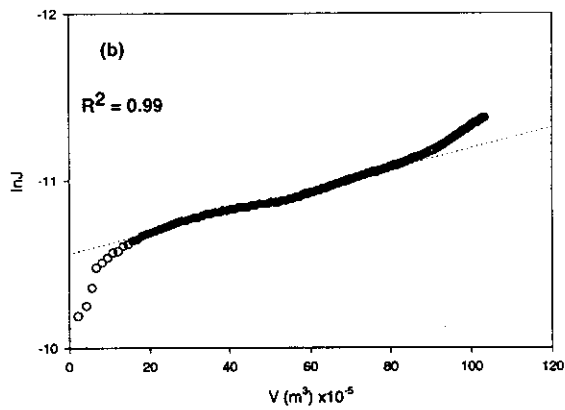
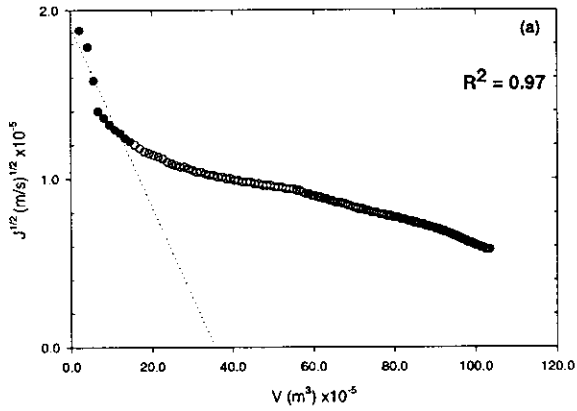
Note * Each value is the mean of triplicate determinations \pm standard deviation

^{a,c}, Mean within rows of permeate followed by the same letter are not significantly different at the $p > 0.05$

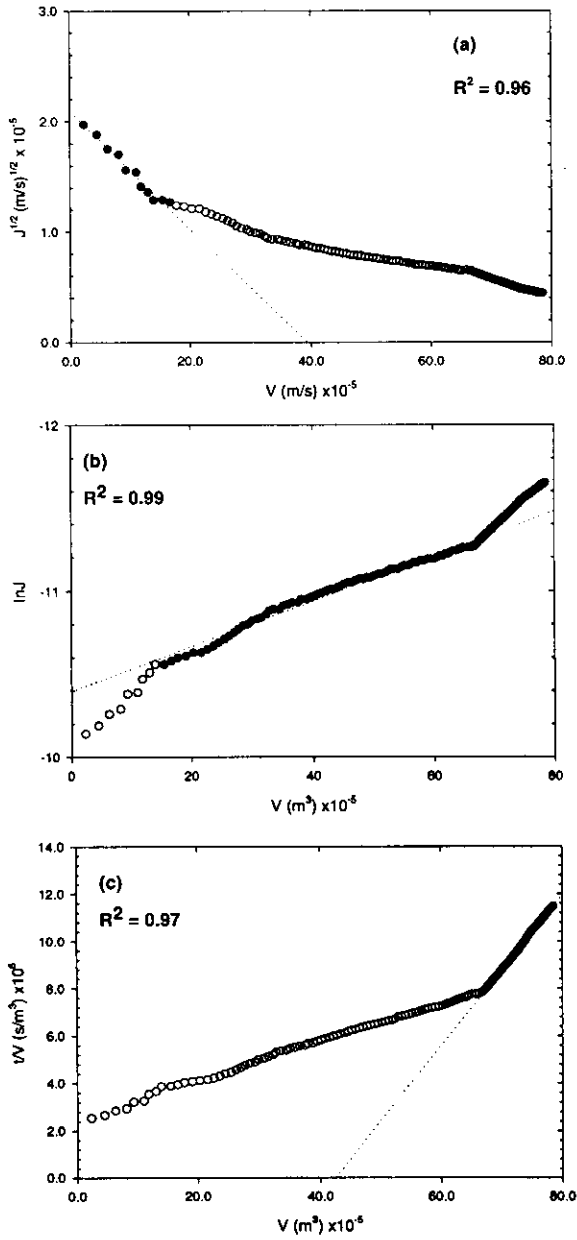
2.4.2 ผลของขนาดรูพรุนเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวาง ต่อกลไกการเกิดฟาวลิง
 เนื่องจากการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนด ไม่สามารถบ่งบอกถึงกลไกหรือลักษณะของฟาวลิงที่แท้จริงได้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการลดลงของฟลักซ์ แล้ววิเคราะห์การกลไกเกิดฟาวลิงในระหว่างการกรองโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาโดย Prádanos และคณะ (1996)

ในการศึกษาได้นำข้อมูลมาพล็อตตามความสัมพันธ์ของสมการ โดยใช้แบบจำลองต่างๆ เพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยตัดสินจากค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear regression coefficient, R^2) และนำมาหาค่าคงที่ของแบบจำลองการเกิดกลไกฟาวลิง ดังในตัวอย่างภาพที่ 2-7 ถึง 2-10

จากภาพที่ 2-7 ถึง 2-10 แสดงการวิเคราะห์กลไกตามแบบจำลองต่างๆ ในการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุนต่างๆ ที่ความดันขับคงที่ 1.5 bar และความเร็วตามขวาง 3.5 m/s ในช่วงแรกสามารถอธิบายกลไกการเกิดฟาวลิงด้วยแบบจำลอง SBM ตามความสัมพันธ์ของ $J^{1/2}$ กับ V โดยกลไกดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ทำให้ปริมาตรของเพอมีเอทที่ได้นั้นมีค่าต่ำและสิ้นสุดอย่างรวดเร็ว ต่อมาเป็นแบบการอุดตันบางส่วนของรูพรุน โดยสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง IBM โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับ V การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของเพอมีเอทจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และสุดท้ายจะเป็นการเกิดฟาวลิงแบบการปกคลุมผิวหน้าเมมเบรนเป็นชั้นแตกเกิดขึ้น ตามความสัมพันธ์ระหว่าง t/V กับ V โดยหากเกิดขึ้นแค่รวดเร็วในระบบการกรองจะส่งผลให้ปริมาตรของเพอมีเอทเริ่มต้นในการเกิดเค้กต่ำ และอาจมีการอัดตัวสูง

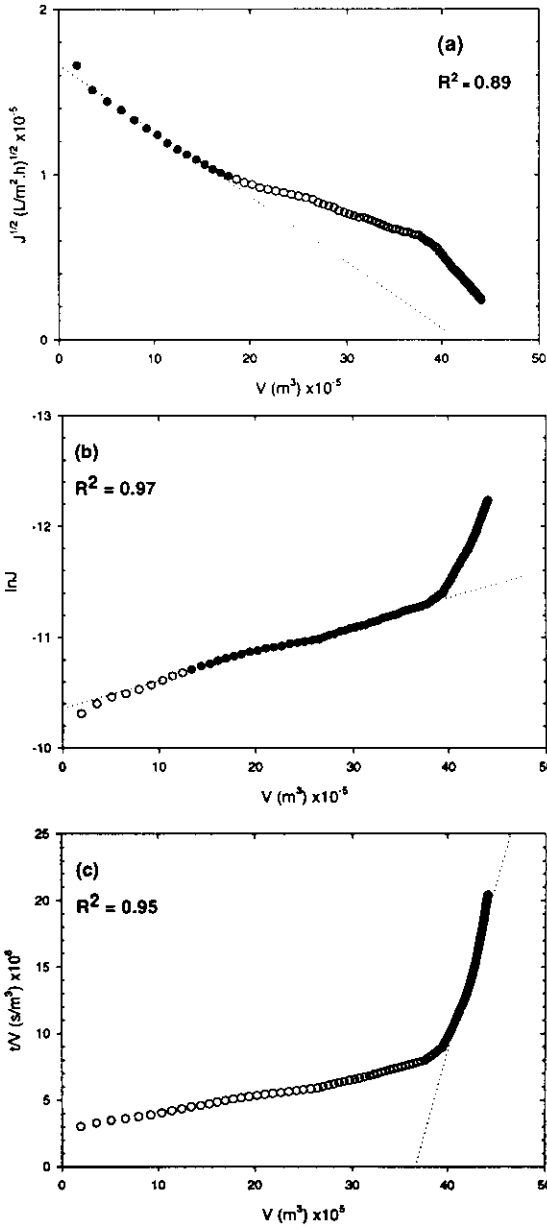


ภาพที่ 2-7 การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาว์ลิงของการกรองน้ำตาลโตนคด้วยเมมเบรน ขนาดรูพรุน $0.14 \mu m$ ความเร็วตามขวาง $3.5 m/s$, ความดันขับ $1.5 bar$, อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ C$ (a) SBM (b) IBM (c) CFM

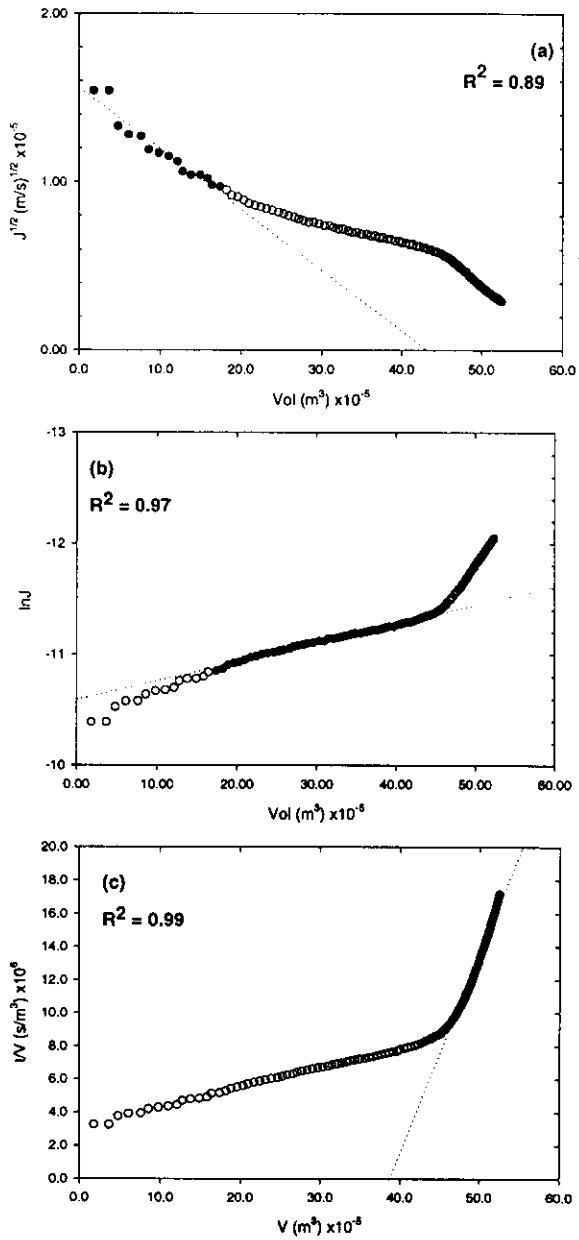


ภาพที่ 2-8 การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงของการกรองน้ำตาลโตนคด้วยเมมเบรน MWCO ขนาด 300 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar, อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ\text{C}$ (a) SBM (b) IBM (c) CFM

ฝ่ายหอสมุด
ศูนย์หนังสือ อรรถกรมย์



ภาพที่ 2-9 การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงของการกรองน้ำตาล โคนดด้วยเมมเบรน ขนาด MWCO 150 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar, อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ\text{C}$ (a) SBM (b) IBM (c) CFM



ภาพที่ 2-10 การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงของการกรองน้ำตาลโตนคด้วยเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar, อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ\text{C}$ (a) SBM (b) IBM (c) CFM

ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟที่มีความชันสูง ในการทดลองได้มีการศึกษาถึงปัจจัยของรูพรุนของเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวางของการดำเนินการกรองที่มีผลต่อการการเกิดฟาวลิงของน้ำตาล โตนด ได้ผลดังนี้

2.4.2.1 ผลของขนาดรูพรุนต่อกลไกการเกิดฟาวลิง

การศึกษาผลของขนาดรูพรุนของเมมเบรนต่อกลไกการเกิดฟาวลิงเมมเบรน เมื่อกรองน้ำตาลโตนดผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm , 300, 150 และ 50 kDa (ภาพที่ 2-7 ถึง 2-10) พบว่ากลไกการเกิดฟาวลิงในทุกขนาดรูพรุนสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะเด่นชัด คือแบบ SBM, IBM และ CFM โดยสามารถแบ่งการเกิดฟาวลิงได้ 3 ช่วง คือ ในช่วงแรก ($0 \leq t \leq 20$ นาที) จะเกิดการดูดซับอนุภาคที่บริเวณผนังในรูพรุนหรือ SBM เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กในช่วงที่สอง ($20 \leq t \leq 90$ นาที) จะเกิดกลไกฟาวลิงแบบ IBM และช่วงสุดท้าย ($t \geq 90$ นาที) เป็นการเกิดชั้นเค้กซึ่งเป็นไปตามแบบจำลอง CFM ในช่วงนี้เพอมีเอทพลັกซ์จะลดลงสู่สภาวะคงตัว

ในช่วงแรกของการกรองจะมีการสะสมของฟาวลิงตามแบบจำลอง SBM อย่างเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำตาลโตนดประกอบด้วยอนุภาคที่มีหลายขนาด จึงมีความเป็นไปได้ที่อนุภาคขนาดเล็กหรือโมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่และเกิดการดูดซับที่ผนังภายในรูพรุนอย่างรวดเร็วในระยะเวลาสั้นๆ ส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงและพลັกซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อจากนั้นจึงเริ่มมีการอุดตันในรูปแบบ IBM อย่างเด่นชัด โดยจะมีการสะสมทั้งภายในรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรนแบบซ้อนทับกันอย่างซ้ำๆ โดยใช้เวลานานกว่าในช่วงแรก ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของรูพรุนของเมมเบรนที่ยังไม่ถูกอุดตันลดลง มีการสะสมอนุภาคบนผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้นจนนำไปสู่การการอุดตันแบบ CFM ซึ่งในช่วงนี้ค่าพลັกซ์ลดลงช้ากว่าในช่วงแรกก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) (Kosvintsev *et al.*, 2002)

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bowen และคณะ (1995) ที่ศึกษากระบวนการไมโครฟิลเตรชันโดยใช้เมมเบรนที่ทำจากไนลอน (Nylon66) ขนาดรูพรุน 0.22 และ 0.45 μm ที่ความดัน 10 kPa กรองสารละลาย BSA ซึ่งพบว่าเมมเบรนทั้ง 2 ขนาดมีกลไกการเกิดฟาวลิงในรูปแบบเดียวกันคือ SBM IBM และ CFM โดยเริ่มจากการเกิดฟาวลิงแบบ SBM ช่วง 30 นาทีแรกตามด้วย IBM และ CFM ตามลำดับ

Jacob และคณะ (1998) เสนอว่ากลไกหรือลักษณะการเกิดฟาวลิงต่างๆ อาจเกิดขึ้นหลายลักษณะพร้อมๆ กัน โดยเริ่มจากการอุดตันภายในรูพรุนที่มีขนาดเล็กที่สุดก่อน จากนั้นจึงเกิดการสะสมของตัวถูกละลายภายในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ต่อมาอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนจะสะสมบนอนุภาคที่มีมาก่อนและมีบางส่วนเข้ามาอุดตันรูพรุนโดยตรง และสุดท้ายเกิดชั้นเค้กขึ้น แต่

อย่างไรก็ตามการอุดตันรูพรุนอาจไม่ได้เรียงลำดับเช่นนี้ก็ได้ ขึ้นกับการกระจายตัวของรูพรุนและขนาดของอนุภาคหรือโมเลกุลด้วย และอาจขึ้นกับสภาวะการดำเนินงานของระบบกรอง

จากวิเคราะห์ข้อมูลการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองของกลไกการเกิดฟาวลิง พบว่าโดยทั่วไปค่าคงที่ (k) ของแบบจำลอง SBM IBM และ CFM มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของรูพรุนเล็กลง ค่า k โดยทั่วไปมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าพลาซด์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสะสมของเพอมีอิต ผลการทดลองชี้ว่ามีการเกิดฟาวลิงแบบ SBM, IBM และ CFM ได้เร็วขึ้นเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนรูพรุนเล็กลง และอาจจะส่งผลให้ค่า R_{fr} และ R_{irr} ที่ได้ซึ่งมีค่าสูงขึ้น จากการศึกษาของ Marchese และคณะ (2003) พบว่าการเกิดฟาวลิงทั้งภายในและผิวหน้าเมมเบรน ทำให้มีค่าคงที่ที่แตกต่างกันไปในแต่ละแบบจำลอง โดยพบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีค่าคงที่ k_c ลดลง แต่ค่าคงที่ในแบบจำลอง SBM (k_s) มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ทั้งนี้อาจจะขึ้นกับขนาดอนุภาคของสารกรอง ชนิด และวัสดุเมมเบรน

ตารางที่ 2-4 ค่าคงที่แบบจำลองกลไกการเกิดฟาวลิงระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันน้ำตาลโคคที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็ว 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C

Poresize/ MWCO	Kinetic constants		
	k_s ($\times 10^5$)	k_i	k_c
0.14 μm	0.0133	0.0058	0.0360
300 kDa	0.0117	0.0182	0.1951
150 kDa	0.0167	0.0246	1.5954
50 kDa	0.0183	0.0498	0.8239

2.4.2.2 ผลของความดันขับต่อกลไกการเกิดฟาวลิง

จากการศึกษาผลของความดันต่อการเกิดฟาวลิงของน้ำตาลโคค เมื่อกรองผ่านเมมเบรนขนาด 0.14 μm และ 50 kDa ความดันขับ 0.5, 1.5 และ 3.0 bar ที่ความเร็วตามขวางคงที่ 3.5 m/s พบว่าระดับความดันไม่มีผลต่อลำดับกลไกการเกิดฟาวลิงของกระบวนการทั้ง 2 ขนาดรูพรุน โดยสามารถแบ่งได้ 3 ช่วงที่เด่นชัด คือแบบจำลอง SBM, IBM และ CFM ตามลำดับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Blanpain และ Lalande (1997) ที่การศึกษาการกรองเบียร์ด้วยเมมเบรนที่ทำจากโพลีคาร์บอนเนตด้วยเทคนิคนิวเคลีย ขนาดรูพรุน 0.2 μm ที่ความดันขับ 10 และ 100 kPa จากการทดลองสามารถทำนายแบบจำลองการเกิดฟาวลิงได้ 2 ลักษณะคือ SBM และ CFM โดยที่ความดัน

ต่ำจะส่งผลให้เข้าสู่กลไก CFM อย่างรวดเร็ว ผลจากการทดลองของ Hlavacek และ Bouchet (1993) พบว่าในกระบวนการกรอง BSA จะเกิดฟาวลิ่งตามแบบจำลอง IBM และ CFM เด่นชัดเมื่อมีความดันเพิ่มขึ้น เพราะเกิดการสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นมากกว่าการสะสมในรูพรุน

ค่าคงที่ (k) ของแบบจำลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2-5 พบว่าการเพิ่มความดันขั้วมีผลต่อค่าคงที่ของแบบจำลองต่างๆ โดยค่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความดัน

ตารางที่ 2-5 ค่าคงที่แบบจำลองกลไกการเกิดฟาวลิ่งระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.14 μm และอัลตราฟิลเตรชัน ขนาด MWCO 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$

Pore size/MWCO	TMP (bar)	Kinetic constants		
		ks ($\times 10^5$)	ki	kc
0.14 μm	1.0	0.0150	0.0265	0.4849
	1.5	0.0100	0.0058	0.0360
	3.0	0.0050	0.0062	0.0211
50 kDa	1.0	0.0320	0.0371	1.4180
	1.5	0.0183	0.0498	0.8239
	3.0	0.0216	0.0101	0.0631

2.5 ผลของความเร็วตามขวางต่อกลไกการเกิดฟาวลิ่ง

จากการศึกษาผลของความเร็วตามขวางต่อลักษณะการเกิดฟาวลิ่งในระหว่างกระบวนการกรองน้ำตาลโคคนดด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าการเพิ่มความเร็วตามขวางไม่ทำให้ลำดับกลไกการเกิดฟาวลิ่งเปลี่ยนแปลง กล่าวคือกลไกการเกิดฟาวลิ่งแบบ SBM, IBM และ CFM ตามลำดับ แต่ทำให้ค่าคงที่ของแบบจำลองทั้งหมดลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2-6 การค่าคงที่ k_s , k_i และ k_c ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วตามขวาง ทั้งนี้เพราะสามารถเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าของเมมเบรนกับอนุภาคที่ไปอุดตันหรือสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนและอาจส่งผลให้การอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรนเกิดขึ้นช้าลงด้วย Prádanos และคณะ (1996) ศึกษาการใช้โปรตีนโมเลกุลขนาดแตกต่างกัน (Lipase, α -Globulin และ BSA) พบว่าค่า k_s ลดลงเมื่อใช้ความเร็วสูงขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษากลไกการเกิดฟาวลิ่งของดินขาว พบว่าการเพิ่มความเร็วจึงส่งผลให้ค่าคงที่ของแบบจำลองลดลง (Al-Malack *et al.*, 2004)

ตารางที่ 2-6 ค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิงระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.14 μm และอัลตราฟิลเตรชัน MWCO ขนาด 50 kDa ที่ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50 ± 1 °C

Pore size/MWCO	CFV (m/s)	Kinetic constant		
		ks ($\times 10^5$)	ki	kc
0.14 μm	0.5	0.0400	0.4350	0.8671
	2.0	0.0100	0.0152	0.2506
	3.5	0.0133	0.0058	0.0360
50 kDa	0.5	0.0367	0.1836	6.3917
	2.0	0.0180	0.0251	0.9298
	3.5	0.0180	0.0498	0.8239

2.5 บทสรุป

จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ระหว่างการกรองและกลไกการเกิดฟาวลิงของน้ำตาลโคคนด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ฟลักซ์ของน้ำตาลโคคนดจะมีการลดลงกับเวลา พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์มีความแตกต่างกันเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนต่างกัน ที่ความดันและความเร็วตามขวางเดียวกันค่าฟลักซ์ก่อนสิ้นสุดการทดลองตัวเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงตัวสูงขึ้น

2. ค่า R_{fr} และ R_{tr} มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อขนาดรูพรุนของเมมเบรนเล็กลง การเพิ่มความดันทำให้ค่า R_{fr} และ R_{tr} สูงขึ้นขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วทำให้ค่า R_{fr} และ R_{tr} ลดลง โดยค่า R_{fr} สูงกว่าค่า R_{tr} ในทุกสภาวะการทดลองและทุกขนาดรูพรุนของเมมเบรน

3. กลไกการเกิดฟาวลิงในระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันน้ำตาลโคคนด เกิดจาก 3 กลไกหลักตามลำดับดังนี้ คือ การอุดตันภายในรูพรุน (SBM) การอุดรูพรุนของอนุภาค (IBM) และการเกิดเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน (CFM) โดยในช่วงแรกจะมีการอุดตันแบบ SBM ซึ่งเป็นการอุดรูพรุนโมเลกุลขนาดเล็กในผนังรูพรุนอย่างรวดเร็ว จะเกิดในระยะเวลาดั้งๆ IBM เกิดการอุดตัน จุดจับ และสะสมที่เกิดทั้งในรูพรุนและผิวหน้าไปพร้อมกัน และในช่วงสุดท้ายจะเกิดเป็นชั้นเค้กจึงมีกลไกการอุดตันเป็นไปตามแบบจำลอง CFM

4. ขนาดรูพรุน ระดับความดัน และระดับความเร็วตามขวางไม่มีผลต่อลำดับกลไก

การเกิดฟาวลิ่ง แต่ส่งผลกระทบต่อค่าคงที่ของแบบจำลองกลไกการเกิดฟาวลิ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดฟาวลิ่งตามกลไกต่างๆ

บรรณานุกรม

- Al-Malack, M.H., Bukhari, A.A. and Abuzaid, N.S. 2004. Crossflow microfiltration electrocoagulated kaolin suspension; fouling mechanism. *J. Membrane Sci.* 243: 143-153.
- Belfort, G., Davis, H.R. and Zydney, A. 1994. The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration. *J. Membrane Sci.* 96:1-58.
- Blanpain, P. and Lalande, M. 1997. Investigation of Fouling Mechanisms Governing Permeate Flux in the Crossflow Microfiltration of beer. *Filtr. and Separ.* 1065-1069.
- Bowen, W.R., Calvo, J.I. and Hernández, A. 1995. Step of Membrane Blocking in Flux Decline During Protein Microfiltration. *J. Membrane Sci.* 101: 153-163.
- Chen, V. 1998. Performance of partially permeable microfiltration membrane under low fouling conditions. *J. Membrane Sci.* 147: 265-278.
- Dal-Cin, M.M. McLellan, F., Striez, C.N., Tam, C.M., Tweddle, T.A. and Kumar, A. 1996. Membrane performance with a pulp mill effluent: Relative contributions of fouling mechanisms. *J. Membrane Sci.* 120: 273-285.
- de Barros, S.T.D., Andrade, C.M.G., Mendes, E.S. and Peres, L. 2003. Study of fouling mechanism in pineapple juice clarification by ultrafiltration. *J. Membrane Sci.* 215: 213-224.
- Chilukuri, V.V.S., Marshall, A.D. and Munro, P.A. 2001. Effect of sodium dodecyl sulphate and cross-flow velocity on membrane fouling during cross-flow microfiltration of lactoferrin solutions. *J. Chem. Eng. and Proc.* 40: 321-328.
- Grandison, A.S., Youravong, W. and Lewis M.J, 2000, Hydrodynamic factors effecting flux and fouling during ultrafiltration of skimmed milk. *Lait.* 80 (1): 165-174.
- Herrero, C., Prádanos, P., Calvo, J.I., Tejerina, F. and Hernández, A. 1997. Flux decline in protein microfiltration: Influence of Operative Parameters. *J. Colloid Interf. Sci.* 187: 344-351.
- Hermans, P.H. and Bredée, H.L. 1935. Zur Kenntnis der Filtrationsgesetze, *Rec. Trav, Chim. Pays-Bas.* 54: 680.
- Hermia, J. 1982. Constant pressure blocking filtration laws- application to power-law non-Newtonian fluids: *Trans IChemE.* 60: 183-187.

- Hlavacek, M. and Bouchet, F. 1993. Constant flowrate blocking laws and an example of their application to dead-end microfiltration of protein solutions. *J. Membrane Sci.* 82: 285-295.
- Hong, S., Faibish, R.S. and Elimelech, M. 1997. Kinetics of Permeate Flux Decline in Crossflow Membrane Filtration of Colloidal Suspensions. *J. Colloid Interf. Sci.* 196: 167-277.
- Jacob, J., Prádanos, P., Calvo, J.I., Hernández, A. and Jonsson, G. 1998. Fouling kinetics and associated dynamics of structural modifications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 138: 173-183.
- Jiffrin, M.Y., Gupta, B.B. and Chaibi, A. 1993. Effect of physical parameters on the microfiltration of wine on a flat polymeric membrane. *Chem. Eng. and Proc.* 32: 379-387.
- Kim, K.J., Fane, A.G., Fell, C.J.D. and Joy, D.C. 1992. Fouling mechanisms of membranes during protein ultrafiltration. *J. Membrane Sci.* 68: 79-91.
- Kosvintsev, S., Holdich, R.G., Cumming, I.W. and Starov, V.M. 2002. Modelling of dead-end microfiltration with pore blocking and cake formation. *J. Membrane Sci.* 208: 181-192.
- Lee, S-H., Chung, K-C., Shin, M-C., Dong, J-I., Lee, H-S. and Auh, K.. 2002. Preparation of ceramic membrane and application to crossflow microfiltration of soluble waste oil. *Materials Letters.* 52: 266-271.
- Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L. and Randall, R.J. 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.* 193: 265-275.
- Merin, U. and Shomer, I. 1999. Ultrafiltration Performance of heat-Treated Shamouti Orange [citrus sinensis (L.) Osbeck] Juice. *J. Agric. Food Chem.* 47: 2617-2622.
- Prádanos, P., Hernández, A., Calvo, J.I. Tejerina, F. 1996. Mechanisms of protein fouling in cross-flow UF through an asymmetric inorganic membrane. *J. Membrane Sci.* 114: 115-126.
- Rhittipairote, T, Youraovng, W and Wanichapichat, P. Clarification of sugar palm sap using a pilot scale microfiltration. The 2nd Regional symposium on membrane science and technology. 22nd-25th April, 2004. The University technology Malaysia, Jabor, Malaysia.
- Song, L. 1998. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: mechanisms and modelling of membrane fouling. *J. Membrane Sci.* 139: 183-200.
- Taddei, C., Aimar, P., Daufin, G. and Sanchez, V. 1998. Factors affecting fouling of inorganic membrane during sweet whey ultrafiltration, *Lait.* 68: 157-176.

- Vernhet, A., Cartalade, D. and Moutounet, M. 2003. Contribution to the understanding of fouling build-up during microfiltration of wines. *J. Membrane Sci.* 211: 357-370.
- Vladisavljević, G.T., Vukosavljević, P. and Bukvić, B. 2003. Permeate flux and fouling resistance in ultrafiltration of depectinized apple juice using ceramic membranes. *J. Food Eng.* 60: 241-247.
- Zhao, Y., Xing, W., Xu, N. and Shi, J. 2003. Hydraulic resistance in microfiltration of titanium white waste acid through ceramic membranes. *Sep. Purif. Technol.* 32: 99-104.