

บทที่ 3

ฟาวลิ่งและกลไกการเกิดฟาวลิ่งในระหว่างกระบวนการกรองน้ำตาลโตนด ด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

3.1 บทนำ

ข้อจำกัดของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน คือการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันและฟาวลิ่ง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการเมมเบรน คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าในส่วนกลางของสารละลายทั้งหมด ทำให้ความต้านทานการไหลของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถกำจัดออกหรือลดด้วยการปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการกรองและจัดเป็นฟาวลิ่งที่ผันกลับได้ ส่วนฟาวลิ่งที่ไม่สามารถผันกลับได้จะเป็นการเกิดทั้งภายในและภายนอกรูพรุน โดยทั่วไปสามารถกำจัดด้วยการใช้สารเคมีเท่านั้น

ความรุนแรงของฟาวลิ่ง และกลไกหรือตำแหน่งในการเกิดฟาวลิ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่นสภาวะการดำเนินการของกระบวนการ คุณสมบัติของสารป้อนและเมมเบรน สภาวะการดำเนินการของระบบกรอง มีผลสำคัญต่อระบบการกรองเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากการควบคุมสภาวะการกรองที่เหมาะสม จะลดหรือป้องกันการเกิดฟาวลิ่งได้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับความเร็วตามขวาง อุณหภูมิของสารป้อน เป็นต้น (Dal-Cin *et al.*, 1996)

โดยทั่วไปการดำเนินการของกระบวนการเมมเบรนด้วยความดันขับสูง จะทำให้ค่าฟลักซ์เริ่มต้นสูง แต่อย่างไรก็ตามค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเกิดฟาวลิ่ง ทั้งบนผิวหน้าและในรูพรุนของเมมเบรน ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์และการกักกันองค์ประกอบสารป้อนเพิ่มสูงขึ้น ในกระบวนการเมมเบรนแบบไหลขวาง การใช้ความเร็วตามขวางสูงสามารถลดการสะสมของฟาวลิ่ง ทำให้ลดความต้านทานการไหลของเพอมีเอทและลดความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิ่งได้ เพราะความเร็วตามขวางจะทำให้เกิดการแพร่กลับของอนุภาคเนื่องด้วยแรงกระทำต่ออนุภาคในรูปแบบต่างๆ ได้มากขึ้น โดยส่วนใหญ่ในการดำเนินกระบวนการเมมเบรน ดำเนินภายใต้สภาวะความดันขับที่ต่ำและความเร็วตามขวางสูง เพื่อลดการสะสมของฟาวลิ่ง (Song, 1998; Vernhet *et al.*, 2003)

ตารางที่ 3-1 การศึกษาฟาวลิงและกลไกการเกิดฟาวลิง

Table 3-1 Study of fouling and fouling mechanisms

Sample	Membrane system	Pore size /MWCO	Operation conditions	Method	Comment	Ref.
Marsh grape fruit	Hollow fiber polysulphone	10 kDa 30 kDa 100 kDa	TMP 25 psi Temp. 30°C Flow rate 1.2 L/min	empirical model	Higher fouling rate were observed for Marsh grape fruit extracts on 30 and 100 kDa	Snir <i>et al.</i> , 1996
Apple juice	Oxide zirconium tubular	30 kDa 50 kDa 300 kDa	TMP 100-400 kPa Temp. 20-55°C Flow rate 100-900ml/min	Resistance-in series model	Fouling resistance decrease with feed flow rate and increased with TMP	Vladislavljević <i>et al.</i> , 2003
Pineapple juice	Tubular ceramic (α -Al ₂ O ₃ /TiO ₂)	0.01 μm	TMP 2-6 bar Temp 30-50°C CFV 4.17 m/s	Blocking model	Complete blocking predominant fouling mechanism at the first 10-20 min, after this time cake filtration fouling mechanism dominant.	de Barros <i>et al.</i> , 2003
Wine	Tubular PES and PVP	0.1 μm	TMP 15, 50 and 100 kPa Temp. 20 °C CFV 2 m/s	Observed fouling resistance and Scanning electron microscopy (SEM)	Increasing TMP between 15 and 100 kPa only had a slight incidence on reversible fouling. SEM observations of the membrane surface, whatever the applied TMP organic matter deposited on the front face.	Vernhet <i>et al.</i> , 2003

การศึกษาถึงฟาวลิ่งและกลไกการเกิดฟาวลิ่งในกระบวนการเมมเบรน มีความสำคัญมาก เนื่องจากการเข้าใจถึงพฤติกรรมการอุดตันของเมมเบรนสามารถนำไปสู่การควบคุมฟาวลิ่งและยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน โดยการศึกษาวิจัยการเกิดฟาวลิ่งโดยใช้ตัวอย่างสารโปรตีน และวิธีการต่างๆ เช่น Kim และคณะ (1992) ศึกษาการเกิดฟาวลิ่งของโปรตีนโบวีนเซรัมอัลบูมิน (Bovine serum albumin, BSA) โดยการใช้กล้องแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) ตรวจสอบพฤติกรรมการสะสมของฟาวลิ่งเมื่อกรองผ่านเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟนขนาด 30, 100 และ 300 kDa ที่ความดัน 100 kPa ความเร็วในการกวน (stirring) 400 รอบต่อนาที (rpm) พบว่ามีการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากการเกิดชั้นคอนเซ้นเตรชัน โพลาริเซชัน ทำให้ค่าความต้านทานและการกักกันในระหว่างการกรองเปลี่ยนแปลงไป Belfort และคณะ (1994) ให้ความเห็นว่าการเกิดชั้นฟาวลิ่งในชั้นแรกติดกับผิวหน้าเมมเบรนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและฟาวลิ่งเกิดจากการอุดตันในรูพรุน (pore blocking) จะเป็นความต้านทานหลักในระหว่างการกรอง

Bowen และคณะ (1995) พบว่ามีตำแหน่งเกิดฟาวลิ่งต่างกันเมื่อรูพรุนเมมเบรนต่างกัน จากการศึกษาของ Prádanos และคณะ (1996) พบว่าเกิดฟาวลิ่งแบบอุดตันรูพรุนและการเกิดชั้นเค้กตามความแตกต่างของขนาดโมเลกุลและอนุภาค

Blanpain และ Lalande (1997) ศึกษาการเกิดฟาวลิ่งในการกรองผลิตภัณฑ์เบียร์ด้วยเมมเบรนชนิด โพลีคาร์บอเนตขนาดรูพรุน 0.22 μm ที่ความดันขับ 100 kPa และมีการกวนด้วยความเร็ว 800 rpm พบว่าในทุกลการทดลองเกิดการสะสมของฟาวลิ่งในลักษณะอุดตันและดูดซับในรูพรุนและการเกิดชั้นเค้ก

de Barros และคณะ (2003) ศึกษาการเกิดฟาวลิ่งของกระบวนการกรองน้ำสับปะรดด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน พบว่าเกิดฟาวลิ่งในรูปแบบการอุดตันรูพรุน (pore blocking) และการเกิดเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน (cake cover)

Al-Malack และคณะ (2004) ศึกษาการเกิดฟาวลิ่ง เนื่องจากความเข้มข้นของดินขาว 125, 250 และ 500 mg/l และความเร็วในระบบที่ความเร็ว 1.0-2.0 m/s พบว่าลักษณะการเกิดฟาวลิ่งเป็นแบบการอุดตันรูพรุนและการเกิดชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน

วัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาถึงผลของรูพรุน ความดันขับ และความเร็วตามขวางของเมมเบรนต่อความรุนแรงของการเกิดฟาวลิ่งและกลไกการเกิดฟาวลิ่งในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน

3.2 ทฤษฎีกลไกการเกิดฟาวลิ่ง

กลไกการเกิดฟาวลิ่งสามารถอธิบายได้หลายรูปแบบ โดยบางกรณีจะเน้นถึงกระบวนการสะสม โดยศึกษาถึงกลไก หรืออธิบายการสะสม หรือศึกษาพฤติกรรมการลดลงของ ฟลักซ์ กลไกการเกิด

ฟาวลิงได้มีการศึกษาครั้งแรกโดย Hermans และ Bredée (1935) ต่อจากนั้นได้มีการพัฒนาแก้ไขโดย Hermia (1982) เสนอรูปแบบการเกิดฟาวลิงทั้งที่เกิดภายในรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรน โดยมีเงื่อนไขอยู่ภายใต้สภาวะความดันคงที่ ของไหลมีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน (non-Newtonian) และเป็นระบบกรองแบบปิดตาย ในภายหลัง Prádanos และคณะ (1996) ได้มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายกลไกการเกิดฟาวลิงสำหรับระบบกรองแบบไหลขวาง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.) Complete Blocking Model (CBM)

แบบจำลองนี้มีสมมติฐานว่าโมเลกุลหรืออนุภาคที่มาถึงเมมเบรนจะเข้าไปอุดรูพรุน โดยทุกๆ โมเลกุลหรืออนุภาคมีส่วนร่วมในการอุดตันทางเข้ารูพรุนโดยไม่ซ้อนทับกัน ค่าพลาซซ์ของเพอมีเอทมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการดังนี้

$$\ln J_v = -k_b t + \ln J_{v,0} \quad [3.1]$$

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

2.) Intermediate Blocking Model (IBM)

แบบจำลองของ IBM แสดงถึงการอุดตันรูพรุนของอนุภาค โดยมีสมมติฐานว่าอนุภาคหนึ่งสามารถซ้อนทับบนอนุภาคอื่นได้ ค่าพลาซซ์เปลี่ยนแปลงตามสมการ

$$\ln J_v = -k_i V + \ln J_{v,0} \quad [3.2]$$

เมื่อ	J_v	=	พลาซซ์ของเพอมีเอทที่เวลาใดๆ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
	$J_{v,0}$	=	พลาซซ์ของเพอมีเอทเริ่มต้น ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
	V	=	ปริมาตรของเพอมีเอท (m^3)
	k_i	=	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง IBM (m^{-1})

3.) Standard Blocking Model (SBM)

แบบจำลองได้อธิบายถึงการอุดตัน/สะสม เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนมากโดยอนุภาคสามารถผ่านรูพรุนได้ แต่มีบางส่วนที่ตกค้างและถูกดูดซับด้วยเมมเบรนทำ

ให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนเพียงเท่านั้น และไม่เกิดขึ้นบางที่ผิวหน้าของเมมเบรน สมการที่เป็นไปตามแบบจำลองนี้สามารถเสนอได้คือ

$$J_v^{1/2} = J_{v,0}^{1/2} - \frac{k_s}{2} J_{v,0}^{1/2} A_0 V \quad [3.3]$$

เมื่อ	J_v	=	ฟลักซ์ของเพอมีเอทที่เวลาใดๆ ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$)
	$J_{v,0}$	=	ฟลักซ์ของเพอมีเอทเริ่มต้น ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$)
	V	=	ปริมาตรของเพอมีเอท (m^3)
	A_0	=	พื้นที่ตัดขวางของเมมเบรน (m^2)
	k_s	=	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง SBM (m^{-3})

4.) Cake Filtration Model (CFM)

เป็นแบบจำลองที่อธิบายการกรองอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ กันคือ ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน อนุภาคจะถูกสะสมและเกิดขึ้นค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน หรือ ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน อนุภาคขนาดเล็กจะสะสมภายในรูพรุนและต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดเป็นค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน จนกระทั่งเมมเบรนสามารถก้กกันโมเลกุลหรืออนุภาคขนาดเล็กไว้ สมการอธิบายแบบจำลองนี้คือ

$$\frac{t}{V} = \frac{k_c A_0^2}{2} V + \frac{1}{J_{v,0}} \quad [3.4]$$

เมื่อ	J_v	=	ฟลักซ์ของเพอมีเอทที่เวลาใดๆ ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$)
	$J_{v,0}$	=	ฟลักซ์ของเพอมีเอทเริ่มต้น ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$)
	t	=	เวลา (s)
	V	=	ปริมาตรของเพอมีเอท (m^3)
	A_0	=	พื้นที่ตัดขวางของเมมเบรน (m^2)
	k_c	=	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง CFM (s/m^6)

3.3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

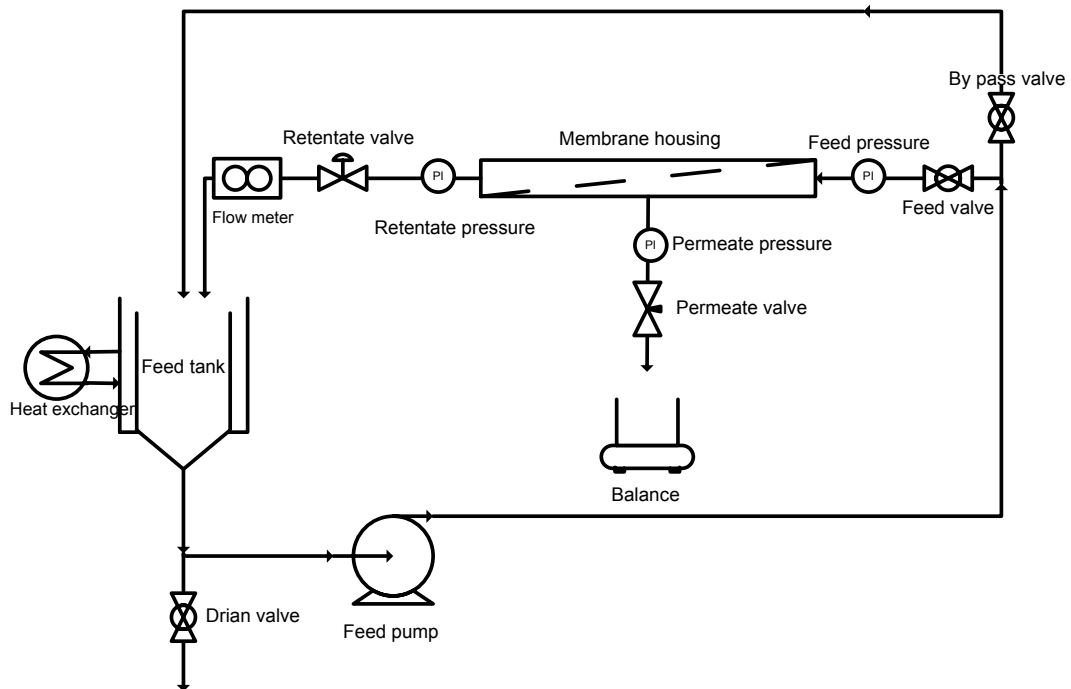
3.3.1 น้ำตาลโตนด

น้ำตาลโตนดที่มีการเติมไม้เคี่ยมในระหว่างการเก็บเกี่ยว ทำการเก็บตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 4 °C ตลอดจนขนส่ง และใช้ในการทดลองให้หมดภายใน 15 ชั่วโมง ก่อนการทดลองทำการกรองน้ำตาลโตนดผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกตะกอนและสิ่งปะปนออก จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 °C และนำเข้าสู่ระบบเมมเบรน

3.3.2 เมมเบรน และระบบเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

1) เมมเบรนแบบเซรามิก (Carbosep membrane, ZrO_2-TiO_2) ความยาวท่อ 42 เซนติเมตร (cm) เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (mm) โดยมีขนาดรูพรุน/MWCO 0.14 μm , 300, 150 และ 50 kDa ตามลำดับ มีพื้นที่การกรอง 0.01 ตารางเมตร (m^2)

2) ระบบเมมเบรน ชุดการกรองไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันระดับการทดลอง (Laboratory scale) ดำเนินการกรองแบบไหลขวาง ดังภาพที่ 3-1 น้ำตาลโตนดจะป้อนเข้าสู่ระบบกรองผ่านเมมเบรน ส่วนของรีเทนเททจะถูกป้อนกลับไปยังถังป้อน ส่วนของเพอมีเอทจะทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งสองตำแหน่ง มีการควบคุมความดันขับ และควบคุมอัตราการไหลในระบบด้วยการปรับวาล์วควบคุมความดัน และปรับความเร็วของปั๊มไปพร้อมๆ กัน ควบคุมอุณหภูมิของระบบโดยใช้ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 3-1 องค์ประกอบของระบบการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

Figure 3-1 Schematic diagram of microfiltration and ultrafiltration system

3.3.3 วิธีการทดลอง

1. ผลของขนาดรูพรุนเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวางต่อฟลักซ์ของเพอมีเอท การกักกันปริมาณโปรตีน และความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง

1.1 ศึกษาผลของรูพรุน/MWCOของเมมเบรน 4 ขนาด ได้แก่ $0.14\ \mu\text{m}$, 300, 150 และ 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง $3.5\ \text{m/s}$ ความดันขับ 1.5 bar

1.2 ศึกษาผลของของความดันขับ 3 ระดับ ได้แก่ 1.0, 1.5 และ 3.0 bar ที่ความเร็วตามขวาง $3.5\ \text{m/s}$ โดยใช้เมมเบรน 2 ขนาด คือ ไมโครฟิลเตรชัน ขนาดรูพรุน $0.14\ \mu\text{m}$ และอัลตราฟิลเตรชันขนาด MWCO 50 kDa

1.3 ศึกษาผลของความเร็วตามขวาง 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 2.0 และ $3.5\ \text{m/s}$ ความดันขับ 1.5 bar โดยใช้เมมเบรน 2 ขนาด คือไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน $0.14\ \mu\text{m}$ และอัลตราฟิลเตรชันขนาด MWCO 50 kDa

ดำเนินการกรอง ที่อุณหภูมิ $50 \pm 1\ ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 150 นาที

- ติดตามการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 นาทีโดยวิธีการชั่งน้ำหนักเพอมีเอท สุ่มตัวอย่างจากเพอมีเอทและรีเทนเทท ทำการตรวจวัดทุกๆ 10 นาที จนกระทั่ง

เสร็จสิ้นกระบวนการ

- นำตัวอย่างจากการสุ่มมาตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณโปรตีน โดยวิธี Lowry's (Lowry *et al.*, 1951) ภายใน 4 ชั่วโมง โดยทำการเก็บที่อุณหภูมิ $4\pm 1^{\circ}\text{C}$
- วัดความต้านทานการไหลของเมมเบรนทั้งก่อนและหลังการกรองที่สภาวะคงที่ของการกรอง (Jiratananon *et al.*, 1997)
- การศึกษาโดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

2. การศึกษาผลของขนาดรูพรุนเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวาง ต่อกลไกการเกิดฟาวลิง

2.1 ศึกษาผลของขนาดรูพรุน/MWCOของเมมเบรน 4 ขนาด ได้แก่ $0.14\ \mu\text{m}$, 300, 150 และ 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s ความดันขับ 1.5 bar

2.2 ศึกษาผลของของความดันขับ 3 ระดับ ได้แก่ 1.0, 1.5 และ 3.0 bar ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s โดยใช้เมมเบรน 2 ขนาด คือไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน $0.14\ \mu\text{m}$ และอัลตราฟิลเตรชันขนาด MWCO 50 kDa

2.3 ศึกษาผลของความเร็ว 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s ความดันขับ 1.5 bar โดยใช้เมมเบรน 2 ขนาด คือไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน $0.14\ \mu\text{m}$ และอัลตราฟิลเตรชันขนาด MWCO 50 kDa

- ศึกษาถึงกลไกการเกิดฟาวลิง ในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนดที่อุณหภูมิ $50\pm 1^{\circ}\text{C}$
- ติดตามการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 นาทีโดยวิธีการชั่งน้ำหนักเพอมีเอท
- นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงตามสมการ [3.1]-[3.4]
- การศึกษาโดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3. วิธีการวิเคราะห์ฟาวลิง (Jiratananon *et al.*, 1997)

การวิเคราะห์ความต้านทานสามารถแยกความต้านทานการไหลของเพอมีเอทเป็น

- i. ความต้านทานของเมมเบรน (R_m)
- ii. ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (R_{if})
- iii. ความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลารไรท์เซชัน (R_p)

ดังนั้นความต้านทานรวม (R_t) ในสมการที่ [3.5] ประกอบด้วย

$$R_t = R_m + R_f \quad [3.5]$$

โดย

$$R_f = R_{rf} + R_{irf} \quad [3.6]$$

ซึ่งความต้านทานแต่ละตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

1.) ความต้านทานรวม (R_t) สามารถคำนวณได้จากฟลักซ์ของสารละลายดังสมการที่

[3.7]

$$R_t = \frac{TMP}{\mu_p J} \quad [3.7]$$

เมื่อ

TMP = ความดันที่ให้กับระบบ (Pa)

J = ฟลักซ์ของสารละลาย ($m^3/m^2.s$)

μ_p = ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)

2.) ความต้านทานเมมเบรน (R_m) สามารถคำนวณได้จากฟลักซ์ของน้ำกรองจากสมการ

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_w J_w} \quad [3.8]$$

เมื่อ

TMP = ความดันที่ให้กับระบบ (Pa)

J_w = ฟลักซ์ของน้ำกรองก่อนการใช้งาน ($m^3/m^2.s$)

μ_w = ความหนืดของน้ำกรอง (Pa.s)

หลังจากการใช้งานแล้วจะทำการล้างเมมเบรนด้วยน้ำกรองเพื่อกำจัดชั้นโพลาไรซ์ ดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นโพลาไรซ์จึงถูกกำจัดออกไป ค่าความต้านทานที่เหลืออยู่คือความต้านทานเมมเบรน (R_m) และความต้านทานของฟาวลิง (R_{irf}) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ [3.9]

$$R_m + R_{irf} = \frac{TMP}{\mu_w J'_w} \quad [3.9]$$

เมื่อ

J'_w = ฟลักซ์ของน้ำกรองหลังจากที่ล้างเมมเบรนด้วยน้ำกรองแล้ว ($m^3/m^2.s$)

3.) ความต้านทานของชั้นโพลารไรซ์ (R_{pr}) สามารถคำนวณโดยการแทนค่าของสมการที่ [3.7] และ [3.9] ลงในสมการที่ [3.5 และ 3.6]

4.) ความต้านทานของฟาวลิ่ง (R_{fr}) สามารถคำนวณโดยการแทนค่าของ R_m จากสมการ [3.8] ลงในสมการ [3.9] จะได้ดังนี้

$$R_{irf} = \frac{TMP}{(\mu_w J'_w)} - R_m \quad [3.10]$$

วิธีการล้างเมมเบรน

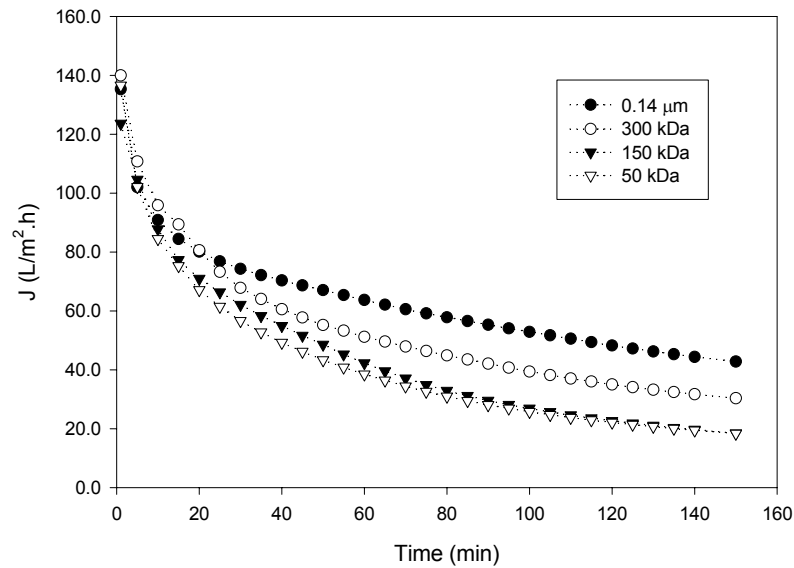
หลังจากกระบวนการกรองแต่ละครั้งทำการล้างเมมเบรนด้วยน้ำกรองที่อุณหภูมิห้อง เพื่อชะล้างสิ่งอุดตันออกและวิเคราะห์ความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่ง ต่อจากนั้นทำการล้างด้วยด่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.5% (v/v) พีเอช 11 ที่อุณหภูมิห้อง (~30°C) นาน 30 นาที และล้างด้วยกรดไนตริก (HNO₃) เข้มข้น 0.5% (v/v) พีเอช 2 ที่อุณหภูมิห้อง (~30 °C) นาน 30 นาที ระบบการล้างใช้น้ำกรองในการทำความสะอาดสารทำความสะอาด แล้วทำการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่สภาวะคงที่ และใช้โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ (potassium metabisulfite) เข้มข้น 0.5 % (w/v) วนทั้งระบบนาน 10 นาที ก่อนทำการปิดระบบการกรอง

3.4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

1. ผลของขนาดรูพรุนเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวางต่อฟลักซ์ของเพอมีเอท ปริสิทธิภาพการกักกัน และความต้านทานฟาวลิ่ง

1.1) ผลของขนาดรูพรุน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ของการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน/ MWCO 0.14 μm , 300, 150 และ 50 kDa ดังภาพที่ 3-2 พบว่าค่าฟลักซ์เฉลี่ยที่เวลา 150 นาที เท่ากับ 42.8, 30.4, 18.4 และ 18.3 $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ตามลำดับ โดยฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการสะสมเป็นชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่า สาเหตุของการลดลงของฟลักซ์ระหว่างการกรองด้วย ไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน คือปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลารไรเซชันและการเกิด ฟาวลิ่ง (Cheryan, 1986)



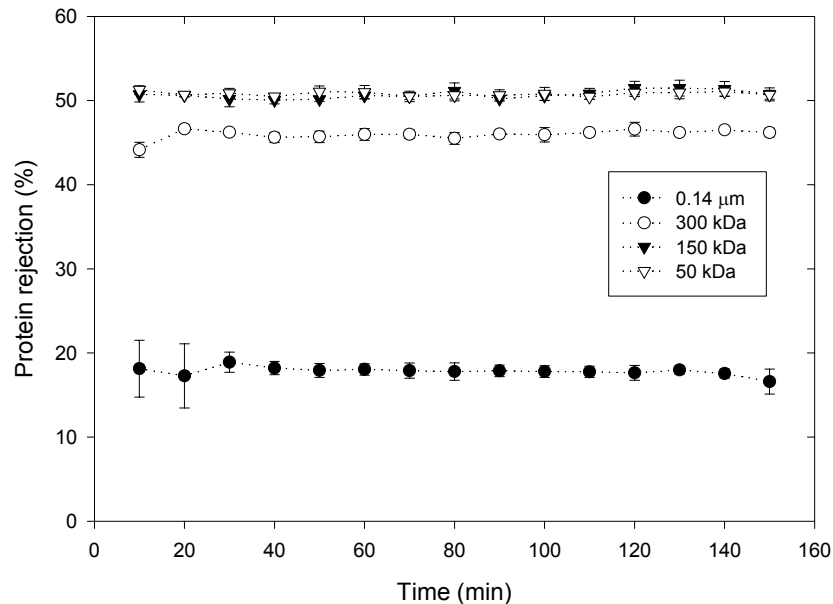
ภาพที่ 3-2 ผลของรูพรุน/MWCO ต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอท (ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 °C)

Figure 3-2 Effect of pore size/MWCO on permeate flux at TMP 1.5 bar, cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature. 50 ± 1 °C

เช่นเดียวกับ Jiffri และคณะ (1993) ติดตามและศึกษาการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของไวน์เมื่อกรองผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนต่างๆ คือ 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.5 และ 3.0 μm พบว่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก ซึ่งเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีค่าฟลักซ์ที่สูงกว่า เนื่องจากสารป้อนสามารถผ่านเมมเบรนได้ดีกว่า แต่ฟาวลิ่งที่เกิดเป็นฟาวลิ่งที่เกิดภายในรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรน จึงส่งผลให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว

ความสามารถในการกักกันโปรตีนในน้ำตาลโตนดของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน/MWCO แตกต่างกัน (ภาพที่ 3-3) พบว่าที่ขนาด MWCO 50, 150 และ 300 kDa มีค่าการกักกันโปรตีนเฉลี่ย 45-50% และเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm สามารถกักกันโปรตีนเฉลี่ย 17-20% โดยการกักกันโปรตีนเมื่อกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนขนาด MWCO 50 และ 150 kDa มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากเมื่อกรองด้วยเมมเบรน 300 kDa และ 0.14 μm ($p < 0.05$) จากข้อมูลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกักกันโปรตีนในน้ำตาลโตนดลดลง ค่าการกักกันโปรตีนในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนดค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาการกรองเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำตาลโตนด โดยน้ำตาลโตนดที่ผ่านเมมเบรนมีความใสมากขึ้น และความหนืดลดลง

นอกจากนี้อาจส่งผลต่อกลไกหรือความรุนแรงของการเกิดฟาวลิงในระหว่างการกรองเนื่องจากการดูดซับ/อุดตันเมมเบรน ทำให้เมมเบรนมีประสิทธิภาพลดลง



ภาพที่ 3-3 ผลของรูพรุน/MWCO ต่อการกักกัน โปรตีน ที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 °C

Figure 3-3 Effect of pore size/MWCO on protein rejection at TMP 1.5 bar, cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature 50 ± 1°C.

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Chen (1998) ระหว่างการกรองโปรตีน BSA ด้วยเมมเบรนขนาด 0.1, 0.2 และ 0.4 μm ที่ความดัน 5 kPa พบว่าเมื่อเมมเบรนมีรูพรุนเล็กลงความสามารถในการกักกันโปรตีนมีสูงขึ้น

การศึกษาความต้านทานของเมมเบรน และความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงเมื่อกรองน้ำตาลโตนด แสดงในตารางที่ 3-2 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบความต้านทานฟาวลิง R_{ff} และ R_{mf} ในแต่ละขนาดรูพรุนมีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงของเมมเบรนขนาดรูพรุน/MWCO 0.14 μm, 300, 150 และ 50 kDa มีค่า R_{ff} มีค่าเฉลี่ย 40.66×10^{12} , 51.57×10^{12} , 55.34×10^{12} และ $74.06 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ และค่า R_{mf} เฉลี่ย 5.33×10^{12} , 5.57×10^{12} , 8.13×10^{12} และ $9.42 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ จะเห็นว่าค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงเพิ่มขึ้นเมื่อเมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กลง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันและความเร็วเป็นตัวขับเคลื่อนสารป้อน ส่งผลให้เกิดการพอกพูนภาวมาสะสมและก่อตัวเป็นชั้นเล็กที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น การเกิดความ

ต้านทานแบบ R_{rf} ส่งผลต่อการลดลงของ ฟลักซ์ของเพอมีเอท และเป็นฟาวลิ่งที่เกิดบนผิวหน้าเมมเบรน มีการเกาะตัวระหว่างอนุภาคและเมมเบรนอย่างหลวมๆ จึงสามารถกำจัดออกได้ง่าย แต่กระนั้นก็มีผลต่อการกักกันองค์ประกอบทางเคมีกายภาพได้ ในขณะที่ฟาวลิ่ง R_{rf} เป็นปัญหาหลักในกระบวนการเมมเบรนและตัวเมมเบรนในระยะยาว เนื่องจากเป็นฟาวลิ่งที่ทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์อย่างรวดเร็วและการทำความสะอาดต้องใช้สารเคมีในการกำจัด

ตารางที่ 3-2 ผลของรูพรุน/MWCO ต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิ่ง ที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ\text{C}$.

Table 3-2 Effect of pore size/ MWCO on membrane resistance and fouling resistance at TMP 1.5 bar, cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature $50 \pm 1^\circ\text{C}$.

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

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

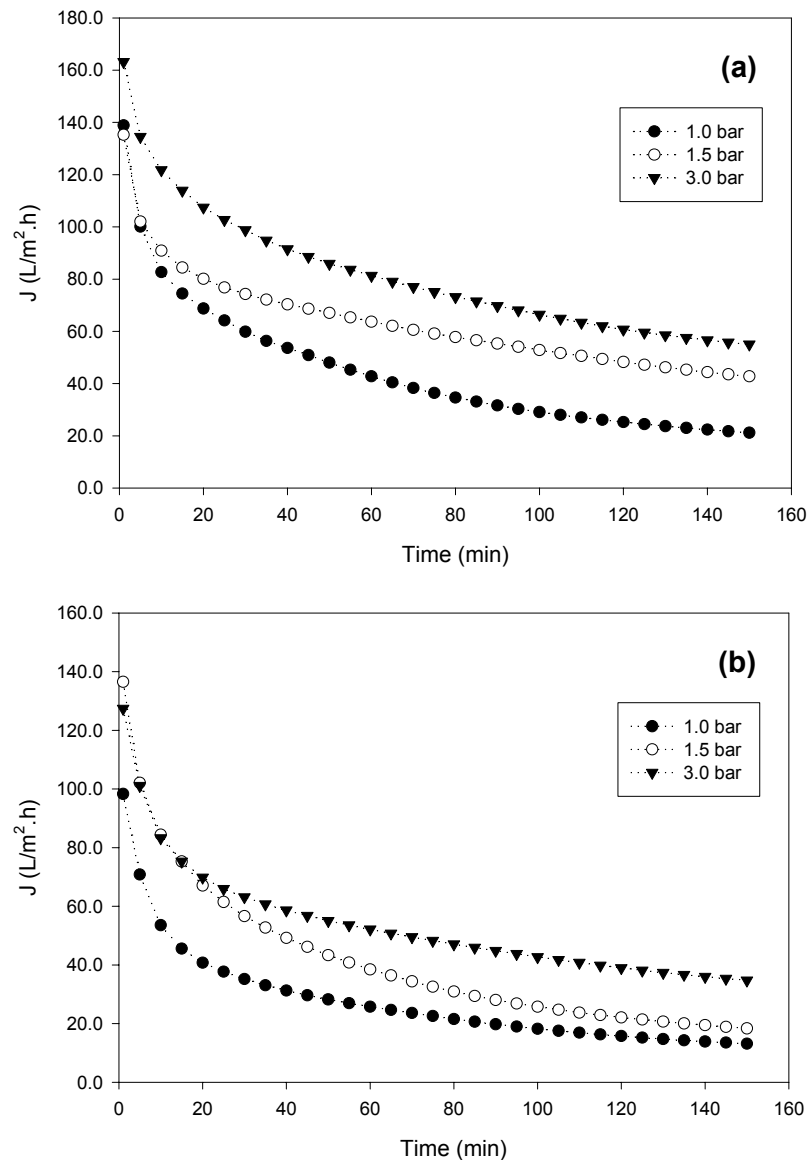
^{a-c}, Means within row with the same superscript are not significantly different at $p > 0.05$

^{ns}, Non significantly different at $p > 0.05$

1.2) ผลของความดันขับ

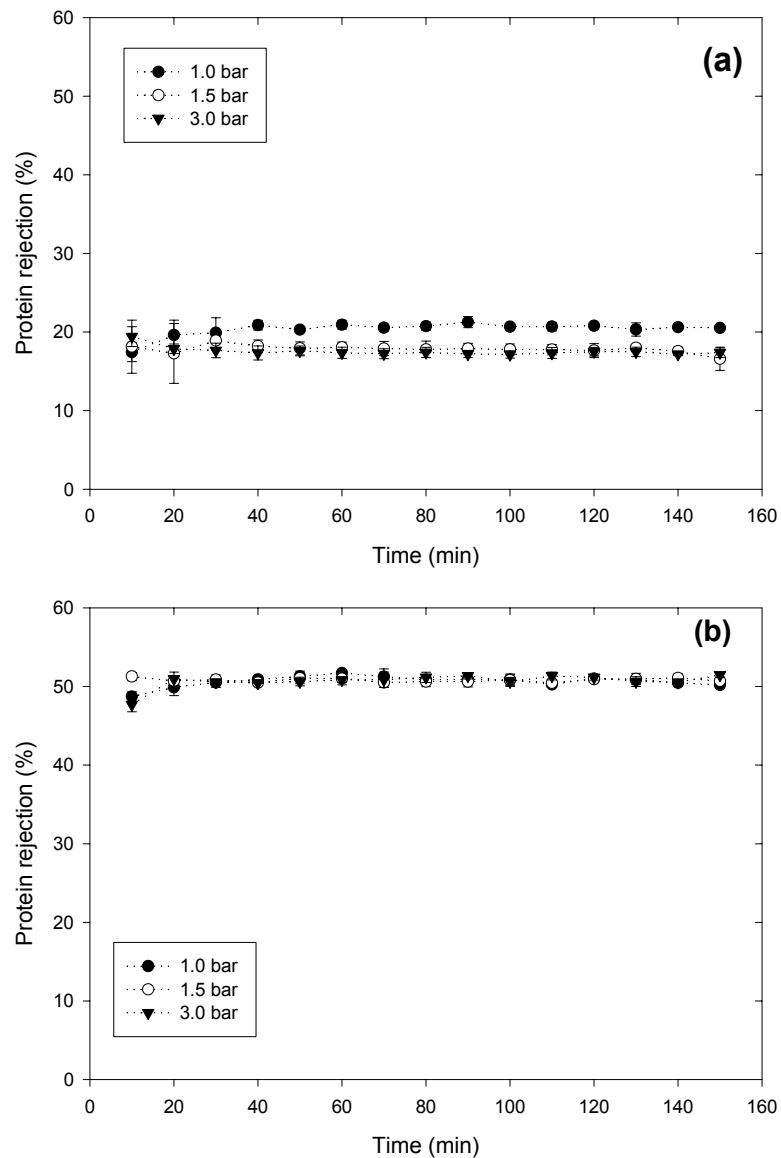
จากการศึกษาผลของความดันขับต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของน้ำตาลโตนด พบว่าค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรกของการกรอง (20 นาที) เนื่องจากผลของการเกิดคอนเซนเตรชัน โพลารไรเซชันและฟาวลิ่ง และเริ่มฟลักซ์เข้าสู่สภาวะคงตัว แสดงว่าความต้านทานการไหลเริ่มคงที่ จากภาพที่ 3-4 พบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำตาลโตนดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันขับ (1.0-3.0 bar) โดยที่เวลานาทีที่ 150 จะมีค่าฟลักซ์เท่ากับ 21.2, 42.8 และ 55.0 $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ เมื่อผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm ที่ความดันขับ 1.0, 1.5 และ 3.0 bar ตามลำดับ และเมื่อผ่านเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa มีค่าฟลักซ์เท่ากับ 13.2, 18.4 และ 34.8 $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ที่ความดันขับ 1.0, 1.5 และ 3.0 bar ตามลำดับ การเพิ่มความดันขับเป็นการเพิ่มแรงดันขับให้ตัวทำละลายผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้มากขึ้น และในการทดลองครั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์อยู่ในช่วงที่ขึ้นกับความดันขับ เมื่อมีการเพิ่มความดันขับจะ

มีค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นตามสมการที่ [1.1] ค่าฟลักซ์สูงขึ้น ทำให้อนุภาค/โมเลกุลถูกพามาสู่วิวน้ำเมมเบรนมากขึ้นกลายเป็นชั้นเคลือบที่มีความหนาหรืออัดตัวแน่น และเป็นการเพิ่มความต้านทานการไหล และที่ความดันขั้ต่ำๆ จะสามารถเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันได้มากและอัตราการแพร่กลับของตัวถูกละลายเกิดได้ช้า ดังนั้นฟลักซ์จึงเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าที่ความดันสูง (Hong *et al.*, 1997)



ภาพที่ 3-4 ผลของความดันขั้ต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอท (a) $0.14 \mu m$ (b) 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ C$

Figure 3-4 Effect of transmembrane pressure on changes permeate flux (a) $0.14 \mu m$ (b) 50 kDa at cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature $50 \pm 1^\circ C$.



ภาพที่ 3-5 ผลของความดันขับต่อค่าการกักกันโปรตีน (a) 0.14 μm (b) 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$

Figure 3-5 Effect of transmembrane pressure on protein rejection (a) 0.14 μm (b) 50 kDa at cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$.

เนื่องจากการเกิดฟาวลิงในระหว่างกระบวนการกรอง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการคัดเลือกรวมทั้งประกอบในน้ำตาลโดนด ผลของความดันขับมีความสัมพันธ์กับการกักกันของโปรตีนแสดงดังภาพที่ 3-5 พบว่าความดันขับไม่มีผลต่อการกักกันโปรตีนเมื่อมีการกรองน้ำตาลโดนด ด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุนเท่ากัน และที่ความเร็วตามขวางระดับเดียวกัน ($p > 0.05$) โดยการกรอง

น้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa พบว่าค่าการกักกันโปรตีนอยู่ในช่วง 15-20% และ 35-65% ตามลำดับ เห็นได้ว่าการกักกันของเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa มีการกักกันโปรตีนสูงกว่าเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm ทั้งนี้เพราะการเพิ่มความดันขับ ทำให้ชั้นเค้กหรือฟาวลิ่งอัดตัวแน่นมากขึ้นเปรียบเสมือนเมมเบรนอีกชั้น (secondary filter) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการคัดเลือกโปรตีนผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้น ทำให้โปรตีนถูกกักกันไว้ในส่วนของรีเทนเททสูงขึ้นไป จากกระบวนการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa มีแนวโน้มการกักกันโปรตีนเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและแสดงว่ามีฟาวลิ่งและชั้น โพลาริซเกิดที่ผิวหน้าเมมเบรน จึงมีค่าการกักกันสูงขึ้นไป เมื่อดำเนินการกรองระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าการกักกันมีค่าค่อนข้างคงที่อาจเป็นเพราะมีฟาวลิ่งจำนวนน้อยที่ผันกลับได้ (Zokaee *et al.*, 1999; Gan, 2001)

จากผลการลดลงของฟลักซ์และการกักกันโปรตีนในระหว่างการกรอง ส่งผลให้ความต้านทานของเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไป โดยความต้านทานมีความสัมพันธ์กับความดันขับ ดังตารางที่ 3-3 พบว่าความต้านทาน R_{tr} และ R_{irf} ของเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ความดันขับในระบบเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) แต่ในการวิเคราะห์หาค่าความต้านทานฟาวลิ่งของเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa พบว่าค่าความต้านทาน R_{tr} และ R_{irf} ไม่มีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 3-3 ผลของความดันขับต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิ่งเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ MWCO 50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 °C

Table 3-3 Effect of transmembrane pressure on membrane resistance and fouling resistance at cross-flow velocity 3.5 m/s, temperature 50 ± 1 °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_m		1.61* ± 0.13			1.76 ± 0.08	
R_{irf}	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_{tr}	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 determination \pm standard deviation

^{a-c}, Means within row with the same superscript are not significantly at $p > 0.05$

^{ns} different at the $p > 0.05$

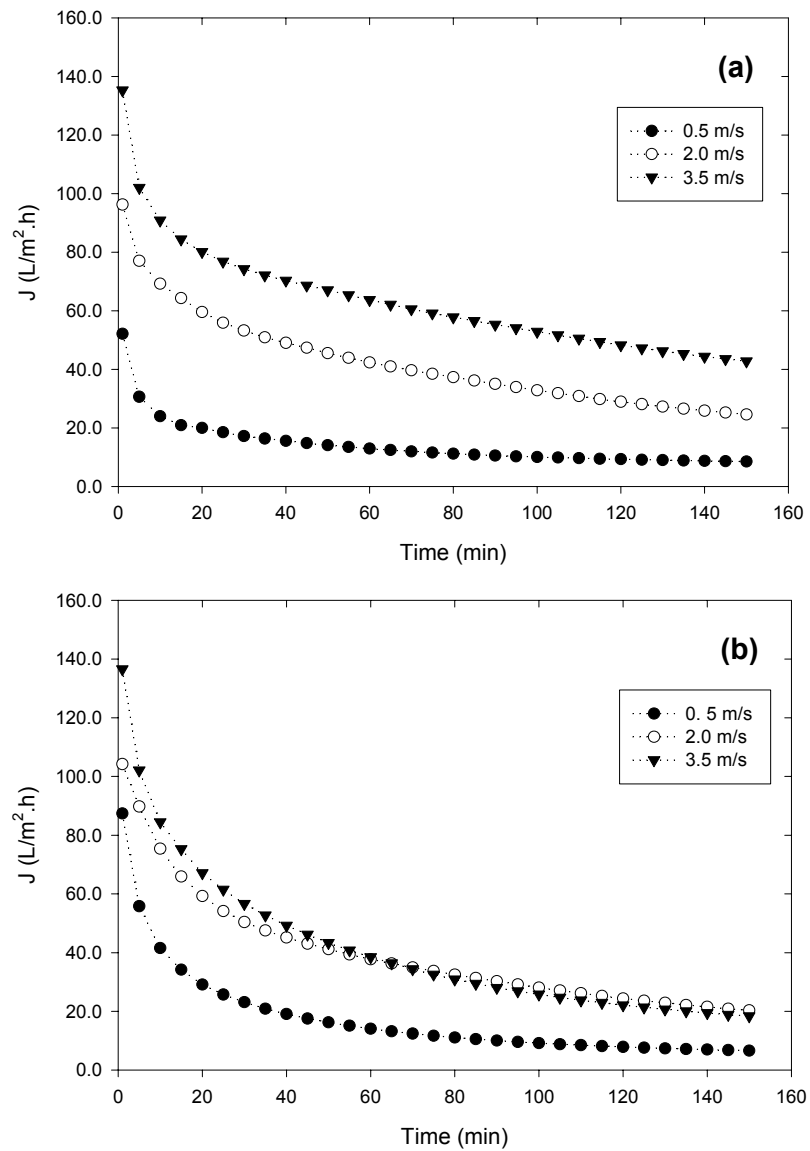
ความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับการรายงานของ Jiratananon และ Chanachai (1996) พบว่าความต้านทานเมมเบรน (R_m) มีค่าคงที่ แต่ค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิง R_{fp} , R_{ft} และ R_f มีค่าเพิ่มขึ้น ในระหว่างการกรองน้ำเสาวรศด้วยเมมเบรนแบบโพลีซัลโฟน ขนาด MWCO 30 kDa ที่อุณหภูมิ 30°C

การเพิ่มความดันขับจะมีผลให้ชั้นเจลหนาและอัดตัวแน่นมาก รูพรุนหรือช่องว่างในชั้นฟาวลิงลดลงจึงมีความต้านทานของเค้ก (R_{fk}) เพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้การสะสมของชั้นเค้กก็ขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่นอุณหภูมิในการดำเนินการกรอง ชนิดเมมเบรนและสารป้อนอีกด้วย (Vernhet *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2003)

1.3) ผลของความเร็วดำเนินการ

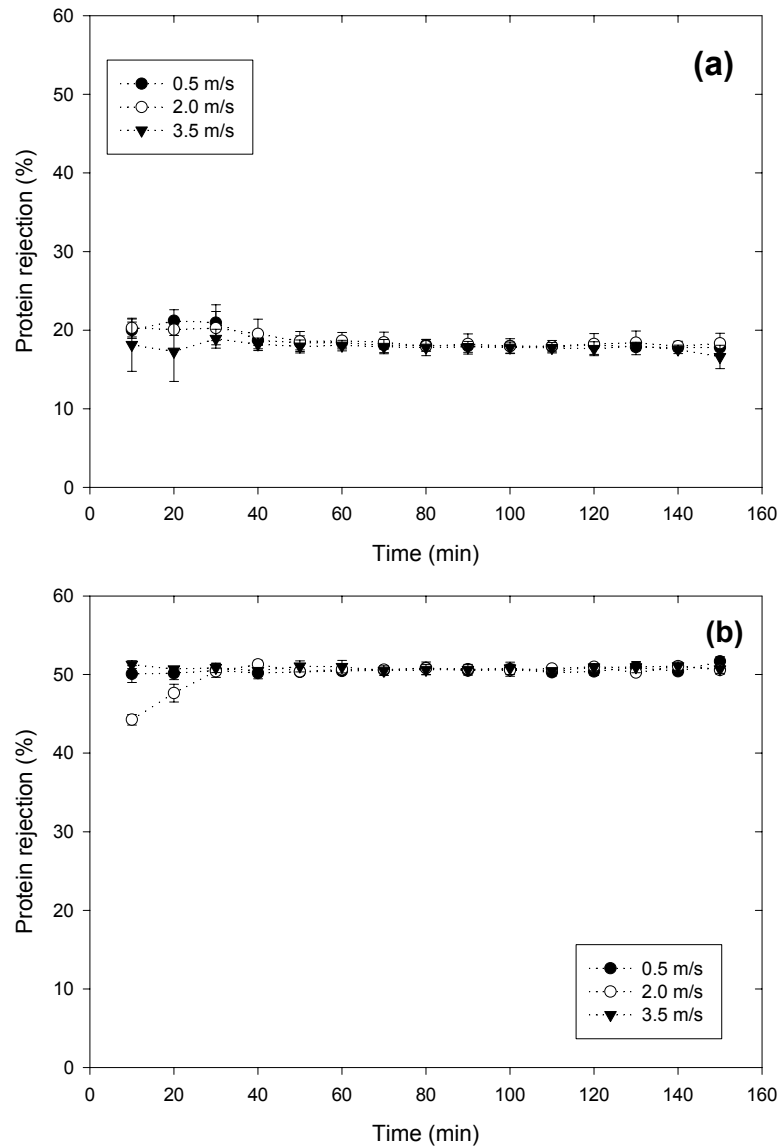
จากการศึกษาผลของความเร็วดำเนินการต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ (ภาพที่3-6) พบว่าเมื่อมีความเร็วดำเนินการสูงขึ้น จะทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าฟลักซ์เฉลี่ยที่เวลา 150 นาที เท่ากับ 8.5, 24.6 และ 42.8 L/m².h เมื่อกรองด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μ m ที่ความเร็วดำเนินการ 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s ตามลำดับ ส่วนเมมเบรนขนาด MWCO 50 kDa มีค่า ฟลักซ์เท่ากับ 6.6, 20.3 และ 18.3 L/m².h ที่ความเร็วดำเนินการ 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s ตามลำดับ การใช้ความเร็วดำเนินการเมมเบรนสูงขึ้น ทำให้เกิดความเค้นเฉือนสูงขึ้น เป็นผลต่อการแปรกลับของอนุภาคจากผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น ลดการยึดเกาะระหว่างเมมเบรนและอนุภาค และอนุภาคกับอนุภาคด้วยกันเอง ฟาวลิงที่เกิดลดน้อยลง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์มีค่าสูงกว่าเมื่อดำเนินการกรองด้วยความเร็วดำเนินการต่ำ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Lee และคณะ (2002) ให้ความเห็นว่าการใช้ความเร็วสูงในการดำเนินการกรองสามารถช่วยลดการสะสมของชั้นฟาวลิง

ผลของความเร็วดำเนินการต่อการการกักกันโปรตีนดังแสดงในภาพที่ 3-7 พบว่าการกักกันโปรตีนที่ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ($p>0.05$) โดยค่าการกักกันโปรตีนอยู่ในช่วง 15-22% ในกรณีการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.14 μ m และ 50-52% เมื่อกรองด้วยเมมเบรน ขนาด MWCO 50 kDa หากพิจารณาแนวโน้มของการกักกันโปรตีนพบว่าเมื่อความเร็วดำเนินการเพิ่มขึ้นการกักกันโปรตีนมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการแปรกลับของโมเลกุลและอนุภาคที่สะสมบนผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นและเป็นการลดการสะสมของฟาวลิง ความหนาของชั้นฟาวลิงลดลง อีกทั้งเป็นการเพิ่มพื้นที่การกรองมากขึ้น (D'Souza and Wiley, 2004)



ภาพที่ 3-6 ผลของความเร็วดำรงต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอท (a) 0.14 μm (b) 50 kDa ที่ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$

Figure 3-6 Effect of cross-flow velocity on changes permeate flux (a) 0.14 μm (b) 50 kDa at TMP 1.5 bar, temperature 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 3-7 ผลของความเร็วตามขวางต่อค่ากักกัน โปรตีน (a) 0.14 μm (b) 50 kDa ที่ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50±1 °C

Figure 3-7 Effect of cross-flow velocity on protein rejection (a) 0.14 μm (b) 50 kDa at TMP 1.5 bar, temperature 50±1°C.

จากการศึกษาผลของความเร็วตามขวางต่อความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงในกระบวนการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความเร็วตามขวาง 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3-4 พบว่าที่ความเร็วสูงมีความต้านทานฟาวลิง R_{ff} และ R_{ff} มีค่าลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ตารางที่ 3-4 ผลของความเร็วตามขวางต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิง
เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ MWCO 50 kDa ที่ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ $50\pm 1^\circ\text{C}$

Table 3-4 Effect of cross-flow velocity on membrane resistance and fouling resistance of
membrane pore size 0.14 μm and MWCO 50 kDa at TMP 1.5 bar, temperature $50\pm 1^\circ\text{C}$.

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_{irf}	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_{rf}	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}, Means within row with the same superscript are not significantly different at the $p>0.05$

ที่ความเร็วตามขวางต่ำ (0.5 m/s) มีความต้านทาน R_{rf} สูงกว่าที่ความเร็วตามขวางสูง (3.5 m/s) ประมาณ 1-2 เท่า เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและเกิดฟาวลิงภายในรูพรุนและ/หรือผิวหน้าเมมเบรน อย่างรวดเร็ว เพราะดำเนินการกรองอยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ แต่ในทางกลับกันที่ความเร็วตามขวางสูง (3.5 m/s) น้ำตาลโดนดเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนทำให้เกิดการพาและลากอนุภาคให้เคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ กลับไปยัง bulk เนื่องจากเกิดแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนและผิวอนุภาค สามารถลดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ (Tadei *et al.*, 1998) ส่วนค่าความต้านทาน R_{irf} ซึ่งเป็นความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงที่ไม่ผันกลับมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้ความเร็วเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดฟาวลิงรูปแบบนี้จะเป็นฟาวลิงที่อยู่ใกล้ชิดกับผนังรูพรุน และผิวหน้าเมมเบรนมาก และมีแรงกระทำยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับเมมเบรนสูง อัตราการไหลที่สูงจึงอาจไม่มีผลต่อความต้านทาน R_{irf} มากนัก (Merin and Shomer, 1999; Chilukuri *et al.*, 2001)

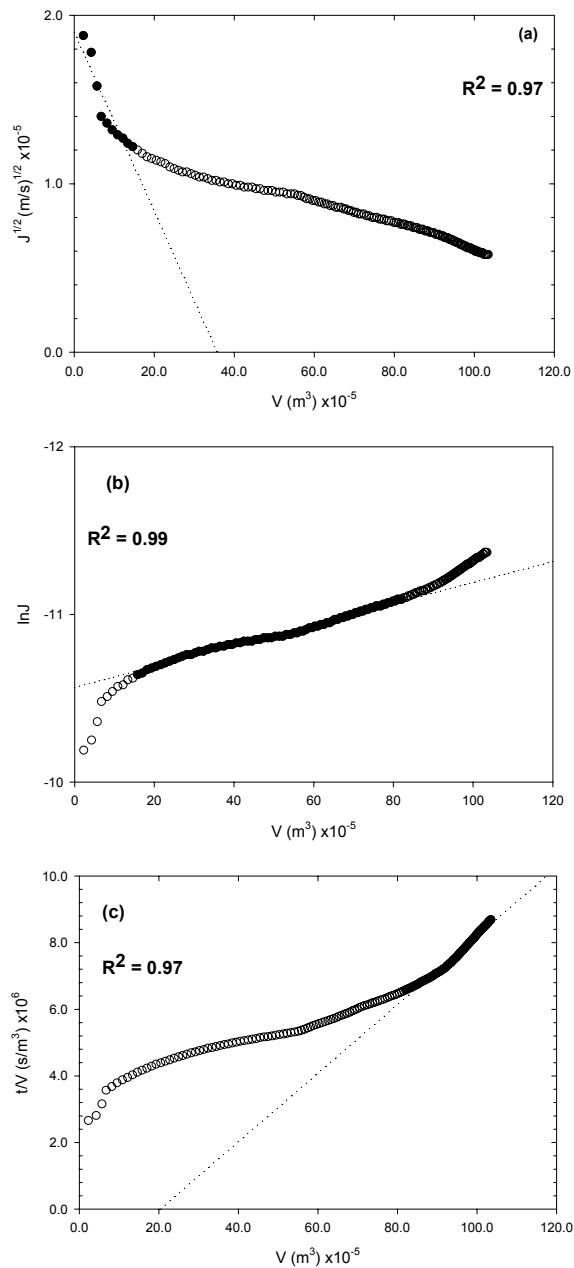
เช่นเดียวกับการศึกษาของ Vladisavljević และคณะ (2003) ของกระบวนการกรองน้ำแอปเปิ้ลด้วยเมมเบรนชนิดท่อเซรามิกขนาด MWCO 300, 50 และ 30 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 100-900 ml/min พบว่า ความต้านเนื่องจากฟาวลิง (R_p) มีค่าลดลงเมื่อความเร็วของสารป้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงคือความต้านทานแบบผันกลับได้ (R_{rf})

2. ผลของขนาดรูพรุนเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวาง ต่อกลไกการเกิดฟาวลิง

เนื่องจากการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการกรองน้ำตาลโดนด ไม่สามารถบ่งบอกถึงกลไกหรือลักษณะของฟาวลิงที่แท้จริงได้ว่าเกิด

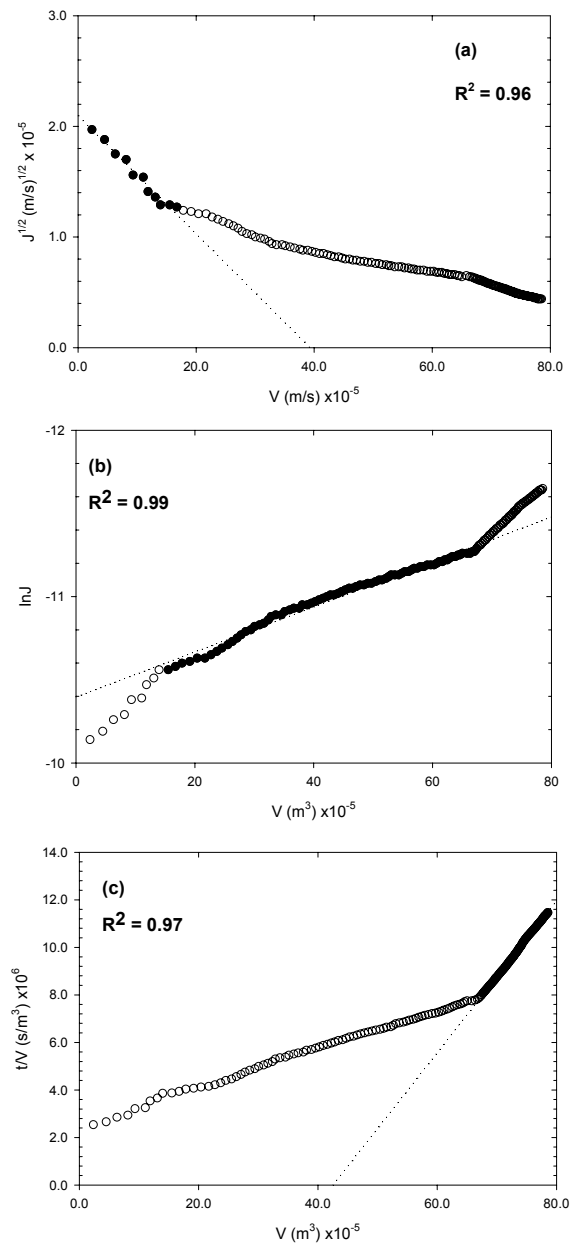
การอุดหนุนในลักษณะใด ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลดลงของฟลักซ์ สัมพันธ์กับการเกิดฟาวลิ่งในระหว่างกระบวนการเมมเบรน โดยใช้แบบจำลองการเกิดฟาวลิ่ง ตามการศึกษาแบบจำลองกลไกการเกิดฟาวลิ่งของ Prádanos และคณะ (1996) โดยแบบจำลองดังกล่าวอธิบายถึงการลดลงของฟลักซ์ว่าเป็นผลมาจากการอุดหนุน/สะสมบนผิวและภายในรูพรุนของเมมเบรนในลักษณะต่างๆ กัน การวิเคราะห์ข้อมูลสามารถแสดงความสัมพันธ์ตามสมการ [3.1] – [3.4]

ในการศึกษาได้นำข้อมูลมาพล็อตตามความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นในสมการแต่ละแบบจำลองที่ช่วงเวลาต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดและนำค่าดังกล่าวมาหาค่าคงที่ของแบบจำลองการเกิดกลไกฟาวลิ่ง โดยตัดสินจากค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear regression coefficient, R^2) ดังในตัวอย่างภาพที่ 3-8 ถึง 3-11



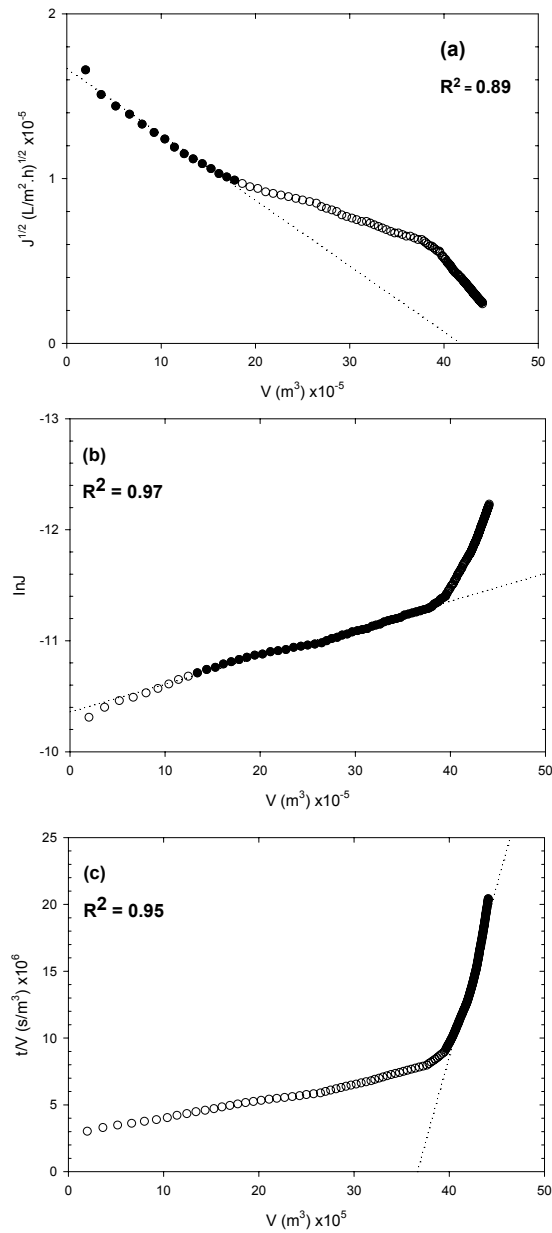
ภาพที่ 3-8 การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงของการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรน
รูพรุนขนาด $0.14 \mu\text{m}$ ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s , ความดันขับ 1.5 bar ,
อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ\text{C}$ (a) SBM (b) IBM (c) CFM

Figure 3-8 Fouling mechanisms analysis of sugar palm sap during cross-flow filtration membrane
pore size $0.14 \mu\text{m}$ at crossflow velocity 3.5 m/s , TMP 1.5 bar , temperature $50 \pm 1^\circ\text{C}$
(a) SBM (b) IBM (c) CFM



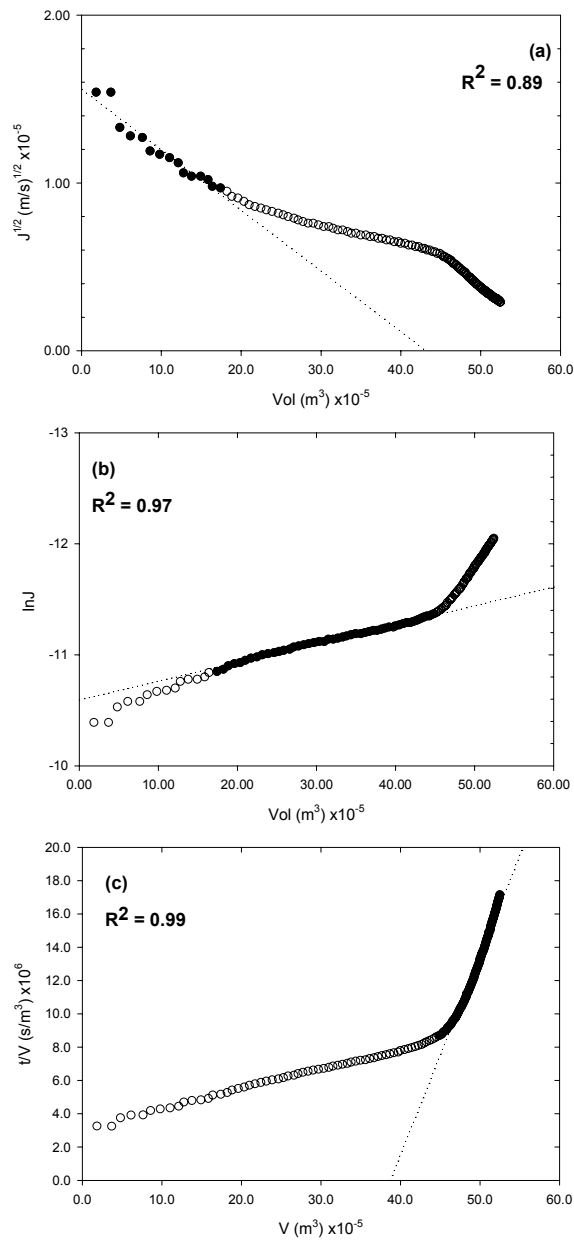
ภาพที่ 3-9 การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงของการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรน MWCO ขนาด 300 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar, อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ\text{C}$
 (a) SBM (b) IBM (c) CFM

Figure 3-9 Fouling mechanisms analysis of sugar palm sap during cross-flow filtration membrane MWCO 300 kDa at crossflow velocity 3.5 m/s, TMP 1.5 bar, temperature $50 \pm 1^\circ\text{C}$
 (a) SBM (b) IBM (c) CFM



ภาพที่ 3-10 การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงของการกรองน้ำตาลโตนคด้วยเมมเบรน MWCOขนาด 150 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar, อุณหภูมิ $50 \pm 1^\circ\text{C}$ (a) SBM (b) IBM (c) CFM

Figure 3-10 Fouling mechanisms analysis of sugar palm sap during cross-flow filtration membrane MWCO 150 kDa at crossflow velocity 3.5 m/s, TMP 1.5 bar, temperature $50 \pm 1^\circ\text{C}$ (a) SBM (b) IBM (c) CFM



ภาพที่ 3-11 การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิงของการกรองน้ำตาลโตนคด้วยเมมเบรน MWCO ขนาด 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar, อุณหภูมิ 50±1°C (a) SBM (b) IBM (c) CFM

Figure 3-11 Fouling mechanisms analysis of sugar palm sap during cross-flow filtration membrane MWCO 50 kDa at crossflow velocity 3.5 m/s, TMP 1.5 bar, temperature 50±1°C (a) SBM (b) IBM (c) CFM

จากภาพที่ 3-8 ถึง 3-11 แสดงการวิเคราะห์กลไกตามแบบจำลองต่างๆ ในการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุนต่างๆ ที่ความดันขับ 1.5 bar และความเร็วตามขวาง 3.5 m/s ในช่วงแรกสามารถอธิบายกลไกการเกิดฟาว์ลิงด้วยแบบจำลอง SBM ตามความสัมพันธ์ของ $J^{1/2}$ กับ V โดยกลไกดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ทำให้ปริมาตรของเพอมีเอทที่ได้นั้นมีค่าต่ำและสิ้นสุดอย่างรวดเร็ว ต่อมาเป็นแบบการปิดกั้นบางส่วนของรูพรุน โดยสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง IBM โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับ V การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเพอมีเอทจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และสุดท้ายจะเป็นการเกิดฟาว์ลิงแบบการปกคลุมผิวหน้าเมมเบรนเป็นชั้นเค้กเกิดขึ้น ตามความสัมพันธ์ระหว่าง t/V กับ V โดยหากเกิดขึ้นเร็กรวดเร็วในระบบการกรองจะส่งผลให้ปริมาตรของเพอมีเอทเริ่มต้นในการเกิดเค้กต่ำ และอาจมีการอัดตัวสูง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟมีความชันสูง

ในการทดลองได้มีการศึกษาถึงปัจจัยของรูพรุนของเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวางของการดำเนินการกรองที่มีผลต่อการเกิดฟาว์ลิงของน้ำตาลโตนด ได้ผลดังนี้

2.1 ผลของรูพรุน/MWCOต่อกลไกการเกิดฟาว์ลิง

การศึกษาผลของขนาดรูพรุนของเมมเบรนเพื่อทำนายกลไกการเกิดลักษณะอุดตันเมมเบรน เนื่องจากฟาว์ลิง เมื่อกรองน้ำตาลโตนดผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน/MWCO 0.14 μm , 300, 150 และ 50 kDa (ภาพที่ 3-8 ถึง 3-11) พบว่ากลไกการเกิดฟาว์ลิงในทุกขนาดรูพรุนสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะเด่นชัด คือแบบ SBM, IBM และ CFM จากการทดลองสามารถแบ่งการเกิดฟาว์ลิงได้ 3 ช่วงคือ ในช่วงแรก ($0 \leq t \leq 20$ นาที) จะเกิดการอุดตันที่บริเวณผนังในรูพรุน เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็ก เรียกรวมการเกิดฟาว์ลิง นี้ว่า SBM ในช่วงที่สอง ($20 \leq t \leq 90$ นาที) จะเกิดกลไกฟาว์ลิงแบบ IBM และช่วงสุดท้าย ($t \geq 90$ นาที) เป็นการเกิดชั้นเค้กซึ่งเป็นไปตามแบบจำลอง CFM ทำให้ในช่วงนี้ เพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงสู่สภาวะคงตัว

จากการทดลองกลไกการเกิดฟาว์ลิงพบว่าเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และเมมเบรนขนาด MWCO 50, 150 และ 300 kDa จะมีรูปแบบการอุดตันของฟาว์ลิงไปในแบบแผนเดียวกันคือ SBM, IBM และ CFM ตามลำดับ ในช่วงแรกของการกรองจะมีการสะสมของฟาว์ลิงตามแบบจำลอง SBM อย่างเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำตาลโตนดประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันและมีการกระจายตัวสูงจึงมีความเป็นไปได้ที่อนุภาคขนาดเล็กเกิดการเคลื่อนที่และเกิดการอุดตันที่ผนังภายในรูพรุนอย่างรวดเร็วเป็นระยะสั้นๆ ในช่วงแรก อีกทั้งกระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันเป็นตัวขับเคลื่อนให้ตัวทำละลายผ่านรูพรุนเมมเบรน ดังนั้นจึงทำให้เกิดการพาโมเลกุลขนาดเล็กสะสมและอุดตันในผนังรูพรุน ส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงและฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อจากนั้นมีการสะสมของฟาว์ลิงในรูปแบบ IBM อย่างเด่นชัด โดยจะมีการสะสมทั้งภายในรูพรุน และผิวหน้า

เมมเบรนแบบซ้อนทับกันและระยะยาว เนื่องจากการสะสมเกิดการเคลื่อนที่กลับไปมาของโมเลกุลภายในกระบวนการกรอง การสะสมในช่วงนี้จะเป็นกลไกที่เกิดขึ้นระยะยาวและส่งผลให้ฟลักซ์คงตัวจากผลดังกล่าว ทำให้มีการลดปริมาณรูพรุนอย่างมาก ชักนำไปสู่การสะสมของฟาว์ลิงตามกลไก CFM การสะสมของชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน เป็นผลทำให้ฟลักซ์ค่อนข้างคงตัว (steady state) (Kosvintsev *et al.*, 2002)

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bowen และคณะ (1995) ในศึกษากระบวนการไมโครฟิลเตรชันโดยเมมเบรนที่ทำจากไนลอน (Nylon66) ขนาดรูพรุน 0.22 และ 0.45 μm ที่ความดัน 10 kPa กรองสารละลาย BSA พบว่าเมมเบรนทั้ง 2 ขนาดมีกลไกการเกิดฟาว์ลิงในรูปแบบเดียวกันคือ SBM และ IBM โดยกลไกการเกิดฟาว์ลิงแบบ IBM จะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อระยะเวลาการกรองมากกว่า 30 นาที และติดตามด้วยการเกิดฟาว์ลิงในรูปแบบ CFM ตามลำดับ

การเกิดฟาว์ลิงในกลไกต่างๆอาจเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน โดยเริ่มจากการอุดตันภายในรูพรุนเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็ก จากนั้นอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนจะสะสมบนอนุภาคที่มีมาก่อนและมีส่วนเข้ามาอุดตันรูพรุนโดยตรง สุดท้ายเกิดชั้นเค้กขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การอุดตันรูพรุนอาจไม่ได้เรียงลำดับเช่นนี้ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับการกระจายตัวของรูพรุนด้วย (Jacob *et al.*, 1998)

จากข้อมูลการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองของกลไกการเกิดฟาว์ลิง พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ (k) ของกลไก SBM, IBM และ CFM มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดรูพรุนเมมเบรน โดยค่าคงที่ k_s และ k_i มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าในเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีโอกาสเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดเล็กภายในผนังรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรนในช่วงแรกได้สูงกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กลง การสะสมและการอุดตันของฟาว์ลิง k_c มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก (ความชันเพิ่มขึ้น) เนื่องจากการสะสมของอนุภาคของน้ำตาลโตนดที่ผิวหน้าเมมเบรนเกิดขึ้นสูงและเป็นระยะเวลายาวนานจึงเกิดการอัดตัวของอนุภาค จะเห็นได้จากความต้านทานฟาว์ลิง (R_{fc} และ R_{mfc}) มีค่าสูงเมื่อกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง

อีกทั้งพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพอมีเอทของกลไกการเกิดฟาว์ลิงในแต่ละแบบจำลองมีค่าแตกต่างกัน โดยแบบจำลอง SBM ในแต่ละเมมเบรนจะมีค่าปริมาณของเพอมีเอทเริ่มต้นและสิ้นสุดกลไกไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในกลไกการเกิดฟาว์ลิงตามแบบจำลอง IBM พบว่าเมื่อสิ้นสุดกลไกดังกล่าวแล้วนั้นจะมีการก่อตัวสะสมเป็นชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น และเข้าสู่แบบจำลอง CFM จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละรูพรุนของเมมเบรน จากตารางที่ 3-5 พบว่าปริมาณของเพอมีเอทของน้ำตาลโตนดเมื่อใช้ขนาดรูพรุนใหญ่ การเกิดฟาว์ลิงแบบ CFM นั้นจะมีการเข้าสู่กลไกดังกล่าวช้ากว่าการกรองด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุนเล็ก จะเห็นว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าความต้านทานเนื่องจากฟาว์ลิงที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง (ตารางที่ 3-2)

จากการศึกษาของ Marchese และคณะ (2003) พบว่าในกลไกการเกิดฟาวลิ่งจะมีการเกิดฟาวลิ่งทั้งภายในและผิวหน้าเมมเบรน ทำให้มีค่าคงที่ที่แตกต่างกันไปในแต่ละแบบจำลอง โดยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีค่าคงที่ k_c ลดลง แต่ค่าคงที่ในแบบจำลอง SBM (k_s) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดอนุภาคของสารกรอง ชนิด และวัสดุเมมเบรน โดยสามารถอธิบายได้ในความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาและแรงกระทำของโมเลกุลและเมมเบรน

ตารางที่ 3-5 ค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิ่ง ปริมาตรเริ่มต้นและสิ้นสุดในแต่ละกลไกการเกิดฟาวลิ่ง ระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 °C

Table 3-5 Kinetic constants of fouling mechanism model and range of permeate volume of each mechanism. Effect of membrane pore size/MWCO during microfiltration and ultrafiltration sugar palm sap at constantTMP 1.5 bar, cross-flow velocity 3.5 m/s and temperature 50 ± 1 °C

Pore size/ MWCO	Kinetic constants			Permeate volume (m ³) x10 ⁻⁵		
	$k_s(x10^5)$	k_i	k_c	SBM	IBM	CFM
0.14 μ m	0.0133	0.0058	0.0360	0-26.70	26.70-70.26	≥ 70.26
300 kDa	0.0117	0.0182	0.1951	0-31.74	31.74-55.69	≥ 55.69
150 kDa	0.0167	0.0246	1.5954	0-26.29	26.29-42.25	≥ 42.25
50 kDa	0.0183	0.0498	0.8239	0-28.30	28.30-39.69	≥ 39.69

2.2 ผลของความดันขับต่อกลไกการเกิดฟาวลิ่ง

จากการศึกษาผลของความดันขับต่อการเกิดฟาวลิ่งของน้ำตาลโตนด เมื่อกรองผ่านเมมเบรนขนาด 0.14 μ m และ 50 kDa ความดันขับ 0.5, 1.5 และ 3.0 bar ที่ความเร็วตามขวางคงที่ 3.5 m/s พบว่ากลไกการเกิดฟาวลิ่งของกระบวนการกรองสามารถแบ่งได้ 3 ช่วงที่เด่นชัด คือแบบจำลอง SBM, IBM และ CFM ตามลำดับ โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าในช่วงระยะแรกของการกรองจะมีการสะสมของฟาวลิ่งเป็นไปตามแบบจำลอง SBM เป็นระยะสั้นๆ ก่อนจะอุดตันแบบ IBM ในช่วงต่อมา เมื่อระยะเวลาการกรองมากขึ้น จะเกิดการสะสมของชั้นเค้ก เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคและโมเลกุลภายใน

ระบบเกิดขึ้น และอัตราการแพร่กลับของอนุภาคลดน้อยลง ทำให้เกิดขึ้นที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง CFM

เช่นเดียวกับการศึกษาของ Blanpain และ Lalande (1997) โดยการศึกษาการกรองเบียร์ผ่านเมมเบรนแบบนิวเคลียร์ (tracketched nuclepore membrane) แบบโพลีคาร์บอเนตขนาดรูพรุน $0.2 \mu\text{m}$ ที่ความดันขับ 10 และ 100 kPa จากการทดลองสามารถทำนายแบบจำลองการเกิดฟาวลิงได้ 2 ลักษณะคือ SBM และ CFM โดยที่ความดันต่ำจะส่งผลให้การสะสมของชั้นเค้กมีสูงและเข้าสู่กลไก CFM อย่างรวดเร็ว แต่จากการทดลองของ Hlavacek และ Bouchet (1993) พบว่าในกระบวนการกรอง BSA จะเกิดฟาวลิงตามแบบจำลอง IBM และ CFM เด่นชัดเมื่อมีความดันเพิ่มขึ้น เพราะเกิดการสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นมากกว่าการสะสมในรูพรุน

ค่าคงที่ (k) ของแบบจำลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3-6 พบว่าการเพิ่มความดันขับ ค่าคงที่แบบจำลองต่างๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ค่าคงที่ของการกรองในแต่ละแบบจำลองจะมีค่าแตกต่างกัน เพราะเป็นค่าที่ได้มาจากการพล็อตกราฟเส้นตรงที่มีความสัมพันธ์ต่างกัน โดยค่าคงที่ในการกรองของน้ำตาลโตนด (k_s , k_f และ k_c) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความดันขับ ส่วนค่าปริมาตรเพอมีอิตที่ได้ในแต่ละแบบจำลองจะมีค่าแตกต่างกันไป ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในตัวอย่างเริ่มต้นมีปริมาณของแข็งในแต่ละการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ Herrero และคณะ (1997) ในการศึกษาการกรองโปรตีน BSA ด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแบบปิดตาย (dead end process) ที่ความดันคงที่ โดยไม่มีการกวนในระบบ พบว่าการเกิดฟาวลิงเป็นไปตามแบบจำลอง IBM และ CFM และค่าคงที่ของกลไก (k_f และ k_c) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่า k_f จะมีค่าน้อยกว่าค่า k_c ซึ่งสามารถบ่งบอกว่าเกิดการอุดตันในรูพรุนได้มากกว่าการเกิดขึ้นเค้กที่ผิวหน้า ทั้งนี้จากการวิจัยอาจเป็นเพราะการดำเนินระบบการกรองที่แตกต่างกัน คือในการวิจัยใช้กระบวนการแบบไหลขวางและเมมเบรนแบบท่อเซรามิก ทำให้มีปัจจัยอื่นๆ เช่น แรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรน พื้นที่หน้าตัดตามขวาง (cross section area) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจึงอาจมีผลทำให้ค่าคงที่แตกต่างกันได้

ตารางที่ 3-6 ค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิ่ง ปริมาตรเริ่มต้นและสิ้นสุดในแต่ละกลไกการเกิดฟาวลิ่ง เนื่องจากผลของความดันขั้วระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C

Table 3-6 Kinetic constants of fouling mechanism model and range of permeate volume of each mechanism. Effect of transmembrane pressure of sugar palm sap during microfiltration and ultrafiltration at constant cross-flow velocity 3.5 m/s and temperature 50±1 °C

Pore size/MWCO	TMP (bar)	Kinetic constants			Permeate volume (m ³) x10 ⁻⁵		
		k _s (x10 ⁵)	k _i	k _c	SBM	IBM	CFM
0.14 μm	1.0	0.0150	0.0265	0.4849	0-24.28	24.28-45.23	≥ 45.23
	1.5	0.0100	0.0058	0.0360	0-26.70	26.70-70.26	≥ 70.26
	3.0	0.0050	0.0062	0.0211	0-52.48	52.48-69.77	≥ 69.77
50 kDa	1.0	0.0320	0.0371	1.4180	0-13.44	13.44-28.56	≥ 28.56
	1.5	0.0183	0.0498	0.8239	0-28.30	28.30-39.69	≥ 39.69
	3.0	0.0216	0.0101	0.0631	0-17.05	17.05-67.28	≥ 67.28

2.3 ผลของความเร็วตามขวางต่อกลไกการเกิดฟาวลิ่ง

จากการศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิ่งระหว่างกระบวนการกรองน้ำตาลโตนคด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันที่ความเร็วตามขวางแตกต่างกัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามขวางที่ 0.5, 2.0 และ 3.5 m/s การเกิดฟาวลิ่งในแต่ละความเร็วตามขวางสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงลดลงของฟลักซ์เพอทิเอทได้ 3 ช่วงเวลา สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของ SBM, IBM และ CFM ตามลำดับ โดยที่ระดับความเร็วตามขวางในระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเข้าสู่กลไกการเกิดฟาวลิ่งในแบบต่างๆ ในระยะเวลาที่นานขึ้น และทำให้ปริมาตรของเพอมิเอทที่ได้มีค่าแตกต่างกันออกไป

เช่นเดียวกับการวิจัยของ Thomassen และคณะ (2004) ถึงการเกิดฟาวลิ่งในกระบวนการกรองเบียร์ด้วยเมมเบรนระบบไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางขนาดรูพรุน 0.45 μm พบว่าเมื่อความเร็วตามขวางในระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ฟลักซ์ในช่วงท้ายของการกรองมีค่าสูงกว่าการใช้ความเร็วตามขวางต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถลดการสะสมของฟาวลิ่งและความต้านทานการไหลได้ การเกิดฟาวลิ่งสามารถระบุได้สองรูปแบบคือ การอุดตันในรูพรุนและการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรน โดยการสะสมของฟาวลิ่งดังกล่าวจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรอง การกักกัน และโครงสร้างของเมมเบรน

จากตารางที่ 3-7 การทดลองสามารถหาค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิง ซึ่งพบว่าค่าคงที่ของการกรอง (k) ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วตามขวาง ทั้งนี้เพราะสามารถเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนกับอนุภาคที่ไปสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนได้ จึงสามารถลดการเกิดชั้นเล็กของน้ำตาลโตนด Prádanos และคณะ (1996) ศึกษาการใช้โปรตีนโมเลกุลขนาดแตกต่างกัน (Lipase, α -Globulin และ BSA) ในแบบจำลอง SBM จะมีค่าคงที่ของกลไก (k_s) ลดลงเมื่อมีความเร็วเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษากลไกการเกิดฟาวลิงของคินขาว พบว่าการเพิ่มความเร็วส่งผลให้ค่าคงที่ของแบบจำลองลดลง (Al-Malack *et al.*, 2004) นอกจากนี้ค่า k_s ของกระบวนการเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันมีการลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเร็วตามขวาง เนื่องจากในช่วงนี้การสะสมและอุดตันของฟาวลิงโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนและเกิดการสะสมเป็นชั้นโพลารไรซ์ ซึ่งไม่อัดตัวกันแน่นมากนัก การเพิ่มความเร็วจึงสามารถทำให้การเคลื่อนที่หรือการแพร่กลับของอนุภาคที่บริเวณผิวหน้าไปยัง bulk มีสูง ในระยะสุดท้ายของการกรองสังเกตได้ว่าการลดลงของค่า k_s มีความแตกต่างกัน โดยที่การกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันลดลงอย่างรวดเร็วกว่าไมโครฟิลเตรชัน เนื่องจากเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่า และมีโอกาสเกิดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนมากกว่า ส่งผลให้เมื่อมีการเพิ่มความเร็วตามขวางสามารถกำจัดชั้นเล็กที่ผิวหน้าของเมมเบรนได้

ตารางที่ 3-7 ค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิ่ง ปริมาตรเริ่มต้นและสิ้นสุดในแต่ละกลไกการเกิดฟาวลิ่ง เนื่องจากผลของความเร็วมตามขวางระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50±1 °C

Table 3-7 Kinetic constant of fouling mechanism model and range of permeate volume of each mechanism. Effect cross-flow velocity of sugar palm sap during microfiltration and ultrafiltration at constant transmembrane pressure 1.5 bar and temperature 50±1 °C

Poresize/MWCO	CFV (m/s)	Kinetic constant			Permeate volume (m ³) x10 ⁻⁵		
		k _s (x10 ⁵)	k _i	k _c	SBM	IBM	CFM
0.14 μm	0.5	0.0400	0.4350	0.8671	0-5.20	5.20-13.66	≥ 13.66
	2.0	0.0100	0.0152	0.2506	0-19.85	19.85-41.55	≥ 41.55
	3.5	0.0133	0.0058	0.0360	0-26.70	26.70-70.26	≥ 70.26
50 kDa	0.5	0.0367	0.1836	6.3917	0-9.70	9.70-14.39	≥ 14.39
	2.0	0.0180	0.0251	0.9298	0-19.75	19.75-46.08	≥ 46.08
	3.5	0.0180	0.0498	0.8239	0-28.30	28.30-39.69	≥ 39.69

3.5 บทสรุป

จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงพลั๊กซ์ของเพอมีเอระหว่างกรองและกลไกการเกิดฟาวลิ่งของน้ำตาลโดนด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พลั๊กซ์ของน้ำตาลโดนดจะมีการลดลงกับเวลา พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ พลั๊กซ์มีความแตกต่างกันเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนต่างกัน โดยพลั๊กซ์ของเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm จะให้ค่าพลั๊กซ์สูงสุด เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้ความดันที่แตกต่างกันในเมมเบรนระดับเดียวกันซึ่งการใช้ความดันสูงมีผลทำให้ค่าพลั๊กซ์ของน้ำตาลโดนดมีค่าสูง แต่จะมีการลดลงในช่วงแรกสูงเนื่องจากการเกิดฟาวลิ่ง และเมื่อมีการเพิ่มความเร็วให้กับระบบการกรองเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าพลั๊กซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น

2. ค่าการกักกันโปรตีนจะมีการเพิ่มขึ้นกับเวลา โดยเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm มีความสามารถกักกันโปรตีนได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนขนาด MWCO 300, 150 และ 50 kDa ตามลำดับ เมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเดียวกัน เพื่อศึกษาปัจจัยของความเร็วมตามขวางและความดันขับ พบว่ามีผลต่อการกักกันโปรตีนได้น้อยลงเมื่อใช้ความเร็วมตามขวางในระบบการกรองเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดการสะสมฟาวลิ่งที่ผิวหน้าเมมเบรนและเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการกรอง แต่ในขณะเดียวกัน

เมื่อมีการเพิ่มความดันขับประสิทธิภาพของการกักกันเพิ่มขึ้น เพราะมีการอัดตัวของ ฟาวลิ่งเพิ่มขึ้นที่ ผิวหน้าเมมเบรน เปรียบเสมือนเป็นชั้นเมมเบรนอีกชั้นในการกรอง (secondary filter) ทำให้การกักกัน สูงขึ้น

3. ค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่ง R_{ff} และ R_{mf} เพิ่มขึ้นหลังจากการกรองน้ำตาลโดนด แสดงว่าฟาวลิ่งมีการเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกรอง โดยมีการดูดซับทั้งภายในรูพรุนและผิวหน้า เมมเบรน และทั้ง R_{ff} และ R_{mf} ซึ่งความต้านทานส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นเป็น ฟาวลิ่งแบบ R_{ff} และพบว่าเมื่อ กรองน้ำตาลโดนดด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กจะทำให้ค่าความต้าน R_{ff} มีสูงกว่าการใช้เมมเบรนที่มี ขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นตามลำดับ และความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ความดันขับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากการใช้ความดันสูงจะทำให้เกิดการอัดตัวของฟาวลิ่งแน่นขึ้น แต่อย่างไรก็ตามฟาวลิ่งมีการ ลดลงเมื่อความเร็วของสารป้อนเพิ่มขึ้น เพราะสามารถเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้า เมมเบรนและฟาวลิ่งทำ ให้ลดการสะสมลงได้

4. การศึกษากลไกการเกิดฟาวลิ่ง โดยหาความสัมพันธ์จากการลดลงของฟลักซ์ เพอมีเอทตามแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ในระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน และพบว่าเกิดการเกิดฟาวลิ่ง สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลไกหลัก คือ SBM, IBM และ CFM ตามลำดับ โดย ในช่วงแรกจะมีการอุดตันแบบ SBM ซึ่งเป็นการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กในผนังรูพรุนอย่างรวดเร็ว จะ เกิดในระยะสั้นๆ IBM เกิดการอุดตัน ดูดซับ และสะสมทั้งในรูพรุนและผิวหน้าไปพร้อมกัน และในช่วง สุดท้ายจะเกิดเป็นชั้นเค้กจึงมีกลไกการอุดตันเป็นไปตามแบบจำลอง CFM กลไกการอุดตันของฟาวลิ่ง เมื่อกรองน้ำตาลโดนดที่ได้ศึกษาปัจจัยด้านขนาดรูพรุนของเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตาม ขวาง กลไกการเกิดฟาวลิ่งและการอุดตันเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน

5. ค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิ่งได้แก่ k_s , k_f และ k_c ในปัจจัยด้านต่างๆ คือ ขนาดรูพรุนของเมมเบรน ความเร็วตามขวาง และความดันขับ ซึ่งค่าคงที่มีค่าแตกต่างกันในแต่ละกลไก การเกิดฟาวลิ่ง โดยมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น ความดันขับ และความเร็วตามขวาง เพิ่มขึ้น

6. ปริมาตรของเพอมีเอทในกลไกต่างๆ จะมีค่าแตกต่างกัน เมื่อกรองด้วยเมมเบรนที่มี ขนาดรูพรุนเล็ก พบว่าเกิดขึ้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน (CFM) อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาตรของเพอมีเอท เริ่มต้นของกลไกดังกล่าวมีค่าต่ำ เช่นเดียวกับเมื่อเพิ่มความเร็วตามขวางจะพบว่าปริมาตรของเพอมีเอท มีค่าสูงขึ้นทำให้เกิดชั้นเค้กเกิดได้ช้า

เอกสารอ้างอิง

- 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.
- Cheryan, M. 1986. *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook* 2nd edition. Technomic publish Co. Lancaster. USA.
- 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.
- D'Souza, N.M. and Wiley, D.E. 2003. Whey ultrafiltration: Effect of operating parameters on flux and rejection. 5th International Membrane Science and Technology Conference (IMSTEC'03). November 10th -14th, 2003. Sydney, Australia.
- Chilukuri, V.V.S., Marshall, A.D. and Munro, P.A. 2001. Effect of sodium dodecyl sulphate an cross-flow velocity on membrane fouling during cross-flow microfiltration of lactoferrin solutions. *J. Chem. Eng. and Proc.* 40: 321-328.
- Gan, Q. 2001. Beer clarification by cross-flow microfiltration – effect of surface hydrodynamics and reversed membrane morphology. *J. Chem. Eng. and Proc.* 40: 413-419.
- 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 kenntis der filtrations gesetze, *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 Inter. 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 Eng Asp*. 138: 173-183.
- Jiffirin, 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.
- Jiraratananon, R. and Chanachai, A. 1996. A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice. *J. Membrane Sci*. 111: 39-48.
- Jiraratananon, R., Uttapap, D. and Tangamornsuksun, C. 1997. Self-forming dynamic membrane for ultrafiltration of pineapple juice. *J. Membrane Sci*. 129: 135-143.
- 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.
- Marchese, J., Ponce, M., Ochoa, N.A., Prádanos, P., Palacio, L. and Hernández, A. 2003. Fouling behavior of polyethersulfone UF membranes made with different PVP. *J. Membrane Sci*. 211: 1-11.
- 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.

- Song, L. 1998. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: mechanisms and modelling of membrane fouling. *J. Membrane Sci.* 139: 183-200.
- Tadei, C., Aimar, P., Daufin, G. and Sanchez, V. 1998. Factors affecting fouling of inorganic membrane during sweet whey ultrafiltration, *Lait.* 68: 157-176.
- Thomassen, J.K., Faraday, D.B.F., Underwood, B.O. and Cleaver, J.A.S. 2004. The effect of varying transmembrane pressure and crossflow velocity on the microfiltration fouling of a model beer. *Sep. Purif. Technol.* 63: 1-10.
- 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.
- Zokaee, F., Kagnazchi, T. and Zare, A. 1999. Cell harvesting by microfiltration in deadend system. *Proc. Biochem.* 34: 803-810.