บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในระยะหลายทศวรรตที่ผ่านมา การกรองด้วยกระบวนการเมมเบรนได้เข้ามามีบทบาทและแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารเป็นอย่างมาก เช่น อุตสาหกรรมเบียร์และไวน์ อุตสาหกรรมนม อุตสาหกรรมน้ำผลไม้ และอุตสาหกรรมทางชีวเคมี เป็นต้น (Heldman and Hartel, 1999) ในอุตสาหกรรมนม มีการใช้เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชั่นเพื่อแยกองค์ประกอบ เช่นโปรตีน แลคโตส ไขมัน แร่ธาตุและวิตามิน ในการผลิตเนยแข็ง นมพร้อมดื่ม เป็นต้น ส่วนที่ผ่านกระบวนการเมมเบรนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เกือบทั้งหมด และสามารถลดการใช้ความร้อนทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เริ่มต้น (Grandison and Lewis, 1996; Brandsma and Rizvi, 1999) อุตสาหกรรมน้ำผลไม้ได้มีการใช้กระบวนการเมมเบรนอย่างกว้างขวางโดยมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น กระบวนการทำให้ของเหลวมีความใส (Clarification) กระบวนการทำให้เข้มข้น (Concentration) การแยกองค์ประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำผลไม้ อาทิเช่น เพคติน เซลลูโลส เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenoloxidase) การทำให้น้ำผลไม้ปลอดเชื้อจุลินทรีย์โดยความร้อนต่ำ (Cold sterilization) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเมมเบรนมีคุณภาพทางด้าน กลิ่น สี และรสชาดที่ดีกว่ากระบวนการอื่นๆ (Vaillant *et al.,* 1999; Girard and Fukumoto, 2000)

กระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันเป็นแรงขับ (Pressure driven) เพื่อแยกองค์ประกอบในของเหลวโดยผ่านแผ่นเมมเบรนเป็น 2 ส่วน คือ “ส่วนรีเทนเทท” (retentate) เป็นส่วนที่ถูกกักกันด้วยเมมเบรน และส่วนที่ผ่านเมมเบรน หรือเรียกว่า “เพอมิเอท” (permeate)

น้ำตาลโตนดเป็นผลิตภัณฑ์พื้นบ้านที่มีมากในจังหวัดสงขลา กรรมวิธีการผลิตน้ำตาลโตนดสเตอริไรซ์แบบดั้งเดิมนั้นเป็นการใช้ความร้อนส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นรสเปลี่ยนแปลงไป การใช้กระบวนการเมมเบรนสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ความร้อน และสามารถแยกน้ำตาลโตนดได้ 2 ส่วนคือ ส่วนรีเทนเทท ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลโตนดที่มีปริมาณจุลินทรีย์สูง และส่วนเพอมิเอทซึ่งปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ และมีความใสมากขึ้น จึงคาดหวังว่าส่วนเพอมิเอทจะสามารถเก็บรักษาได้นานมากขึ้นโดยที่คุณภาพของน้ำตาลโตนดไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นการใช้กระบวนการเมมเบรนกับการผลิตน้ำตาลโตนดจะเป็นแนวทางเลือกใหม่ในอนาคตเนื่องจากกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนสามารถทดแทนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนทำให้สารให้กลิ่นรส

และองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญไม่เปลี่ยนแปลงไปหรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด แต่กระนั้นการใช้กระบวนการเมมเบรนกับน้ำตาลโตนด ยังไม่มีการศึกษาถึงสมรรถนะของการดำเนินกระบวนการอย่างลึกซึ้ง ปัญหาของกระบวนการเมมเบรน คือการเกิดจากปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นและฟาวลิ่ง โดยจะส่งผลต่อความสามารถในการกรอง เช่น การลดลงของค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท ความสามารถในการแยกหรือกักเก็บองค์ประกอบเปลี่ยนแปลง จึงมีการให้ความสนใจในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นและฟาวลิ่งของผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้เพิ่มสูงขึ้น

ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ผลของสภาวะดำเนินการและขนาดของรูพรุนเมมเบรน ที่มีผลต่อสมรรถนะกระบวนการเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนดต่อค่าฟลักซ์ ความสามารถในการแยกจุลินทรีย์และองค์ประกอบต่างๆ ในน้ำตาลโตนด ฟาวลิ่ง กลไกการเกิดฟาวลิ่ง และค่าฟลักซ์วิกฤต

ผลของการศึกษาที่ให้ได้มาซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ การลดหรือป้องกันการเกิดฟาวลิ่งในการใช้กระบวนการเมมเบรนเป็นขั้นตอนสำคัญในการแปรรูปน้ำตาลโตนดและเป็นประโยชน์กับน้ำผลไม้ชนิดอื่นๆ ต่อไป

1.2 การตรวจเอกสาร

1.) กระบวนการเมมเบรน

ปัจจุบันกระบวนการเมมเบรนถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น การบำบัดน้ำ การลดแบคทีเรียในน้ำดื่ม การแยกเกลือออกจากน้ำทะเล การทำให้เข้มข้นในผลิตภัณฑ์นม การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นและการทำน้ำผลไม้ให้มีความใส เป็นต้น ข้อดีของกระบวนการเมมเบรน คือสามารถแยกสารละลายโดยไม่ต้องใช้สารเคมีในกระบวนการแปรรูป สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้หมด และค่าบำรุงรักษาต่ำ

หลักการของกระบวนการเมมเบรนที่ใช้ความดันเป็นแรงขับดัน คือสารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลเล็กจะผ่านเมมเบรนโดยอาศัยแรงดันขับ เคลื่อนสารเนื่องจากผลต่างของความดันระหว่างเมมเบรน (Transmembrane pressure, TMP) ส่วนตัวถูกละลายจะถูกเมมเบรนกักไว้ เรียกว่า “รีเทนเทท” หรือ “สารละลายเข้มข้น (concentrate)” ส่วนตัวทำละลายและตัวถูกละลายบางส่วนที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่า “เพอมิเอท” ส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นรีเทนเทท หรือเพอมิเอท หรือทั้งสองส่วนขึ้นอยู่กับความต้องการ การกรองโดยใช้เมมเบรนระดับต่างๆ ได้แก่ ระดับไมโครฟิลเตรชั่น (Microfiltration, MF) อัลตราฟิลเตรชั่น (Ultrafiltration, UF) นาโนฟิลเตรชั่น (Nanofiltration, NF) และออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO)

สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้มักประยุกต์ใช้การกรองด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชั่นและไมโครฟิลเตรชั่นในกระบวนการทำน้ำผลไม้ให้ใสและใช้เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์

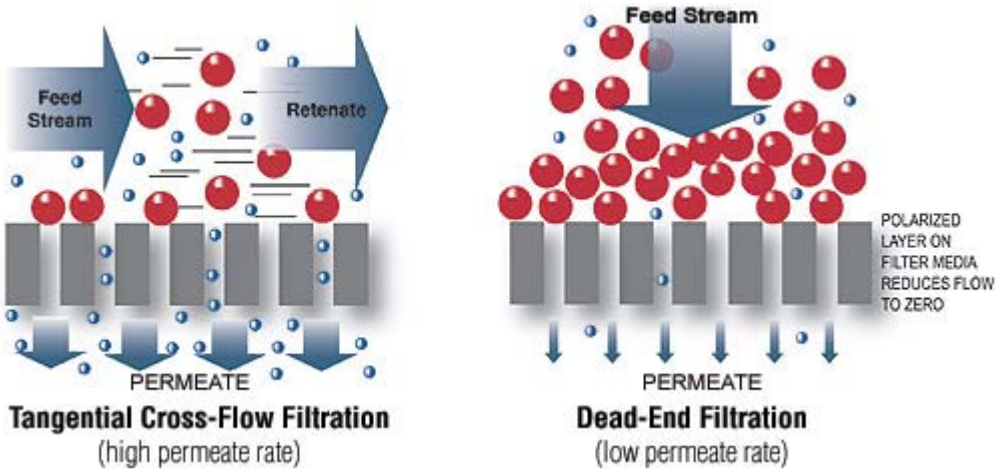
กระบวนการเมมเบรนสามารถแบ่งกระบวนการกรองตามรูปแบบดำเนินการกรองและทิศทางการไหลของสารป้อนเป็น 2 รูปแบบคือ

1. การกรองแบบปิดตาย (Dead-end filtration)

การกรองแบบปิดตาย เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางตั้งฉากกับเมมเบรน (ภาพที่1-1) ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวหน้าแผ่นเมมเบรน เรียกว่า เค้ก (cake) ที่ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ (flux) ลดลงทันทีและมีค่าความต้านทานของการกรองเพิ่มขึ้น การกรองแบบนี้จะเหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นไม่มากนัก หรืออาจใช้ในการแยกสารละลายในปริมาณน้อยเพื่อการวิเคราะห์

2.การกรองแบบไหลขวาง (Cross-flow filtration)

การกรองแบบไหลขวาง ป้อนสารละลายในทิศทางขนานกับเมมเบรน หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมิเอท (ภาพที่1-1) การกรองแบบไหลขวางสามารถลดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นเมมเบรนได้ มีความเหมาะสมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง และนิยมใช้กันมากในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถลดความเข้มข้นสะสม (Concentration polarization) และการเกิดเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน และใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมากได้ (Kenneth *et al.,* 1997)



ภาพที่ 1-1 กระบวนการกรองแบบไหลขวางและแบบปิดตาย

Figure 1-1 Crossflow filtration and Dead-end filtration processes

ในที่นี้จะกล่าวถึงระบบเมมเบรนที่ใช้อุตสาหกรรมการกรองน้ำผลไม้และเครื่องดื่มโดยทั่วไป คือ

1.1) อัลตราฟิลเตรชั่น (Ultrafiltration, UF)

กระบวนการเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชั่นเป็นกระบวนการแยกโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่นคอลลอยด์ จุลินทรีย์ น้ำตาล และสารอื่นๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 300-500,000 ดาลตัน (Dalton, Da) ออกจากน้ำหรือสารโมเลกุลอื่นๆ โดยใช้ความดันขับในการส่งผ่านสารผ่านเมมเบรน ความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 2-10 บาร์ (bar) เมมเบรนที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเมมเบรนที่ไม่สมมาตร (Asymetric) และเป็นเมมเบรนที่มีรูพรุน หรือMolecular weight cut-off (MWCO) อยู่ในช่วง 1-300 kDa (Zeman and Zydney, 1996; Baker, 2000) ตารางที่ 1-1 เป็นข้อมูลด้านคุณลักษณะของเมมเบรนและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชั่น

ตารางที่ 1-1 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชั่น

Table 1-1 Ultrafiltration processes

	Ultrafiltration
Membrane	Symmetric or Asymmetric
MWCO	10^3-10^6 Da
Driving force	2-10 bar
Separation principle	Seiving mechanism
Separation goal	- Solution - Fractionation - Concentration
Application	- Analytical application - Sterilisation (foods and pharmaceuticals) - Ultrapure water (semiconductors) - Clarification (beverage)

ที่มา: Kovasin (2002)

1.2) ไมโครฟิลเตรชั่น (Microfiltration, MF)

กระบวนการเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่น เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกสารละลาย เช่นคอลลอยด์ อิมัลชั่น และสารแขวนลอย ผ่านรูพรุนที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.05-20 ไมโครเมตร (μm) โดยความดันที่ใช้ในการดำเนินการอยู่ในช่วง 1-5 bar ตัวอย่างการใช้งานหลักของไมโครฟิลเตรชั่น เช่นใช้บำบัดน้ำทิ้ง อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เช่นไวน์ น้ำผลไม้ เพื่อการทำให้ใส เป็นต้น (Winston Ho and Sirkar, 1992; Baker, 2000) ในตารางที่ 1-2 แสดงข้อมูลโดยสรุปของคุณลักษณะเมมเบรนและกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่น

ตารางที่ 1-2 กระบวนการไมโครฟิลเตรชั่น

Table 1-2 Microfiltration process

	Microfiltration
Membrane	Symmetric or Asymmetric
Pore size	0.05-10 μm
Driving force	Pressure ≤ 2 bar
Separation principle	Seiving mechanism
Separation goal	- Solution or gas free of particles
Application	- Analytical application - Protein fractionation - Sterilisation (foods and pharmaceuticals) - Ultrapure water (semiconductors) - Clarification (beverage) - Cell harvesting (biotecnology)

ที่มา: Posp´ıšil และคณะ (2004)

1.3) ข้อดีของเทคโนโลยีเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรนมีข้อได้เปรียบกระบวนการแยกอื่นๆ ดังนี้

3.1 การแยกตามขนาดของโมเลกุล (รูปร่างหรือชนิดของประจุ) ทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิปกติ จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้

3.2 กระบวนการเมมเบรนส่วนใหญ่ ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถแยกได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนเฟส

3.3 ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้งเพราะกระบวนการเมมเบรนทำให้สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพอมิเอท และรีเทนเทท เช่นในการผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น ส่วนของเพอมิเอท คือผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ที่มีความใส และส่วนของรีเทนเทท คือส่วนที่นำไปผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น

3.4 สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบเป็นระดับอุตสาหกรรมได้ไม่ยาก เนื่องจากมีลักษณะการติดตั้งเป็นชุดหรือเป็นหน่วย สามารถนำหน่วยย่อยๆ มาประกอบเพื่อเพิ่มพื้นที่กรองได้โดยง่าย

3.5 สามารถดำเนินการแบบกะ (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) ตลอดจนติดตั้งระบบคุมงานแบบอัตโนมัติได้ไม่ยาก

3.6 มีขนาดกระทัดรัดไม่เปลืองพื้นที่ เพราะชุดอุปกรณ์เมมเบรนมีการออกแบบให้มีศักยภาพในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง

3.7 ไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง สามารถแยกได้โดยไม่เปลี่ยนสถานะและไม่ต้องใช้สารเคมีในการแยก

3.8 สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.9 ใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการแปรรูปโดยวิธีการอื่นๆ และใช้เวลาสั้นกว่า ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่ำ

1.4) ทฤษฎีของกระบวนการเมมเบรน

ค่าที่แสดงสมรรถนะในกระบวนการเมมเบรนคือ ค่าฟลักซ์และค่าการกักกัน โดยที่ค่าฟลักซ์จะแสดงถึงปริมาตรของเพอมิเอทที่ผ่านเมมเบรนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา (Krishna *et al.,* 2003) และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงขับดัน และความต้านทานการไหลได้ดังนี้

$$J = \frac{TMP}{\mu \, . \, R_t} \qquad [1.1]$$

โดย J = ฟลักซ์ของเพอมิเอท ($m^3/m^2.s$ หรือ $L/m^2.h$)

TMP = ความแตกต่างของความดัน (Pa)

โดย TMP ของการกรองแบบไหลขวางสามารถหาได้จากสมการ

$$TMP = \frac{P_{in} + P_{out}}{2} - P_p \qquad [1.2]$$

เมื่อ P_{in} = ความดันขาเข้า หรือความดันของสารป้อน (Pa)

P_{out} = ความดันขาออก หรือความดันของรีเทนเทท (Pa)

P_p = ความดันด้านเพอมิเอท (Pa)

μ = ความหนืดของเพอมิเอท (Pa.s)

R_t = ความต้านทานรวม (m^{-1})

โดย

$$R_t = R_m + R_f \qquad [1.3]$$

$$R_f = R_{rf} + R_{irf} \qquad [1.4]$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานของเมมเบรน (m^{-1})

R_f = ความต้านทานของการเกิดฟาวลิ่ง (m^{-1})

R_{rf} = ความต้านทานฟาวลิ่งแบบผันกลับได้ (reversible fouling) (m^{-1})

R_{irf} = ความต้านทานฟาวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible fouling) (m^{-1})

ความต้านทานที่เกิดขึ้นมีผลต่อเพอมิเอทฟลักซ์ของกระบวนการเมมเบรนในสภาวะปกติ ความต้านทาน R_m คำนวณโดยตรงจากฟลักซ์น้ำก่อนใช้งาน ค่า R_f หาได้จากฟลักซ์น้ำของเมมเบรนหลังใช้งาน และ R_t คือความต้านทานรวม จากการศึกษาของนักวิจัยพบว่า R_m มีค่าคงที่ โดยทั่วไป R_{irf} มีค่าขึ้นกับสมบัติของสารป้อน สภาวะการดำเนินการ และการทำความสะอาดเมมเบรน ส่วน R_{rf} ขึ้นกับความเร็วตามขวาง ความดัน และฟลักซ์ และจะมีการแปรผกผันกับอัตราการไหลผ่านเมมเบรน เนื่องจากอัตราการไหลมีผลต่อชั้นเค้ก คืออัตราการไหลสูงจะทำให้การเกาะติดของอนุภาคที่สะสมเป็นชั้นเค้กหลุดออกและมีความหนาลดลง ค่าความต้านทาน R_{rf} มีค่าสูงกว่าค่า R_m และ R_{irf} มาก จึงเป็นความต้านทานที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท (Chiang and Cheryan, 1986)

ค่าเฟคเตอร์ความเข้มข้นเชิงปริมาตร (Volume concentration factor, VCR) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นในระหว่างการกรอง (Vaillant *et al.,* 1999) สามารถหาด้วยสมการ [1.5]

$$VCR = \frac{Volume\ of\ feed}{Volume\ of\ feed - Volume\ of\ permeate} \quad [1.5]$$

สำหรับค่าการกักกัน (Rejection coefficient, R_j) หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของตัวถูกละลายที่ถูกเมมเบรนกักกันไว้ หรือไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ ซึ่งค่าการกักกันที่หาได้สามารถ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Cheryan, 1998)

$$R_j = \left(1 - \frac{C_P}{C_R}\right) \times 100 \qquad [1.6]$$

เมื่อ C_p = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมิเอท

C_R = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในรีเทนเทท

การลดลงของฟลักซ์ในระหว่างการดำเนินงานเป็นปรากฏการณ์ที่พบเห็นได้ตลอดเวลา สาเหตุสำคัญ 2 ประการที่ทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์คือผลของการเกิดคอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น (Concentration polarization, CP) และฟาวลิ่ง (Fouling) โดย CP หมายถึงการสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ส่งผลให้บริเวณผิวหน้าเมมเบรนมีความเข้มข้นสูงขึ้นเกิดเป็นเกรเดียนซ์ (Gradient) ความเข้มข้น ในขณะที่ฟาวลิ่งจะเกิดจากการสะสม/อุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุน ทำให้ฟลักซ์ลดลง โดยจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

1.5) ปรากฏการณ์คอนซ์นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นและฟาวลิ่ง

1.5.1) คอนเซ็นเตรชั่น โพลาไรเซชั่น (Concentration polarization, CP)

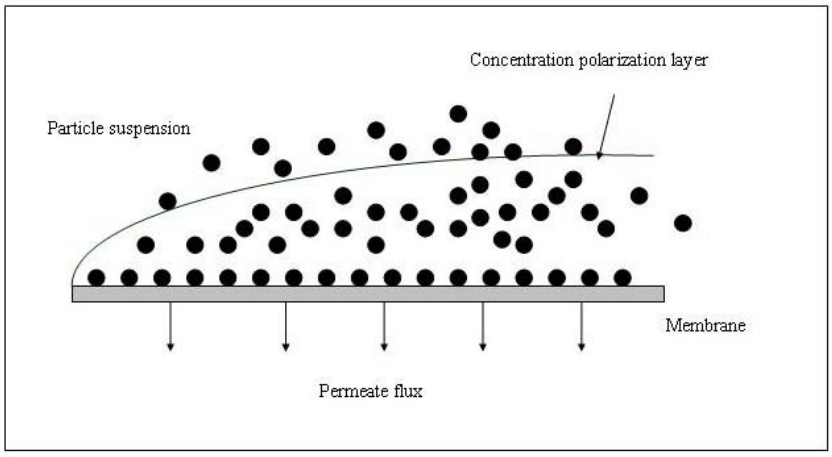
ปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น อาจอธิบายได้ในเทอมของฟาวลิ่งที่สามารถผันกลับได้ จะเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลต่างๆ กันถูกพาสู่ผิวหน้าเมมเบรนตัวถูกละลายขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของเมมเบรนก็จะถูกสะสมและกักกันอยู่ใกล้หรือบนผิวเมมเบรน ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป

(bulk) ดังภาพที่1-2 (a) ตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนจึงเกิดการแพร่กลับ (back diffusion) ไปยัง bulk เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น หากความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนมีค่าสูงถึงขีดจำกัดการแพร่กลับของสารนั้นๆ ตัวถูกละลายอาจเกิดลักษณะคล้ายเจลหรือชั้นเค้กที่บริเวณใกล้ผิวหน้าเมมเบรน (ภาพที่1-2, b) ชั้นเจลหรือเค้กที่เกิดขึ้นครอบคลุมผิวเมมเบรนมีลักษณะคล้ายเมมเบรนอีกชั้นหนึ่ง

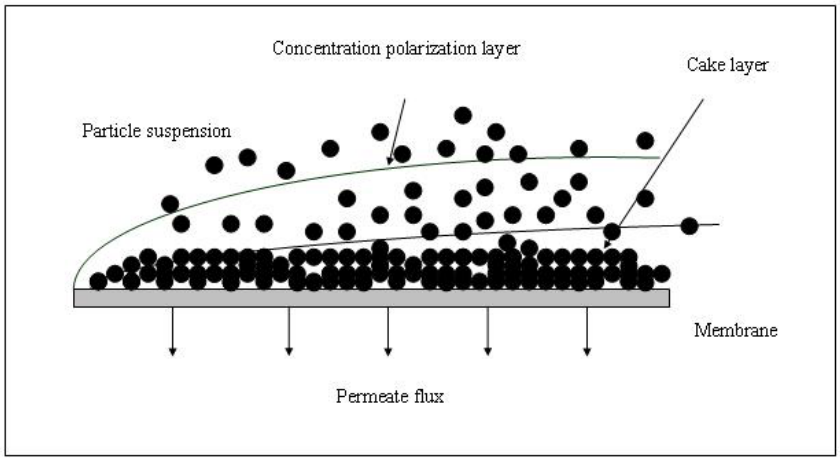
ทำให้ความต้านทานการไหลของตัวถูกละลายสูงขึ้น ฟลักซ์ของสารละลายจึงมีค่าลดลง และอาจส่งผลให้คุณสมบัติของการกักกันสารของเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของชั้นเค้กที่เกิดขึ้น ถ้าตัวถูกละลายขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่ในชั้นเค้กได้เร็วกว่าเมมเบรนเดิม การเกิดคอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นของตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้นพร้อมกับทำให้ค่าการกักกันลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าตัวถูกละลายสามารถเคลื่อนที่ในชั้นเค้กได้ช้าหรือรูพรุนในชั้นเค้กเล็กและแน่นกว่าเมมเบรน โอกาสที่ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นเค้กสู่เมมเบรนเดิมย่อมเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ค่าการกักกันเพิ่มขึ้น (Chen *et al.,* 1997; Mohammadi *et al.,* 2003)

1.5.2) ฟาวลิ่ง (Fouling)

ความหมายของฟาวลิ่งยังไม่เป็นที่เข้าใจชัดเจนนัก และยากที่จะแยกจากคอนเซนเตรชั่นโพลาไรเซชั่นและเจลอย่างเด่นชัด เพราะปรากฏการณ์เหล่านี้มีผลต่อฟลักซ์และการกักกันคล้ายคลึงกัน โดยส่วนใหญ่ฟาวลิ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้สมรรถนะของกระบวนการเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดลง ทั้งนี้เพราะสามารถส่งผลระยะยาวต่อการลดลงของฟลักซ์เพอมิเอทและอายุการใช้งานของเมมเบรน โดยฟลักซ์ที่ลดลงนั้นขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ, ความดัน, ความเข้มข้นของสารป้อนและความเร็วของสารป้อน เป็นต้น ฟาวลิ่งของกระบวนการเมมเบรนจะแตกต่างกับการเกิดปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดฟาวลิ่งเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคมีการสะสมและอุดตันของตัวถูกละลายทั้งที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนของเมมเบรน และไม่สามารถผันกลับได้ โดยมีการเกิดแรงกระทำหรืออันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอนุภาคและเมมเบรนอย่างใกล้ชิด ส่งผลให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กลง จึงกล่าวได้ว่าลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของฟาวลิ่งคือ ไม่สามารถใช้วิธีปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินการ เช่น การเพิ่มอัตราการไหลหรือปรับเปลี่ยนความดัน แต่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีการใช้สารเคมีเท่านั้น การเกิดฟาวลิ่งส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ในระยะเวลานานมากกว่าการเกิดคอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น การเกิดฟาวลิ่งสามารถเกิดได้หลายกลไกคือ มีการปิดกั้นรูพรุนหรือทางผ่านของเพอมิเอท (blocking) เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดความเข้มข้นที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความต้านทานการไหลเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งเกิดการอุดตัน (pluging) ภายในรูพรุนหรือการดูดซับเนื่องจากตัวถูกละลายหรืออนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้มีพื้นที่รูพรุนลดลง (Padilla-Zakour *et al.,* 1993; Zeman and Zydney, 1996)



(a) Concentration polarization



(b) Cake layer

ภาพที่1-2 ภาพจำลองอธิบาย (a) ปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น และ (b) การเกิดชั้นเค้กในกระบวนการเมมเบรนแบบไหลขวาง

Figure 1-2 Schematic description of (a) concentration polarization and (b) cake formation over a membrane surface in cross-flow filtration.

Belfort และคณะ (1994) ได้เสนอลำดับการเกิดฟาวลิ่งในระหว่างการกรองแบบไหลขวางของกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่น ของสารประกอบโปรตีน ดังนี้

ขั้นที่1 การดูดซับอย่างรวดเร็ว (Fast internal sorption of macromolecules) เมื่อสารป้อน (feed) เคลื่อนที่ ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกกักกันที่ผิวหน้าของเมมเบรนและอาจมีบางส่วนเข้าไปอุดตันในรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

ขั้นที่2 การก่อตัวเป็นชั้นเดี่ยวของโมเลกุลหรืออนุภาค (Build-up of first sublayer) ระหว่างขั้นตอนนี้สารแขวนลอยจะเริ่มเกาะติดที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นชั้นเดี่ยวของอนุภาคบนผนังเมมเบรน ในขั้นนี้จะมีผลต่ออัตราการไหลของเพอมิเอทเพียงเล็กน้อย โดยที่อนุภาคจะเข้าไปขัดขวางการไหลของเพอมิเอท

ขั้นที่3 การก่อตัวเป็นชั้น (Build-up of multisublayer) อนุภาคจะเริ่มจับตัวและมีความแข็งเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ของเพอมิเอทและความเข้มข้นของสารป้อน (bulk concentration) จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเคลื่อนของอนุภาคเข้าสู่ผนังเมมเบรน หรืออีกนัยหนึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นของชั้นอนุภาคบนผนังเมมเบรน ซึ่งจะทำให้ความเร็วของการไหลของเพอมิเอทมีค่าลดลง

ขั้นที่4 การเพิ่มความแนบแน่น (Densification of sublayers) หลังจากชั้นของอนุภาคหนาขึ้นจนถึงระดับที่ความหนาไม่เปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมิเอทจะลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคภายในชั้นอนุภาคของเมมเบรน การลดลงของฟลักซ์เพอมิเอทจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารป้อนมีค่าสูงขึ้น และสารละลายเริ่มมีคุณสมบัติการไหลแบบนอนนิวโตเนียน (non- Newtonian)

ขั้นที่ 5 การเพิ่มความเข้มข้นในสารป้อน (Increase in bulk viscosity) อนุภาคในสารป้อนจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และมีความเข้มข้นใกล้เคียงกับผิวหน้าเมมเบรนทำให้การไหลของเพอมิเอทจะเป็นการไหลแบบนอนนิวโตเนียน และมีการไหลผ่านเมมเบรนยากขึ้นจึงทำให้อัตราการไหลลดลง ในขั้นนี้จะเป็นการเกิดฟาวลิ่ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนของเมมเบรนได้

ในผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้การเกิดฟาวลิ่งยังเป็นปัญหาหลักที่มีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง สำหรับน้ำผลไม้องค์ประกอบที่ก่อให้เกิดฟาวลิ่งเป็นหลัก คือ องค์ประกอบของโปรตีน เซลล์จุลินทรีย์ องค์ประกอบของโพลีแซคคาไรด์ เช่น เพคติน เซลลูโลส ลิกนิน แทนนิน สตาร์ช และเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น (Kuberkar and David, 2000; Vaillant *et al.,* 2001)

บางครั้งมีการอธิบายว่า ฟาวลิ่งเป็นกระบวนการที่เกิดต่อเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชั่น โดยตัวถูกละลายจะเกิดเจลที่ผิวหน้าเมมเบรนและเกิดเป็นฟาวลิ่งต่อไป โดยชั้นของโพลาไรซ์

เปรียบเสมือนแหล่งของตัวถูกละลายที่จะค่อยๆ ยึดติดแน่นกับผิวเมมเบรนและจะหยุดลงเมื่อความต้านทานแรงเฉือนของชั้นฟาวลิ่งบนสุดน้อยกว่าแรงเฉือนเนื่องจากการไหลตามขวาง

อย่างไรก็ตาม คอนเซนเตรชั่นโพลาไรเซชั่น เจล กับฟาวลิ่ง ไม่สามารถแยกจากกันได้อย่างแท้จริง ด้วยการจำกัดนิยามด้วยการผันกลับหรือไม่ผันกลับ คืออาจจะมีฟาวลิ่งจำนวนเล็กน้อยที่สามารถผันกลับได้ ทั้งนี้เนื่องจากความจริงที่เมมเบรนทั่วไปไม่สามารถกักกันตัวถูกละลายได้ทั้งหมด ซึ่งอาจมีตัวถูกละลายบางส่วนมีการหลุดจากชั้นฟาวลิ่งในระหว่างการกรอง

1.5.3) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดฟาวลิ่ง

การเกิดฟาวลิ่งเป็นแรงกระทำระหว่างเมมเบรนและอนุภาคในสารละลายที่ป้อนเข้าสู่ระบบหรืออาจเกิดระหว่างอนุภาคในสารละลายด้วยกัน ซึ่งแต่ละองค์ประกอบในสารป้อนสามารถเกิดได้แตกต่างกัน

ปัจจัยทางการดำเนินการ เช่น ความเร็วตามขวางของสารป้อน ความดัน และอุณหภูมิ สามารถส่งผลกระทบต่อการเกิดฟาวลิ่งได้ ในที่นี้สามารถจำแนกได้ 3 สาเหตุโดยทั่วไป (Cheryan, 1998) คือ คุณสมบัติของเมมเบรน (Membrane material properties), คุณสมบัติของสารละลาย (Solute properties) ปัจจัยทางการดำเนินกระบวนการ (Operating parameter) โดยปัจจัยต่างๆ นี้ส่งผลต่อการเกิดฟาวลิ่งและการเกิดปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นในกระบวนการเมมเบรน

1.5.3.1) คุณสมบัติของเมมเบรน

การเลือกเมมเบรนในการใช้งานนั้นจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ทำการผลิตเมมเบรน ทั้งนี้การเลือกใช้วัสดุจะต้องเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์และการใช้งาน เพื่อป้องกันการเกิดฟาวลิ่งได้

1) คุณสมบัติการชอบน้ำ (Hydrophilicity)

การป้อนสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย การเลือกใช้เมมเบรนจะต้องเลือกเมมเบรนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) หากเมมเบรนมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สามารถทำให้องค์ประกอบในสารป้อนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ เช่น โปรตีน สามารถสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ง่าย

การศึกษาถึงคุณสมบัติชอบน้ำ สามารถใช้น้ำหยดที่ผิวหน้าเมมเบรน เพื่อหาค่ามุมประชิด (Contact angle) หากมุมของหยดน้ำมีค่าเท่ากับศูนย์หรือต่ำกว่า แสดงว่าเมมเบรนสามารถเลือกผ่านน้ำได้สูง เมมเบรนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่วนใหญ่ใช้แยกสารละลายที่มีองค์ประกอบของน้ำมัน (Cheryan, 1998)

ในผลิตภัณฑ์เบียร์ ไวน์ และน้ำผลไม้ จะประกอบด้วยโปรตีน และโพลีฟีนอล (polyphenol) อันเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความขุ่น และสามารถเกิดฟาวลิ่งในระหว่างการกรองได้ ดังนั้นการเลือกใช้ชนิดของเมมเบรนที่มีคุณสมบัติที่ชอบน้ำให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์

หรือสารที่นำมากรอง สามารถทำให้เกิดฟาวลิ่งและความต้านทานการไหลของเพอมิเอทนี้ลดน้อยลงได้ (Czekaj *et al.,* 2001)

2) ลักษณะผิวหน้าเมมเบรน (Surface topography)

ลักษณะของผิวหน้าเมมเบรนเป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดฟาวลิ่ง กล่าวคือหากผิวหน้าเมมเบรนมีลักษณะราบเรียบการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้ามีน้อย ในทางตรงข้ามหากเมมเบรนมีลักษณะผิวหน้าขรุขระไม่สม่ำเสมอ อาจทำให้ตัวถูกละลายหลุดออกจากพื้นผิวได้ยากการเกิดฟาวลิ่งจึงมีโอกาสเกิดได้สูงกว่า (Cheryan, 1998)

3) ประจุของแผ่นเมมเบรน (Charge on membrane)

เมมเบรนส่วนใหญ่แสดงสมบัติเป็นประจุลบซึ่งประจุของแผ่นเมมเบรนสำคัญต่อกระบวนการ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างเมมเบรนและประจุของอนุภาค เช่น หากเมมเบรนมีประจุลบและอนุภาคในสารป้อนเป็นประจุบวกทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรน เนื่องจากแรงกระทำระหว่างประจุ ส่งผลให้ที่ผิวหน้าเมมเบรนเกิดการสะสมของอนุภาคหรือก่อตัวเป็นชั้นที่สามารถกักกันการไหลของเพอมิเอทได้ (Cheryan, 1998)

4) ขนาดของรูพรุน (Pore size)

ขนาดของรูพรุนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ได้ โดยเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะมีฟลักซ์ในช่วงแรกสูงกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กและหนาแน่น เมื่อเวลาผ่านไปฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากมีอนุภาคปิดหรือสะสมภายในรูพรุน ส่งผลให้พื้นที่ของรูพรุนลดลง

การศึกษาถึงขนาดของรูพรุนต่อการเกิดฟาวลิ่งยังเป็นปัจจัยที่มีความสนใจสูง ทั้งนี้เพื่อเลือกใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดฟาวลิ่งต่ำที่สุด เช่นกระบวนการกรองน้ำแอปเปิ้ลโดยใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชั่นและไมโครฟิลเตรชั่นที่มีขนาดรูพรุน 0.02 และ 0.1 μm พบว่า ในเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะมีการลดลงของฟลักซ์มากกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กเพราะมีองค์ประกอบขนาดเล็ก เช่น แทนนิน จุลินทรีย์ เข้าไปสะสมภายในรูพรุน (Fukumoto *et al.,* 1998)

ดังนั้นการเลือกใช้เมมเบรนที่มีคุณสมบัติต่างๆ ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่นำเข้ากระบวนการกรองนั้นจึงมีความจำเป็นมากในการดำเนินกระบวนการกรอง ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการเกิดฟาวลิ่ง และสามารถทำให้สมรรถนะของกระบวนการมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.5.3.2) คุณสมบัติของสารป้อน

การเกิดฟาวลิ่งเป็นผลมาจากแรงกระทำระหว่างเมมเบรนและองค์ประกอบในสารป้อนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่ง ที่ใช้ในการพิจารณาถึงการเลือกใช้เมมเบรนและการดำเนินสภาวะ

ของกระบวนการ สาเหตุส่วนใหญ่ของการเกิดฟาวลิ่งเนื่องจากสารป้อนเกิดได้จากองค์ประกอบต่างๆ เช่น

1) โปรตีน

โปรตีนเป็นปัญหาหลักที่สำคัญของกระบวนการเมมเบรน ทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนมีโครงสร้างหลายรูปแบบ เช่นทุติยภูมิ (Secondary structure), ตติยภูมิ (Tertiary structure) เป็นต้น และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ และความหนาแน่นของประจุในโมเลกุลของโปรตีน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดฟาวลิ่ง อีกทั้งค่าพีเอช (pH), ความแรงของประจุ (ionic strength), แรงเฉือน (shear), การใช้ความร้อนและปัจจัยต่างๆ สามารถทำให้โปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดแรงกระทำต่อเมมเบรนและส่งผลให้ฟลักซ์ลดลง (Cheryan, 1998)

2) เกลือ

เกลือและองค์ประกอบของเกลือ ส่งผลต่อกระบวนการเมมเบรน โดยเกลือสามารถตกตะกอนองค์ประกอบและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนได้ และสามารถเกิดแรงกระทำเนื่องจากประจุกับเมมเบรนและส่งผลให้มีความต้านทานการไหลของเพอมิเอทเพิ่มขึ้น (Youravong *et al.,* 2002)

3) พีเอช

ระดับพีเอช (pH) มีผลต่อค่าไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point, pI) ของโปรตีน และการเปลี่ยนแปลงของพีเอช มีผลต่อความสามารถในการละลายและโครงสร้างของสารป้อน ซึ่งโปรตีนจะให้ฟลักซ์ต่ำสุดที่จุด pI เนื่องจากโปรตีนมีการรวมตัวกัน และตกตะกอนสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนเกิดเป็นชั้นฟาวลิ่งขึ้น

เช่นในกระบวนการแยกโปรตีนโบวีนเซรั่มอัลบูมิน (Bovine serum albumin, BSA) และ โปรตีนจากเลือดคน (Human serum albumin, HSA) ซึ่งมีจุด pI = 4.8 เมื่อสารป้อนมี pH ใกล้เคียงจุด pI ทำให้ ฟลักซ์มีค่าต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบที่พีเอชสูงหรือต่ำกว่า (Su *et al.,* 2000)

4) น้ำมันและไขมัน

เนื่องจากน้ำมันและไขมันมีสมบัติเป็นไม่ชอบน้ำ ดังนั้นหากใช้เมมเบรนที่มีสมบัติเป็นไม่ชอบน้ำ มาทำการแยกองค์ประกอบที่มีไขมันเจือปน สามารถทำให้เกิดการเคลือบหรือการสะสมของน้ำมันและไขมันที่ผิวหน้าเมมเบรน ส่งผลให้ฟลักซ์ลดลงได้ (Cheryan, 1998)

1.5.3.3) การดำเนินกระบวนการ

1) อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อฟลักซ์และการเกิดฟาวลิ่ง ในการกรองที่อุณหภูมิต่ำฟลักซ์มีการลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดและความสามารถในการละลายของสารป้อนเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันบางผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์นม การเพิ่มอุณหภูมิสูง

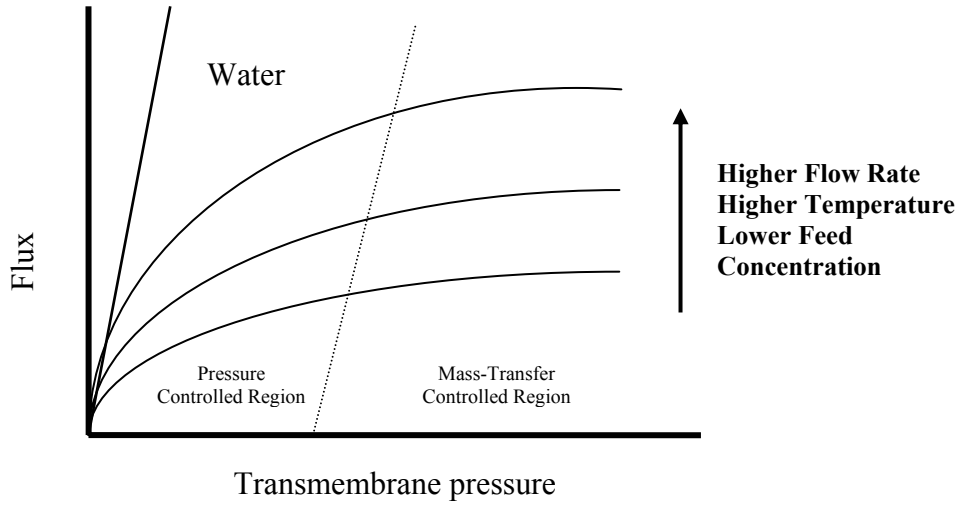
องค์ประกอบโปรตีนเกิดการเสื่อมสภาพ และถูกทำลายด้วยความร้อน ทำให้ความสามารถในการละลายลดลง และมีการสะสมบริเวณผิวหน้าเมมเบรนมากขึ้น (Brandsma and Rizvi, 1999)

2) อัตราการไหลและลักษณะการไหล

อัตราการไหลและลักษณะการเคลื่อนที่ของสารป้อนภายในเมมเบรน มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์และสามารถลดการเกิดฟาวลิ่งได้ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (turbulence flow) มีแรงเฉือนสูง ทำให้การแพร่กลับของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนมีมากขึ้นการสะสมของอนุภาคจึงลดลง มีผลต่อการเกิดฟาวลิ่งเพราะสามารถลดการเกาะตัวของตัวถูกละลายได้ดังเช่นในการดำเนินการกรองน้ำเสาวรสโดยใช้เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชั่น เมื่อมีการเพิ่มความเร็วของสารป้อนทำให้ลดการเกิดคอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นและมีการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์เพอมิเอทเพิ่มสูงขึ้น (Jiraratanon and Chanachai, 1996)

3) ความดัน

ในกระบวนการเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชั่นและไมโครฟิลเตรชั่น เป็นการดำเนินกระบวนการโดยอาศัยความดันเป็นแรงขับสารป้อน เมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่ง แต่เมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้น ฟลักซ์จะมีการลดลง และคงที่ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความดันจะมีผลทำให้อนุภาคและคอลลอยด์มีการอัดตัวแน่นขึ้น ซึ่งช่วงการเกิดปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นและการเกิดฟาวลิ่งซึ่งเป็นช่วงไม่ขึ้นกับความดัน (independent of pressure) (Balakrishman *et al.,* 2000; Girard and Fukumoto., 2000)



ภาพที่ 1-3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สภาวะการดำเนินการกับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์

Figure 1-3 Relationship between flux and operating parameters during membrane filtration.

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง และการดำเนินการกรองนั้น การคำนึงและการใช้ระดับความดันให้เหมาะสม เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายได้

1.5.4) กลไกการเกิดฟาวลิ่ง (Fouling mechanism)

เนื่องจากในกระบวนการเมมเบรนเป็นการใช้ความดันในการขับเคลื่อนสารป้อนผ่านเมมเบรน ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในระหว่างการกรองคือ การเกิดฟาวลิ่งซึ่งจะส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพของเมมเบรนในระยะยาว โดยกระบวนการสะสมของฟาวลิ่งสามารถเกิดได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้นการเข้าใจถึงปรากฏการณ์และกลไกของการเกิดฟาวลิ่งจึงเป็นสิ่งจำเป็นเป็นอย่างมาก เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการกรองเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องโดยแบบจำลองที่ยอมรับกันมากในกระบวนการเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชั่นและไมโครฟิลเตรชั่น คือแบบจำลองที่เกี่ยวกับการกรองภายใต้สภาวะความดันคงที่ สามารถแบ่งกลไกการอุดตันและการเกิดฟาวลิ่งไว้ 4 ลักษณะคือ Standard blocking model (SBM), Intermediate blocking model (IBM), Complete blocking model (CBM) และ Cake filtration model (CFM) ซึ่งกลไกการเกิดฟาวลิ่งดังกล่าวมีข้อจำกัดภายใต้สภาวะความดันคงที่และใช้ในสารป้อนมีคุณสมบัติแบบนอนนิวโตเนียน (Hermia, 1982; Prádanos *et al.,* 1996) ซึ่งมีสมการพื้นฐานคือ

$$\frac{d^2t}{dV^2} = k\left(\frac{dt}{dV}\right)^n \qquad [1.7]$$

เมื่อ t = เวลาการกรอง (s)

V = ปริมาตรของเพอมิเอท (m^3)

k = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่ง

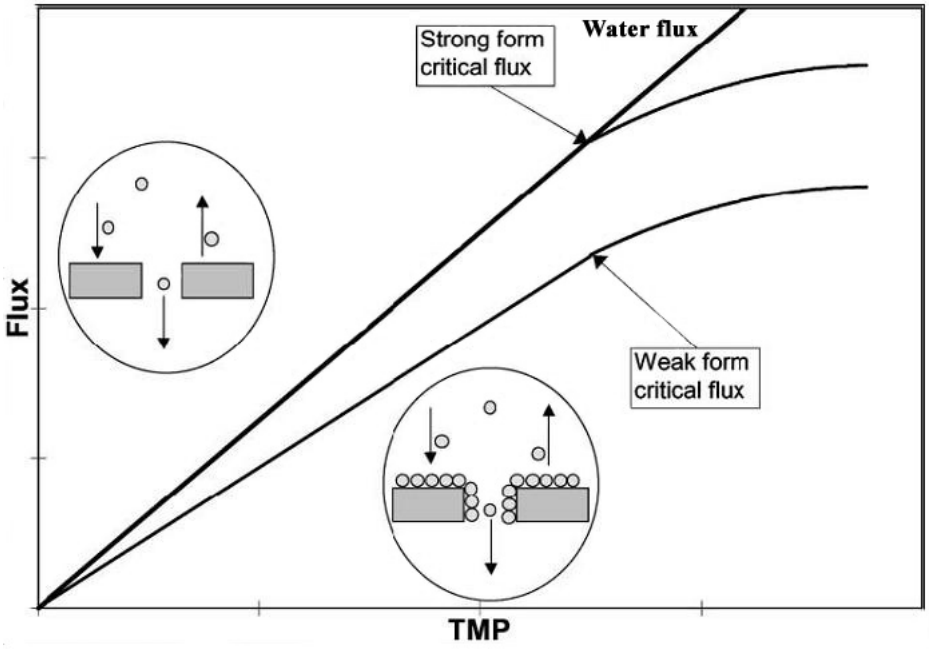
n = ตัวแปรของแบบจำลองต่างๆ (CBM=2, IBM=1, SBM 1.5, CFM= 0)

โดยลักษณะของการเกิดฟาวลิ่งในรูปแบบต่างๆ ขึ้นกับหลายปัจจัย อาทิเช่น ขนาดอนุภาคของสารป้อน คุณสมบัติของสารป้อน ชนิดและวัสดุเมมเบรน สภาวะการดำเนินการกรอง เป็นต้น โดยการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการเกิดฟาวลิ่งส่วนใหญ่สามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะใหญ่ๆ คือ (i) การเกิดฟาวลิ่งภายในรูพรุน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลอง SBM และ IBM (ii) ฟาวลิ่งบนผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลอง CBM และ CFM ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3 ต่อไป

1.6) ค่าฟลักซ์วิกฤต (Critical flux, J_{cr})

ในการดำเนินกระบวนการเมมเบรนด้วยระบบอัลตราฟิลเตรชั่นและไมโครฟิลเตรชั่น จะเกิดปัญหาของการสะสมหรืออุดตันเนื่องจากอนุภาคทั้งที่ผิวหน้าหรือภายในรูพรุนของเมมเบรน ดังนั้น จึงมีการศึกษาถึงกระบวนการและสภาวะการดำเนินการเพื่อหลีกเลี่ยง ป้องกัน หรือลดการเกิดฟาวลิ่งในรูปแบบต่างๆ เช่นการใช้สารทำความสะอาด การควบคุมปัจจัยต่างๆ ของสารป้อน หรือการเลือกใช้เมมเบรน เป็นต้น วิธีการหลีกเลี่ยงการเกิดฟาวลิ่งสามารถใช้หลักการ "ค่าฟลักซ์วิกฤต" การดำเนินกระบวนการเมมเบรนโดยให้ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอทมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับจุดฟลักซ์วิกฤตสามารถป้องกันและลดการเกิดฟาวลิ่งได้ เพราะจุดวิกฤตนี้เป็นจุดที่ฟลักซ์ของเพอมิเอทที่ทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดชั้นเค้กซึ่งเป็นฟาวลิ่งรูปแบบผันกลับได้ ซึ่งส่งผลต่อการการเพิ่มขึ้นของความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่งและทำให้ค่าความดันขับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความดันขับในระบบสูงขึ้นด้วย (Field *et al.,* 1995; Huisman *et al.,* 1999; Metsämuuronen *et al.,* 2002) Wu และคณะ (1999) ได้เสนอรูปแบบของค่าฟลักซ์วิกฤต 2 รูปแบบคือ "แบบระดับเข้ม" (Strong form) ซึ่งค่าฟลักซ์วิกฤตจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดในทุกๆ ความดันขับและ "แบบระดับอ่อน" (Weak form) โดยค่าฟลักซ์วิกฤตที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขับและค่าฟลักซ์จะมีลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง แต่ความชันของกราฟจะมีความแตกต่างจากค่าฟลักซ์ของน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 1-4

การศึกษาถึงค่าฟลักซ์วิกฤตนี้ได้มีผู้วิจัยทำการศึกษาหลายรูปแบบ เช่น การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ กับความดันขับ (TMP) โดยมีการเพิ่มความดันขับขึ้นทีละน้อยและทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท หรือทำการเพิ่มค่าฟลักซ์ขึ้นเป็นลำดับแล้วทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความดันขับที่สูงขึ้น หรือการใช้กล้องติดตามการเปลี่ยนแปลงหรือการสะสมของอนุภาคที่เกิดที่ผิวหน้าเมมเบรนโดยตรง (Li *et al.,* 1998) ค่าฟลักซ์วิกฤต ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ธรรมชาติและความเข้มข้นของสารป้อน, แรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรน และชนิดของเมมเบรน เป็นต้น (Huisman *et al.,* 1999)



ภาพที่ 1-4 ฟลักซ์วิกฤตรูปแบบระดับเข้มและแบบระดับอ่อน

Figure 1-4 Schematic representation of a weak form and a strong form critical flux.

การศึกษาค่าฟลักซ์วิกฤตมีการใช้สารป้อน เช่น เซลล์ยีสต์, โปรตีน (BSA), ไมโอโกบูลิน, ซิลิกา และสารแขวนลอยของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น (Huisman *et al.,* 1999; Fradin and Field 1999; Wu *et al.,* 1999; Metsämuuronen *et al.,* 2002)

การนำหลักการค่าฟลักซ์วิกฤตมาประยุกต์ใช้นั้น ได้มีการนำเสนอกับหลายผลิตภัณฑ์ เช่น ในการบำบัดน้ำทิ้งจากการผลิตกระดาษ (Mänttäri and Nystöm, 2000) ผลิตภัณฑ์นมพร่องมันเนย (Skim milk) (Gésan-Guiziou *et al.,* 1999) และผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ ได้มีการศึกษาของ Sulaiman และคณะ (1998) โดยนำหลักการของค่าฟลักซ์จำกัด (Limiting flux) เข้ามาควบคุมการเกิดคอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น และลดการเกิดฟาวลิ่งในผลิตภัณฑ์น้ำมะเฟือง โดยค่าฟลักซ์จำกัดนี้มีความใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์วิกฤต แต่ค่าฟลักซ์จำกัดจะเป็นช่วงที่เกิดเป็นชั้นเค้กและฟลักซ์ของเพอมิเอทค่อนข้างคงที่ การลดและควบคุมปรากฏการณ์การเกิดการสะสมของฟาวลิ่งดังกล่าวสามารถกระทำโดยดำเนินระบบการกรองให้ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอทให้มีค่าต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต แต่กระนั้นการนำกระบวนการเมมเบรนมาใช้กับผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ต้องมีการศึกษาเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำผลไม้ประกอบด้วยคอลลอยด์และองค์ประกอบอินทรีย์สูงจึงทำให้ค่าฟลักซ์วิกฤตที่ได้มีค่าต่ำ ส่งผลต่อต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการดูแลรักษาเมมเบรนเป็น อย่างมาก (Grandison *et al.,* 2000)

1.7) การประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรนในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้

การนำกระบวนการเมมเบรนเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมเริ่มมีมาตั้งแต่ ค.ศ. 1970 โดยกระบวนการเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น ได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นสามารถกรองโปรตีน ของแข็งแขวนลอย คอลลอยด์ สารประกอบโพลีฟีโนลิก แป้ง เพคติน และจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในผลไม้ ส่วนใสที่ได้จากการกรองจะมีความคงตัวแม้ในช่วงการเก็บรักษา ในยุคแรกของการนำเอากระบวนการเมมเบรนมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ เพื่อใช้แทนในขั้นตอนการแยกตะกอนของสารช่วยตกตะกอนและมีการใช้กระบวนการดังกล่าวทดแทนขั้นตอนต่างๆ เพิ่มขึ้น เช่นในขั้นตอนสเตอริไรท์ การแยกกาก เป็นต้น ทำให้ในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก นอกจากนี้กระบวนการทำน้ำผลไม้ให้ใสด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นได้เริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความใสและมีคุณภาพมากกว่าการทำให้ใสโดยวิธีการอื่นๆ อีกทั้งเป็นการลดปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำผลไม้โดยใช้ความร้อนต่ำ (Cold sterilization) (Girard and Fukumoto, 2000)

ตัวอย่างน้ำผลไม้ที่มีการใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น เช่น การผลิตน้ำแอปเปิ้ล, การผลิตน้ำเสาวรส, การผลิตน้ำแครนเบอร์รี่ เป็นต้น

การเลือกใช้กระบวนการเมมเบรนเข้ามาในการแปรรูปผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้และเครื่องดื่ม มีประโยชน์ในด้านต่างๆ อาทิเช่น

1) สามารถลดขั้นตอนการทำให้ผลิตภัณฑ์มีความใส

ในการกรองแบบเดิมต้องการสารช่วยจับตะกอน เช่น เบนโทไนท์ เจลาติน เอนไซม์ เป็นต้น และมีขั้นตอนการแยกเอาตะกอนออก ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะใช้เวลานาน แต่ในกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีความใสได้ในระยะสั้นกว่ามาก

2) ปริมาณน้ำผลไม้เพิ่มขึ้น

การใช้กระบวนการเมมเบรนจะมีปริมาณผลผลิตสุดท้ายมากกว่าร้อยละ 90 เนื่องจากเมมเบรนสามารถลดขั้นตอนในการผลิตและขั้นตอนการใช้สารกรอง ทั้งนี้ในกระบวนการกรองแบบดั้งเดิมจะใช้ผงหรือสารกรอง ทำให้สารกรองดูดซับน้ำผลไม้บางส่วนเอาไว้ และไม่สามารถแยกออกมาได้

3) ลดการใช้สารกรองหรือสารดูดซับ

เนื่องจากในขั้นตอนนี้สามารถก่อให้เกิดของเสียเป็นจำนวนมาก และสูญเสียปริมาณของผลิตภัณฑ์สูงหากมีการใช้เมมเบรนเข้ามาทดแทนในขั้นตอนสามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ได้สูงกว่า

4) คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้น

เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนสามารถกำจัดสารประกอบที่ทำให้เกิดตะกอนและของแข็งที่ละลายน้ำได้ อนุภาคคอลลอยด์ โปรตีน ในน้ำผลไม้ได้ดีกว่ากระบวนการกรองเดิม คือ น้ำผลไม้มีความขุ่นลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้รับการยอมรับมากขึ้น

5) ลดการใช้เอนไซม์

โดยสามารถลดการใช้เอนไซม์เพคติเนส เพื่อใช้ในการย่อยโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น แป้ง เพคติน ให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กก่อนการกรองเพื่อช่วยลดการอุดตันของเมมเบรนและลดความหนืดของน้ำผลไม้ ส่งผลให้ฟลักซ์ของเพอมิเอทที่ได้มีค่าสูงขึ้น และสามารถนำเอนไซม์ที่ใช้นั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่ำ จึงสามารถลดการทำลายเอนไซม์

6) ลดขั้นตอนการฆ่าเชื้อ

ในการใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็ก สามารถกรองหรือแยกเชื้อจุลินทรีย์ได้และเป็นการลดพลังงานจากขั้นตอนการฆ่าเชื้อที่ต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงและผลจากการไม่ใช้อุณหภูมิสูงนี้ ส่งผลให้กลิ่นรสเฉพาะตัวของน้ำผลไม้ยังอยู่

7) เพิ่มความเข้มข้น

เนื่องจากสามารถเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ได้โดยไม่ต้องเพิ่มอุณหภูมิ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีกลิ่นไหม้ เหมือนการดำเนินการโดยระบบการทำให้เข้มข้นโดยทั่วไป และสีของผลิตภัณฑ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และสามารถกำหนดความเข้มข้นที่แน่นอนได้

2. ตาลโตนด

2.1) แหล่งของตาลโตนด

ต้นตาลโตนดเป็นพืชตระกูลปาล์มมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Borassus flabellifer Linn.* สามารถพบได้ในเขตร้อนทั่วไปในประเทศอินเดีย ไทย พม่า กัมพูชา และศรีลังกา สำหรับประเทศไทยต้นตาลโตนดสามารถพบได้ในหลายจังหวัด เช่นจังหวัดเพชรบุรี สุพรรณบุรี ชัยนาท นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี สงขลา เป็นต้น ในบางจังหวัดนั้น เช่น จังหวัดเพชรบุรี ได้มีการอนุรักษ์และมีการส่งเสริมให้ปลูกต้นตาลโตนด เนื่องจากจำนวนของต้นตาลโตนดลดน้อยลง จากการสำรวจของสำนักงานเกษตรจังหวัดสงขลา ปี 2542 (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544) ได้รายงานว่าในจังหวัดสงขลามีจำนวนต้นตาลโตนดมากกว่า 3 ล้านต้น ครอบคลุมพื้นที่ในจังหวัดสงขลา อีกทั้งยังมีการส่งเสริมให้มีการปลูกต้นตาลโตนดเพื่อเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรในพื้นที่ลุ่มรอบทะเลสาบสงขลา

ตาลโตนดที่พบในประเทศไทยมีสองสายพันธุ์ คือ พันธุ์ผลสีดำ (Black skin) หรือตาลโตนดกา และพันธุ์ที่มีผลสีแดง (Red skin) หรือตาลโตนดข้าว ทั้งสองสายพันธุ์มีลักษณะทางสรีระวิทยาใกล้เคียงกัน แต่พบว่าพันธุ์ที่มีผลสีแดงจะให้ผลผลิตสูงกว่า และมีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าพันธุ์ที่มีผลสีดำเล็กน้อย (Kovoor, 1983; Paiboon Thammaratwasik *et al.,* 1986)

2.2)การใช้ประโยชน์จากตาลโตนด

กีย์ เทรบุลย์ (2526) รายงานว่า มีการใช้ลำต้นไปทำเครื่องใช้ เครื่องเรือน การก่อสร้าง เชื้อเพลิง แป้งสาคู และกาว เป็นต้น ประโยชน์ของตาลโตนดมีมากมาย ทุกชิ้นส่วนของตาลโตนดล้วนแล้วแต่มีประโยชน์ทั้งสิ้น พอจะจำแนกคุณประโยชน์ได้คร่าวๆ ดังนี้

2.2.1) ใบ

สมัยโบราณได้ใช้ใบตาลแทนกระดาษเขียนหนังสือ นอกจากนี้ยังใช้ใบตาลทำพัด ทำหมวก และเครื่องจักสาน เป็นต้น

2.2.2) งวงตาล

งวงตาล เป็นส่วนของช่อดอก ใช้ผลิตเป็นน้ำตาลโตนด ใช้ต้มเพื่อรักษาตาลขโมยในเด็ก น้ำตาลใช้ทำน้ำส้มสายชู ผลิตน้ำตาลแอลกอฮอล์

2.2.3) ลำต้น

ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ โต๊ะ เก้าอี้ ลำต้นตาลแก่ๆ จะมีเนื้อไม้ที่แข็งสามารถแช่น้ำได้เป็นเวลานานโดยไม่ผุง่าย จึงนิยมใช้ทำเสาบ้าน เสาเทียบเรือ หรือ ใช้เป็นทุ่นให้หอยนางรมเกาะในการเพาะเลี้ยงหอยนางรม

2.2.4) ผล

ส่วนที่สามารถนำมาบริโภคได้มีประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของผล การถนอมรักษาอาหารทำได้โดยการย่างไฟ หรือตากแดด ผลตาลอ่อน สามารถนำมาประกอบอาหาร ส่วนผลที่ใกล้แก่จะถูกนำมาเฉาะเอาเมล็ดที่อ่อนออกมา เรียกว่า “ลอนตาล” เพื่อรับประทานสด หรือนำมาประกอบเป็นของหวาน

เนื้อในเมล็ดที่เรียกว่าลอนตาลจะมีลักษณะเป็นวุ้น (ส่วน gelatinous endosperm) สามารถนำมาบริโภคสดหรือนำมาเชื่อม แต่เนื่องจากเก็บไว้ไม่ได้นาน จึงนำมาบรรจุกระป๋องปัจจุบันกำลังเป็นที่นิยมมากขึ้น (สุกัญญา จันทะชุม, 2540; กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544)

2.3)วิธีการเก็บเกี่ยวและผลผลิตน้ำตาลโตนด

น้ำตาลโตนดได้จากช่อดอกของตัวผู้ซึ่งเรียกว่า งวงตาล หรือ ช่อดอกของตัวเมีย เนื่องจากต้นตาลโตนดเป็นพืชที่แยกกันระหว่างต้นตัวผู้กับตัวเมียมีกรรมวิธีการทำหลายขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรก ต้องใช้ “ไม้คาบตาล” นวดงวงตาล (ส่วนของช่อดอกตัวผู้และตัวเมีย) วิธีการนวดมีวิธีการที่คล้ายกัน จะแตกต่างกันเฉพาะไม้นวดช่อดอกซึ่งไม้นวดช่อดอกของตัวผู้จะใช้ไม้นวดที่แบนและสั้นกว่า ส่วนของต้นตัวเมียจะใช้ไม้กลมและยาวกว่า ขั้นที่สอง ใช้ “มีดปาดตาล” ปาดบางๆ ทุกๆวัน วันละ 2 ครั้ง คือช่วงเช้าแล้วรอให้น้ำหวานหยดใส่ภาชนะที่ไปรองรับไว้อาจจะเป็นกระบอกไม้ไผ่ หรือกระบอกพลาสติก ประมาณ 8-10 ชั่วโมง แล้วขึ้นไปเก็บพร้อมกับใช้มีดปาดใหม่อีกครั้งและไปเก็บอีกตอนเย็น วนเวียนอยู่อย่างนี้จนกว่าช่อดอกที่ปาดจะหมด หรือปริมาณน้ำตาลลดลงมากจะนานประมาณ 3-4 เดือน ต้นตาลโตนดต้นหนึ่งจะมีช่อดอกประมาณ 3-5 ช่อ ให้น้ำหวานเฉลี่ยวันละ 20-40 ลิตร (2 ครั้ง) (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544; Borin, 1996)

การไหลของน้ำตาลสดในช่วงเวลากลางคืนจะไหลเร็วกว่าเวลากลางวัน และในสภาพภูมิอากาศมีเมฆฝนจะมีผลให้น้ำตาลไหลมากกว่าสภาพท้องฟ้าโปร่งมีแดด นอกจากนี้การไหลของน้ำตาลสดในฤดูฝนจะเพิ่มขึ้นกว่าในฤดูแล้ง (Okafor, 1984)

การรองรับน้ำตาลสดจากต้นตาลโตนดสามารถทำได้เกือบทั้งปี โดยปกติจะเริ่มประมาณปลายเดือนธันวาคมของทุกปี เนื่องจากปริมาณฝนเริ่มลดลงและงวงตาลหรือช่อดอกของต้นตาลโตนดจะเจริญเติบโตเต็มที่ในช่วงนี้ ส่วนระยะเวลาการเก็บเกี่ยวจะสิ้นสุดปลายฤดูแล้งประมาณเดือนเมษายนหรือเดือนพฤษภาคมขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละปีหลังจากนั้นจะมีช่อดอกให้ปาดเพื่อรองรับน้อยลง

ในประเทศกัมพูชาน้ำตาลสดจะให้ผลผลิตน้ำตาลสดมากในช่วงเดือนมกราคมถึงพฤษภาคม และมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดประมาณ 12.6-14.1 องศาบริกซ์ (°Brix) ซึ่งต้นตาลโตนดเพศเมียจะให้ปริมาณน้ำตาลสดมากกว่าต้นตาลเพศผู้ (ตารางที่1-3) (Borin, 2002)

ตารางที่1-3 ปริมาณของน้ำตาลโตนดและปริมาณองค์ประกอบของแข็งที่ละลายได้ในน้ำตาลโตนดที่เก็บในประเทศกัมพูชา

Table 1-3 Fresh sugar palm sap and total soluble solid in Combodian

Month	Juice (kg/tree/day)	Total soluble solid (ºBrix)
January	4.7	12.6
February	5.7	12.6
March	5.2	13.5
April	5.1	13.6
May	4.2	14.1

ที่มา: Borin (2002)

ตารางที่ 1-4 เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลโตนดและปริมาณองค์ประกอบของแข็งที่ละลายได้ในน้ำตาลโตนดแต่ละเพศ

Table 1-4 Juice yield and total soluble solid by sex of trees

Sex of trees	Juice (kg/tree/day)	Total soluble solid (ºBrix)
Female	5.3	13.4
Male	4.7	13.2

ที่มา: Borin (2002)

2.4)องค์ประกอบของน้ำตาลโตนด

4.1) องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมี

สุกัญญา จันทะชุม (2540) น้ำตาลโตนดมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ น้ำตาลซูโครสร้อยละ 13-17 โปรตีนร้อยละ 0.02-0.03 การเก็บเกี่ยวน้ำตาลสดจากสวนเกษตรกรในเขตอำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา โดยใช้ไม้เคี่ยมเป็นวัตถุกันเสีย ใช้เวลารองรับประมาณ 14 ชั่วโมง พบว่าน้ำตาลสดที่ได้มี pH 4.96 กรดซิตริกร้อยละ 0.098 น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 0.78 น้ำตาลทั้งหมดร้อยละ 11.54 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 13.93 ± 1.48 องศาบริกซ์

เรณุกา แจ่มฟ้า (2545) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำตาลโตนดสดอายุเก็บเกี่ยว 12 ชั่วโมงที่ใส่ไม้พะยอมและไม่ใส่พะยอมไว้ ดังตารางที่ 1-5

ตารางที่1-5 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำตาลโตนดที่ใส่และไม่ใส่เปลือกไม้พะยอม

Table 1-5 Chemical properties of fresh palm sap with and without Payom wood added

Chemical properties*	Fresh palm sap with Payom wood	Fresh palm sap without Payom wood
pH	5.09	4.15
Vitamin C (mg/ml)	0.084	0.088
Total Soluble solid (ºBrix)	13.8	14.2
Total sugar (%)	2.34	13.11
Moisture content (%)	84.47	84.65
Acidity (%w/v as citric acid)	0.036	0.131
Protein (%)	0.37	0.32
Ash (%)	1.04	1.00

Note: *Plam sap was collected after 12 hours of harvesting and kept under cold temperature until analysis.

ที่มา : เรณุกา แจ่มฟ้า (2545)

Child (1974) รายงานน้ำตาลโตนดนั้นจะประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมี คือ ของแข็งทั้งหมด (Total solid) 15.2-19.7 g/100ml, น้ำตาลซูโครส 12.3-17.4 g/100ml, เถ้า 0.11-0.41 g/100ml และโปรตีน 0.23-0.32 g/100ml นอกจากนี้มีการศึกษาของ Borin (1996) ถึงองค์ประกอบบางส่วนในน้ำตาลโตนดที่เก็บมาจากเมืองต่างๆ ในประเทศกัมพูชา ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละเดือน คือ ในช่วงเดือนมกราคม จะมีองค์ประกอบของน้ำตาลโตนด คือ เถ้า 1.4% น้ำหนักแห้ง ซูโครส 81.6% น้ำหนักแห้ง กลูโคส 6% น้ำหนักแห้ง ฟรุกโตส 7.2% น้ำหนักแห้ง และคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 95.6% น้ำหนักแห้ง ส่วนในเดือนเมษายนจะมีองค์ประกอบของน้ำตาลโตนด คือ เถ้า 1.4 % น้ำหนักแห้ง ซูโครส 70.4 % น้ำหนักแห้ง กลูโคส 10%น้ำหนักแห้ง ฟรุกโตส 7.2 % น้ำหนักแห้ง และคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 93.5 % น้ำหนักแห้ง

เสาวลักษณ์ จิตรบรรเจิดกุล (2532) ศึกษาองค์ประกอบน้ำตาลโตนดสดโดยเปรียบเทียบน้ำตาลโตนดที่ไม่ใช้สารกันบูด น้ำตาลโตนดสดที่ใช้ไม้เคี่ยมเป็นสารกันบูดและน้ำตาลโตนดสดที่ใช้สารเคมีเป็นสารกันบูดไว้ดังตารางที่ 1-6

ตารางที่1-6 สมบัติทางเคมีของน้ำตาลโตนด

Table 1-6 Chemical properties of fresh palm sap

Chemical proprety	Fresh palm sap*	Kiam wood**	Preservative***
pH	7.55 ± 0.35	4.69 ± 0.27	5.10 ± 0.11
Acidity (% as citric acid)	0.068 ± 0.003	0.098 ± 0.013	0.074 ± 0.005
Reducing sugar (%)	-	0.78 ± 0.04	0.67 ± 0.05
Total sugar (%)	13.48 ± 1.31	11.54 ± 0.45	12.95 ± 0.19
Reducing sugar/total sugar ratio	-	0.067 ± 0.013	0.053 ± 0.010
Total soluble solid (ºBrix)	13.70 ± 0.99	13.93 ± 1.48	13.48 ± 0.93

Note: * Chemical analysis was done after 2 hours of collecting palm sap

** Kiam wood was added in a container which was collected palm sap.
Chemical analysis was done after 14 hours of collecting palm sap.

*** Chemical preservative (potassium metabisulfite and sodium benzoate 0.45 g/l) was added in a container which collected palm sap.
Chemical analysis was done after 14 hours of collecting palm sap.

ที่มา : เสาวลักษณ์ จิตรบรรเจิดกุล (2532)

4.2) องค์ประกอบทางจุลินทรีย์

น้ำตาลโตนดสดเป็นเครื่องดื่มที่มีคุณค่าทางอาหารสูง มีวิตามินและแร่ธาตุ เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์หลายชนิด จุลินทรีย์จึงเข้ามามีบทบาทต่อคุณภาพของน้ำตาลสด จากการที่ต้องใช้เวลานานในการรองรับน้ำตาลสดแต่ละครั้งทำให้จุลินทรีย์ต่างๆ มีโอกาสเจริญเพิ่มจำนวนมากขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่รองรับน้ำตาลสด ทำให้น้ำตาลสดเปลี่ยนแปลงไป คือมีรสเปรี้ยว เป็นเมือก เป็นฟอง และปริมาณน้ำตาลลดลง จุลินทรีย์ที่สำคัญมี 2 พวกใหญ่ๆ คือ แบคทีเรียและยีสต์ จุลินทรีย์เหล่านี้ปนเปื้อนในน้ำตาลสดได้โดยการแพร่กระจายมาจากส่วนของช่อดอก แมลง หรือสิ่งแวดล้อมรอบๆบริเวณที่ทำการรองรับน้ำตาลโตนด

แบคทีเรียในน้ำตาลสดส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) Okafor (1984) ศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียที่พบในน้ำตาลโตนด เช่น *Micrococcus, Leuconostoc, Streptococcus, Lactobacill*us และ *Acetobactor* และแบคทีเรียอื่นๆ ที่พบได้แก่ *Serratia, Bacillus,*

Zymomonas และ *Brevibacteria* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแลคติค แกรมลบ สามารถสร้างกรดทำให้ pH ลดจาก 7.0 เหลือ 4.5 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Faparusi (1973) ถึงแบคทีเรียในน้ำตาลสดจากปาล์ม *Elaeis guineensis* พบแบคทีเรียคือ *Acetobacter roseus, Aerobacter aerogenes, Leuconostoc mesenteroides, Serratia marcescens* และ *Zymomonas mobilis*. ยีสต์เป็น จุลินทรีย์ที่พบมากในน้ำตาลสด บทบาทสำคัญของยีสต์คือ การทำให้กลิ่น รส ของน้ำตาลสดเปลี่ยนแปลงไป เกิดการหมักน้ำตาลทำให้เกิดแอลกอฮอล์ ซึ่งดีต่อการหมักน้ำตาลเมา แต่เป็นข้อเสียของน้ำตาลสดเนื่องจากทำให้เกิดฟอง และมีการสูญเสียน้ำตาลไป

2.5)การป้องกันการเน่าเสียของน้ำตาลโตนด

เนื่องจากการรองรับน้ำตาลสดจากต้นจะต้องใช้เวลานานกว่า 10 ชั่วโมง และไม่ได้ใช้เทคนิคการปลอดเชื้อ ดังนั้นจึงทำให้มีจุลินทรีย์ปนเปื้อนหลายชนิด เช่น ยีสต์ แบคทีเรีย และรา และมีโอกาสเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการเน่าเสีย มีรสเปรี้ยว เป็นฟอง และปริมาณน้ำตาลลดลง ดังนั้นในการเก็บเกี่ยวในแต่ละครั้งนั้นจะมีการใส่เศษไม้ที่มีรสฝาดลงในกระบอกรองรับน้ำตาลด้วยเพื่อเป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น ไม้เคี่ยม ไม้พะยอม ไม้ตะเคียน ไม้มะเกลือ เป็นต้น ซึ่งไม้จำพวกนี้จะมีองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอล (phenolic compound) แต่สารประกอบเหล่านี้จะมีรสฝาดและสีของแทนนินปนเปื้อน ดังนั้นได้มีการศึกษาถึงการใช้สารเคมีอื่นๆ เช่น ปูนขาว, โซเดียมเบนโซเอท และโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ มาทดแทนการใช้ไม้เคี่ยม (Tirawat *et al.,* 1986) แต่ถึงกระนั้นยังมีการรายงานว่าน้ำตาลโตนดสดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษา โดยอาจเกิดจากการที่แบคทีเรียสร้างกรดทำให้น้ำตาลมีรสเปรี้ยวเนื่องจากสูญเสียซูโครสโดยปฏิกิริยาอินเวอร์ชั่น (inversion) และการเปลี่ยนเป็นกรด โดยแบคทีเรียต่างๆ เป็นพวกแบคทีเรียแลคติค (lactic acid bacteria) โดยทำให้เกิดการหมักน้ำตาลให้เกิดเป็นแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำน้ำตาลเมา แต่มีผลเสียต่อคุณภาพน้ำตาลโตนดสดคือ เกิดฟอง มีกลิ่นเหม็น และสูญเสียปริมาณน้ำตาล (เสาวลักษ์ จิตรบรรเจิดกุล, 2532; Faparusi, 1973)

ชาคริต พืชพันธ์ และวีระศักดิ์ ยอดปรีดา (2526) ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบของน้ำตาลสด ที่ใส่และไม่ใส่ไม้เคี่ยมชะลอการเสื่อมเสียระหว่างการรองรับน้ำตาลสด ในตอนเช้าและตอนเย็น พบว่าน้ำตาลสดที่ใส่ไม้เคี่ยมมีปริมาณกรดต่ำกว่าน้ำตาลสดที่ไม่ใส่ไม้เคี่ยม และน้ำตาลสดทั้งที่ใส่และไม่ใส่ไม้เคี่ยมมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 1-7

ตารางที่ 1-7 เปรียบเทียบองค์ประกอบของน้ำตาลโตนดสด

Table 1-7 Comparison of components in fresh sugar palm sap

Type of Sugar palm sap	Total soluble solid (°Brix)	pH	Acidity (%) (as citric)	ร้อยละน้ำตาลอินเวอร์ท (A)	Total sugar (%) (B)	A/B
น้ำตาลเช้า						
ใส่ไม้เคี่ยม	12.0	5.2	0.072	0.662	10.569	0.063
ไม่ใส่ไม้เคี่ยม	12.2	4.9	0.144	0.835	10.324	0.081
น้ำตาลเย็น						
ใส่ไม้เคี่ยม	12.0	5.3	0.072	0.503	11.150	0.045
ไม่ใส่ไม้เคี่ยม	12.4	4.5	0.228	0.773	10.961	0.071

ที่มา: ชาคริต พืชพันธ์ และวีระศักดิ์ ยอดปรีดา (2526)

นอกจากนี้การทำความสะอาดกระบอกรองรับน้ำตาลโตนดมีผลต่อการเสื่อมเสียของน้ำตาลโตนดมาก วิธีการที่ใช้ทำความสะอาดกระบอกโดยการรมควันหรือการลวกน้ำร้อน ในการลวกน้ำร้อนอาจใช้น้ำตาลสดที่เคี่ยวกำลังเดือดลวกก็ได้ แต่ต้องมีการคว่ำให้เหมาะสมกันแมลงหรือมดรบกวนซึ่งอาจทำให้ภาชนะสกปรก (ปราโมทย์ ธรรมรัตน์, 2521)

1.3 วัตถุประสงค์

1.ศึกษาถึงสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมต่อค่าฟลักซ์และการแยก หรือกักเก็บองค์ประกอบทางกายภาพ ทางเคมี และจุลินทรียในน้ำตาลโตนด โดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น

2.ศึกษาถึงกลไกและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดฟาวลิ่ง กลไกการเกิดฟาวลิ่งและการลดการเกิดฟาวลิ่งโดยการใช้ แนวคิดฟลักซ์วิกฤต ในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรน

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2544. ตาลโตนดผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปและรูปแบบโรงผลิต. กรมส่งเสริมการเกษตร. กรุงเทพฯ.

กีร์ เทรบุยล์. 2526. ประเภทและกลไกการทำงานของระบบการผลิตทางการเกษตรของสทิงพระในปัจจุบัน. โครงการวิจัยระบบการผลิตทางการเกษตร. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุกัญญา จันทะชุม. 2540. น้ำตาลโตนด: สารให้ความหวานดั้งเดิมของคนไทย. รวมบทความการสัมมนาวิชาการ เรื่อง ผักพื้นบ้านและอาหารพื้นเมือง.

เรณุกา แจ่มฟ้า. 2545. การผลิตไซรับจากน้ำตาลโตนดสด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ชาคริต พืชพันธ์ และวีระศักดิ์ ยอดปรีดา. 2526. การรักษาคุณภาพของน้ำตาลสดโดยใช้สารเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ปราโมทย์ ธรรมรัตน์. 2521. การศึกษายีสต์ในน้ำตาลสดและน้ำตาลเมา และการคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อการหมักแอลกอฮอล์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เสาวลักษณ์ จิตรบรรเจิดกุล. 2532. ผลของวัตถุกันบูดต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์จากน้ำตาลโตนด. ว. สงขลานครินทร์. 2-4: 161-166.

Baker, R.W. 2000. Membrane Technology and Applications.1st edition. The McGraw-HillCompanies, Inc. USA.

Balakrishnan, M., Dua, M., and Bhagat, J.J. 2000. Effect of operating parameters on sugarcane juice ultrafiltration: results of a field experience.Sep. and Purif. Tech. 19: 209-220.

Belfort, G., Davis, H.R. and Zydney, A.. 1994. The behavior of suspensions and macromolecular solusions in crossflow microfiltration. J. Membrane Sci. 96:1-58.

Brandsma, R.L. and Rizvi, S.S.H. 1999. Depletion of whey protiens and calcium by microfiltration of acidified skim milk prior to cheese making. J. Dairy Sci. 82: 2063-2069.

Borin, K. 1996. The sugar palm tree as the basis of integrated farming systems in Cambodia. Contribution to Second FAO Electronic Conference on Tropicol Feeds. Livestock Feed Resources within Integrated Farming System.

Borin, K. 2002. Sugar palm (*Borassus flabellifer*): potential feed resource for livestock in small- scale farming system (Online). Available http://www.fao.org/ag/. p.1-12. (12 March 2002)

Chen, V., Fane, A.G., Madaeni, S. and Wenten, I.G. 1997. Particle deposition during membrane filtration of colloids: transition between concentration polarization and cake formation. J. Membrane sci. 125: 109-122.

Cheryan, M. 1998. Ultrafiltration and Microfiltration Handbook 2nd edition. Technomic publish Co. Lancaster. USA.

Chiang, B.H. and Cheryan, M. 1986. Ultrafiltration of Skimmilk in Hollow Fibers. J. Food Sci. 51: 340-344.

Child , R. 1974. Coconuts. 2nd ed. Longman Group Ltd. London.

Czekaj, P., López, F. and Güell, C. 2001. Membrane fouling by tubidity constituents of beer and wine : characterization and prevention by means of infrasonic pulsing. J. Food Eng. 49: 25-36.

Faparusi, S.I. and Bassir, O. 1973. Microflora of fermenting palm sap. J. Food Sci. and Tech. 8: 206.

Field, R.W., Wu, D., Howell, J.A. and Gupta B.B. 1995. Critical flux concept for microfiltration fouling. J. Membrane Sci. 100: 259-272.

Fradin, B. and Field, R.W. 1999. Crossflow microfiltration of magnesium hydroxide suspensions: determination of critical flux, measurement and modeling of fouling. Sep. Purif. Technol. 16: 25-45.

Fukumoto, L.R., Delequis, P. and Girard, B. 1998. Microfiltration and ultrafiltration ceramic membranes for apple juice clarification. J. Food Sci. 63(5): 845-850.

Girard, B. and Fukumoto, L.R. 2000. Membrane processing of fruit juices and beverages. J. Food Science and Nutrition. 40: 91-157.

Grandison, A.S. and Lewis, M.J. 1996. Seperation processes in the food and biotechnology industries principles and applications. Woodhead Publishing Ltd., UK

Grandison, A.S., Youravong, W. and Lewis, M.J. 2000. Hydrodynamic factors affecting flux and fouling during ultrafiltration of skimmed milk. Lait. 80: 165-174.

Gésan-Guiziou, G., Boyaval, E. and Daufin, G. 1999. Critical stability conditions in crossflow microfiltration of skimmed milk: transition to irreversible deposition. J. Membrane Sci. 158: 211-222.

Heldman, R.D. and Hartel, W.R. 1999. Principles of food Processing. Aspen Publishers, Inc.,USA.

Hermia. J. 1982.Constant pressure blocking filtration laws- application to power –law non – Newtonian fluids. Trans IChemE. 60: 183-187.

Huisman, I.H., Vellenga, E., Trägårdh, G. and Trägårdh, C. 1999. The influence of the membrane zeta potential on the critical flux for crossflow microfiltration of particle suspensions. J. Membrane Sci. 156: 153-158.

Jiraratananon, R. and Chanachai, A. 1996. A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice. J. Membrane Sci. 111: 39-48.

Kenneth, V.J., Rotstein, E. and Paul Singn, R. 1997. Handbook of Food Engineering Practice, CRC Pressuc., New York.

Kovasin, K. 2002. Modeling ultrafiltration and filtration phenomena applied in chemical pulping processes. Chemical Engineering Report series. 44: 1-52.

Kovoor, A. 1983. The Palnyrah Palm: Potential and perspectives FAO Plant Production and Protection Paper 52, Food- and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Krishna kumar, N.S., Yea, M.K. and Cheryan, M. 2003. Soy protein concentrates by ultrafiltration. J. Food eng. and Physical prop. 68 (7): 2278-2283.

Kuberkar, V.T. and David, R.H. 2000. Modeling of fouling reduction by secondary membrane. J. Membranes Sci. 168: 243-258.

Li, H., Fane, A.G., Coster, H.G.L. and Vigneswaran, S. 1998. Direct observation of particle deposition on the membrane surface during crossflow nmicrofiltration. J. Membrane Sci. 149: 83-97.

Mänttäri, M and Nyström, M. 2000. Critical flux in NF of high molar mass polysaccharides and effluents from paper industry. J. Membrane Sci. 170: 257-273.

Mohammadi, T., Kazemimoghadam, M. and Saadabadi, M. 2003. Modeling of membrane fouling and flux decline in reverse osmosis during separation of oil in water emulsions. Desalination. 57: 369-375.

Metsämuuronen, S., Howell, J. and Nyström, M. 2002. Critical flux in ultrafiltration of myoglobin and baker's yeast. J. Membrane Sci. 196: 13-25.

Okafor., J.P. 1984. Coconuts; tree of life. FAO Plant Production and Protection. Page 57.

Padilla-Zakour, O. and MaLellan, M.R. 1993. Optimization and modeling of apple juice crossflow microfiltration with ceramic membrane. J. Food Sci. 58: 369-347.

Paiboon Thammarutwasik, Prapasri Pichitvorapanich, Christophe De Gaulmyn, Prasit Chaisiripant and Pornchai Sripaiboon. 1986. On-Farm Development: The Research-Extension Process of Palm Sugar Processing Technology. Songklanakarin J. Sci. Technol. 8: 251-257.

Posp´ıšil. P., Wakeman, R.J., Hodgson, I.O.A., and Mikulášek P. 2004 Shear stress- based modelling of steady state permeate flux in microfiltration enhanced by two-phase flows. J. Chemical Engineering 97:257–263.

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.

Su, T.J., Lu, J.R., Cui, Z.F. and Thomas, R.K. 2000. Fouling of ceramic membranes by albumins under dynamic filtration conditions. J. Membrane Sci. 173: 167-178.

Sulaiman, M.Z., Sulaiman, N.M. and Yih, L.S. 1998. Limiting permeate flux in the clarification of untreated starfruit juice by membrane ultrafiltration. J. Chem Eng. 69: 145-148.

Tirawat, K., Chanthachum, S., Jibunjerdkul, S. and Pichitwarapanit, P. 1986. Study of the Effect of Preservative on the Quality of Sugar Palm Sap. A Report on the Improvement of Palm Sap Processing in Sathing phra Area.

Vaillant, F., Millan, P., O'Brien, G., Dornier, M., Decloux, M. and Reynes, M. 1999. Cross flow microfiltration of passion fruit juice after partial enzymatic liquefaction. J. Food Eng. 42 : 215-224.

Winston Ho, W.S. and Sirkar, K.K. 1992. Membrane handbook, 1st ed. Chapman & Hall, New York.

Wu, D., Howell, J.A. and Field, R.W. 1999. Critical flux measurement for model colloids. J. Membrane Sci. 152: 89-98.

Youravong, W., Grandison, A.S. and Lewis, M. 2002. Effect of hydrodynamic and physicochemical changes on critical flux of milk protein suspension. J. Dairy Research. 69: 443-455.

Zeman, L.J. and Zydney, A.L. 1996. Microfiltration and Ultrafiltration principles and application. Marcel Dekker, Inc. New York.