

## ฟลักซ์ การกักกัน และฟาวลิง ระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชันน้ำตาลโตนดในระดับโรงงานทดลอง

ฐปนีย์ ฤทธิไพโรจน์<sup>1</sup> วิโรจน์ ยูรวงศ์<sup>2</sup> และ พิกุล วณิชชาติ<sup>3</sup>

### Abstract

Ritthipairote, T.<sup>1</sup>, Youravong, W.<sup>1</sup> and Wanichapichart, P.<sup>2</sup>

**Flux, rejection and fouling during microfiltration and ultrafiltration of sugar palm sap using a pilot plant scale**

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2006, 28(4) : 817-828

The possibility of using a pilot plant scale microfiltration (MF) and ultrafiltration (UF) to clarify and reduce number of bacteria, yeast and mould of sugar palm sap was studied. The membrane used was multi channel tubular ceramic membrane (ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>) with membrane pore size 0.2 and 0.1 μm and molecular weight cut off (MWCO) 300 and 50 kDa for microfiltration and ultrafiltration respectively. The experiment was carried out to investigate the rejection of the components in sugar palm sap, permeate flux and fouling characteristics. The results showed that the turbidity, the total solid, the viscosity and the numbers of bacteria, yeast and mould in the permeate obtained by MF and UF were reduced significantly compared to those of fresh sugar palm sap. The total soluble solid, total sugar, reducing sugar and pH were not affected by MF and UF. The permeate fluxes for all membranes were reduced greatly as the volume concentration ratio (VCR)

<sup>1</sup>Membrane Science and Technology Research Center, Department of Food Technology, Faculty of Agro-industry <sup>2</sup>Membrane Science and Technology Research Center, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand.

<sup>1</sup>นักศึกษาลัทธิสุตร วทม. สาขาเทคโนโลยีอาหาร <sup>2</sup>Ph.D.(Food Engineering) สถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร <sup>3</sup>Ph.D.(Biophysic) รองศาสตราจารย์ สถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรนภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail: wirote.y@psu.ac.th

รับต้นฉบับ 4 ตุลาคม 2548

รับลงพิมพ์ 16 มกราคม 2549

increased due to severe fouling. The irreversible fouling on membrane surface and/or inside the membrane tended to increase with increasing membrane pore size or MWCO. The result also suggested that protein and small particle in the sugar palm sap were probably responsible for the internal fouling of large pore size membrane. According to the physical, chemical and microorganism quality results, both MF and UF showed the potential use for improving the quality of sugar palm sap but flux reduction due to fouling was a major problem affecting the process performance.

**Key words :** sugar palm sap, ultrafiltration, microfiltration, clarification, fouling

### บทคัดย่อ

รูปนีย์ ฤทธิไพโรจน์ วิโรจน์ ยูรวงศ์ และ พิกุล วณิชชาภิชชาติ  
คำฟลักซ์ การกักกัน และฟาวลิงระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน  
น้ำตาลโตนดในระดับโรงงานทดลอง

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2549 28(4) : 817-828

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความใสและการลดจำนวนแบคทีเรีย ยีสต์และรา ในน้ำตาลโตนด โดยกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration, MF) และอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration, UF) ในระดับโรงงานทดลอง เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบท่อทำจากเซรามิก ( $ZrO_2-TiO_2$ ) ที่มีขนาดรูพรุน 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และ molecular weight cut off (MWCO) 300 และ 50 กิโลดาลตัน ในการทดลองได้ศึกษาความสามารถในการกักกันองค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำตาลโตนด ค่าเพอมีเอทฟลักซ์และฟาวลิง จากการทดลองพบว่าน้ำตาลโตนดในส่วนของเพอมีเอทที่ได้จากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน มีความขุ่น ความหนืด ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณโปรตีน และจำนวนจุลินทรีย์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลโตนดสด ในขณะที่ค่าพีเอช ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในเพอมีเอทและน้ำตาลโตนดสด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าอัตราส่วนความเข้มข้นเชิงปริมาตร (volume concentration ratio, VCR) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดฟาวลิงในระหว่างการกรองอย่างรุนแรง ฟาวลิงแบบไม่สามารถผันกลับได้ซึ่งสามารถเกิดทั้งบนผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุนของเมมเบรนเนื่องจากสารแขวนลอย โปรตีนและอนุภาคขนาดเล็กในน้ำตาลโตนด มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น การศึกษาครั้งนี้ให้เห็นว่าสามารถใช้กระบวนการ MF และ UF ปรับปรุงสมบัติทางด้านกายภาพ เคมีและจุลินทรีย์ของน้ำตาลโตนดได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม การลดลงของฟลักซ์เนื่องจากฟาวลิงและคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ยังเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของกระบวนการซึ่งควรต้องศึกษาในเชิงลึกต่อไป

ในระยะหลายปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีเมมเบรน (membrane technology) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารอย่างแพร่หลาย เช่น น้ำผลไม้ เบียร์ และน้ำตาล เป็นต้น สำหรับอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration, UF) และไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration, MF) มีบทบาททำให้ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้มีคุณภาพสูงขึ้น โดยการลดปริมาณจุลินทรีย์ การเพิ่มความใสและการคงความสด ในปัจจุบันผู้บริโภคมีความ

ต้องการผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำผลไม้สดที่ปราศจากสารเคมีและสารเติมแต่ง และมีอายุการเก็บนานขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำผลไม้สดที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน ดังนั้นกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สำคัญในอุตสาหกรรมการแปรรูปน้ำผลไม้ นอกเหนือจากกระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อนและสารเคมีซึ่งเป็นสาเหตุทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง (Pereira et al., 2002; Matta et al., 2004) โดยทั่วไปการใช้กระบวนการ

อัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันสำหรับการแปรรูปน้ำผลไม้และเครื่องดื่ม มีวัตถุประสงค์ดังนี้คือ (1) การทำให้ใส (clarification) โดยแยกเอาสารโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้ง เส้นใย และองค์ประกอบที่ไม่สามารถละลายได้ออกไป โดยสามารถแยกได้ดีกว่ากระบวนการการทำให้ใสแบบทั่วไป (2) การลดปริมาณจุลินทรีย์ ทำให้น้ำผลไม้ส่วนของเพอมีเอท (permeate) ปลอดภัยโดยไม่ใช้ความร้อน หรือที่เรียกว่า "โคลสเตอร์ไรเซชัน" (cold sterilization) ผลึกภัณฑ์ที่ได้จึงมีคุณภาพและกลิ่นรสไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในบางกรณีได้นำส่วนของรีเทนเทท (retentate) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกกักไว้ด้วยเมมเบรนและมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สูงไปพาสเจอร์ไรซ์หรือสเตอริไรซ์ แล้วเติมกลับลงในเพอมีเอท ส่งผลให้ผลึกภัณฑ์น้ำผลไม้ที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำผลไม้สดมากกว่าผลึกภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (Vaillant *et al.*, 1999) ปัจจุบันได้มีการใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันในอุตสาหกรรมแปรรูปผลไม้หลายชนิด เช่น น้ำแอปเปิ้ล น้ำสับปะรด น้ำอ้อย น้ำส้ม เป็นต้น

น้ำตาลโดนดเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีมากในประเทศไทยและประเทศใกล้เคียง โดยทั่วไปน้ำตาลโดนดมีความขุ่นสูงและมีองค์ประกอบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการหมักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้คุณภาพของน้ำตาลโดนดหลังการเก็บเกี่ยวลดลงจนไม่สามารถบริโภคสดได้เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเกิน 3 ชั่วโมง โดยประมาณ ปัจจุบันน้ำตาลโดนดแปรรูปที่มีขายในท้องตลาดผ่านการสเตอริไรซ์โดยใช้ความร้อน แม้จะสามารถเก็บผลึกภัณฑ์ไว้ได้นาน แต่ผลึกภัณฑ์น้ำตาลโดนดที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงรสชาติ สี และกลิ่น อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับน้ำตาลโดนดสดสำหรับการแปรรูปด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และไมโครฟิลเตรชันเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อน จึงคาดหวังว่าคุณภาพผลึกภัณฑ์ที่ได้จะใกล้เคียงกับน้ำตาลโดนดสด โดยมีตัวบ่งชี้สำคัญที่ใช้ในการบ่งบอกความเป็นไปได้ในทางเทคนิคและสมรรถนะของกระบวนการคือ ค่าฟลักซ์ (flux) ความรุนแรงของการเกิดฟาวลิง (fouling) ซึ่งเป็นการอุดตันของอนุภาคบนผิวหน้าและหรือในรูพรุนของเมมเบรน และความสามารถในการกักกันสารหรือองค์ประกอบ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติทางด้านเคมี

กายภาพและจุลินทรีย์ของผลึกภัณฑ์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง แปรรูปน้ำตาลโดนดสดให้ผลึกภัณฑ์ที่ได้ใกล้เคียงกับน้ำตาลโดนดสด มีความใสและเก็บรักษาได้นาน โดยศึกษาถึงผลของกระบวนการต่อการกักกันองค์ประกอบในน้ำตาลโดนด ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ของน้ำตาลโดนดและการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์และความต้านทานเนื่องจากฟาวลิง โดยคาดหวังว่าข้อมูลที่ได้จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในการแปรรูปน้ำตาลโดนดและน้ำผลไม้ชนิดอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียง

## วัสดุและวิธีการทดลอง

### 1. น้ำตาลโดนดสด

น้ำตาลโดนดที่ใช้เป็นน้ำตาลโดนดสดที่มีการเติมไม้เคี่ยมในระหว่างการเก็บเกี่ยว ทำการเก็บตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร เก็บที่อุณหภูมิ 4°C ตลอดการขนส่ง และใช้ทดลองให้หมดภายใน 10 ชั่วโมง ก่อนการทดลองกรองน้ำตาลโดนดสดผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกตะกอนและอนุภาคขนาดใหญ่ออก และให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 50°C เพื่อลดอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระหว่างทดลอง จากนั้นนำเข้าระบบกรอง

### 2. ระบบกรองระดับโรงงานทดลองและเมมเบรน

รายละเอียดของระบบกรองแสดงใน Figure 1 ประกอบด้วยถึง 2 ชั้น ปริมาตร 50 ลิตร เป็นถังบ่อนตัวอย่าง สามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ บ่อนตัวอย่างเข้าระบบโดยใช้ปั๊มหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal pump) ที่สามารถปรับอัตราการไหลของสารบ่อนและความดันโดยการปรับความถี่ของตัวทำกระแสสลับ (inverter) และการปรับวาล์วของรีเทนเททวัดความดันของสารบ่อน รีเทนเททและเพอมีเอท ด้วยหัววัดความดัน (pressure transducer) มีย่านการวัดอยู่ในช่วง 0-10 บาร์ ใช้น้ำเย็นผ่านถังสารบ่อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำตาลโดนดให้คงที่  $50 \pm 1^{\circ}\text{C}$  ตลอดการทดลอง เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบท่อทำจากเซรามิก ( $\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2$ )

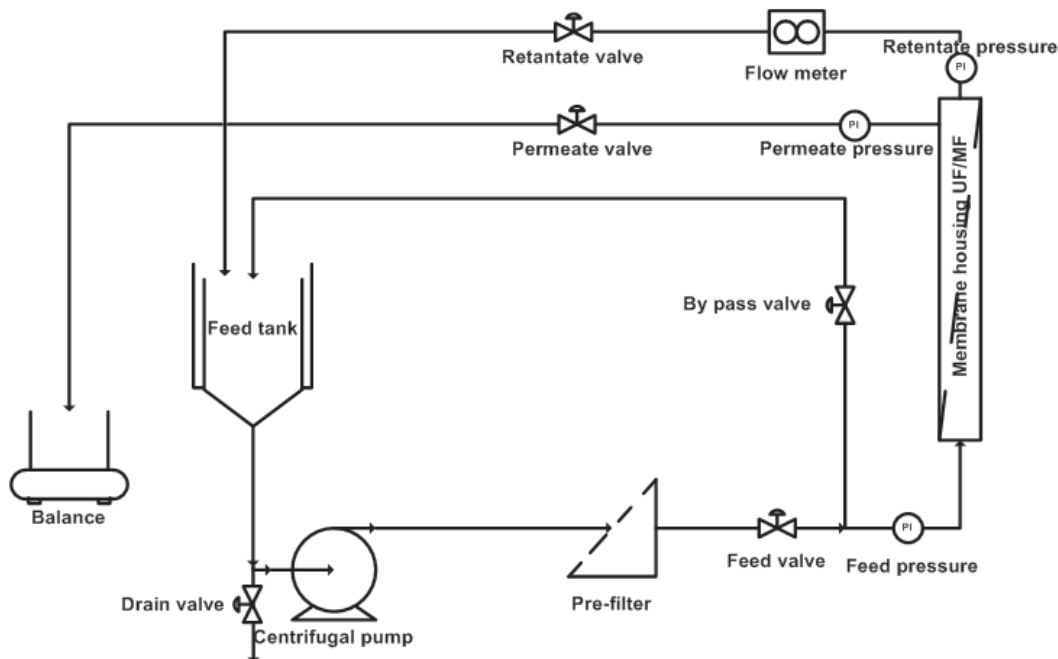


Figure 1. Ultra- and microfiltration pilot plant system

(ยี่ห้อ Rhodia Orelis รุ่น KERASEPTM K01B บริษัท MIRIBER CEDEX ประเทศฝรั่งเศส) ระดับไมโครฟิลเตรชันรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และระดับอัลตราฟิลเตรชัน molecular weight cut-off (MWCO) ขนาด 300 และ 50 กิโลดาลตัน เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อย่อยเท่ากับ 3.5 มม. เมมเบรน 1 ชุด มีจำนวนท่อย่อย 18 ท่อ มีความยาว 1.2 เมตร และมีพื้นที่การกรอง 0.245 ตร.เมตร

### 3. วิธีการทดลอง

ก่อนทำการทดลองในแต่ละครั้ง ทำการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในระบบกรอง โดยล้างด้วยน้ำสะอาดที่ความดันขั้ว 50 กิโลปาสคาล ความเร็วตามขวาง 1.5 เมตร/วินาที อุณหภูมิประมาณ 30°C นาน 15 นาที แล้วใช้โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ (potassium metabisulphite, KMS) เข้มข้น 0.5% โดยน้ำหนัก ไหลวนในระบบที่อุณหภูมิประมาณ 30°C นาน 15-20 นาที ต่อด้วยการวนด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80-85°C นาน 15-20 นาที เพื่อฆ่าเชื้อบนพื้นผิวที่สัมผัสกับอาหาร

บ่อนสารบ่อน 30 กก. ที่มีอุณหภูมิ 50°C โดยใช้ความดันขั้ว 100 กิโลปาสคาล และ 250 กิโลปาสคาล สำหรับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันตามลำดับ โดยกำหนดให้ความเร็วตามขวางมีค่าเท่ากับ 3.5 เมตร/วินาที ติดตามการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมีเอทโดยการชั่งน้ำหนักของเพอมีเอททุกๆ 500 กรัม พร้อมกับบันทึกเวลา และทำการสูมตัวอย่างน้ำตาลโตนดจากส่วนของเพอมีเอทและรีเทนเทท วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและใช้คำนวณค่ากักกัน (rejection coefficient,  $R_j$ ) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกักกันสารของเมมเบรน (Cheryan, 1998) สามารถคำนวณได้จากสมการ [1]

$$R_j = \left(1 - \frac{C_p}{C_r}\right) \times 100 \quad [1]$$

โดย  $C_p$  คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมีเอท และ  $C_r$  คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในรีเทนเททหยุดการกรองเมื่อปริมาณสารบ่อนลดลง 50% หรืออัตราส่วนความเข้มข้นเชิงปริมาตร (volume concentration ratio, VCR) เท่ากับ 2 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ [2] (Vaillant et al., 1999)

$$VCR = \frac{\text{Volume of feed}}{\text{Volume of feed} - \text{Volume of permeate}} \quad [2]$$

เก็บตัวอย่างน้ำตาลโตนดสดและน้ำตาลโตนดจาก ส่วนเพอมีเอทที่ VCR เท่ากับ 2 เพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติ ของน้ำตาลโตนดทางด้านเคมี กายภาพและจุลินทรีย์ โดย เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4°C และทำการตรวจวิเคราะห์ ตัวอย่างภายใน 10 ชั่วโมง

#### 4. การวิเคราะห์ทางเคมี กายภาพและจุลินทรีย์

นำตัวอย่างในส่วนของเพอมีเอท รีเทนเทท และ น้ำตาลโตนดสด วิเคราะห์สมบัติทางด้านเคมี กายภาพ และ จุลินทรีย์ ดังนี้

- พีเอช โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ (A.O.A.C., 1999)
- ปริมาณของแข็งทั้งหมด (A.O.A.C., 1999)
- ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดโดยใช้ Hand Refractometer (A.O.A.C., 1999)
- น้ำตาลรีดิวิซ ตามวิธีของ Lane Eynon and Volumetric Method (A.O.A.C., 1999)
- น้ำตาลทั้งหมด ตามวิธีของ Lane Eynon and Volumetric Method (A.O.A.C., 1999)
- ปริมาณกรดทั้งหมด (A.O.A.C., 1999)
- ปริมาณโปรตีนตามวิธี Lowry's (Lowry *et al.*, 1951)
- วัดค่าสี โดยใช้ Hunter Lab (Carneiro และ คณะ, 2002)
- วัดความหนืด โดยใช้ Hunter Lab (Carneiro และคณะ, 2002)
- วัดค่าความหนืด โดยใช้ U-tube viscometers (Bailey และคณะ, 2000)
- จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยใช้วิธี Pour Plate ใช้อาหารพีซีเอ (plate count agar)
- จำนวนยีสต์และรา โดยใช้วิธี Pour Plate ใช้ อาหารพีดีเอ (potato dextrose agar)
- จำนวนแลคติกแบคทีเรีย โดยใช้วิธี Pour Plate ใช้อาหารเอ็มอาร์เอส (MRS-medium)

#### 5. การวิเคราะห์ฟาวลิง

การวิเคราะห์ความต้านทานของกระบวนการกรอง สามารถแยกความต้านทานการไหลของเพอมีเอทเป็น ความต้านทานของเมมเบรน (membrane resistance,  $R_m$ ) มีหน่วยเป็นเมตร<sup>-1</sup> ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง ที่ผันกลับไม่ได้ (irreversible fouling,  $R_{irf}$ ) และความ ต้านทานเนื่องจากการฟาวลิงที่ผันกลับได้ (reversible foul- ing,  $R_{rf}$ ) ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (concentration polarization) แต่ในบาง ครั้งอาจเป็นชั้นของเจลหรือเค้กที่ชะออกได้ด้วยน้ำ ดังนั้น ความต้านทานรวม ( $R_t$ ) ประกอบด้วย (Jiratananon *et al.*, 1997., Grandison *et al.*, 2000)

$$R_t = R_m + R_{rf} + R_{irf} \quad [3]$$

ความต้านทานแต่ละตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้ คือ ความต้านทานรวม ( $R_t$ ) สามารถคำนวณได้จากฟลักซ์ของ สารละลายดังสมการ

$$R_t = \frac{TMP}{\mu_p J} \quad [4]$$

เมื่อ  $TMP$  (transmembrane pressure) คือ ความ ตันซิป (ปาสคาล)  $J$  คือ ฟลักซ์ของสารละลาย (ลบ.เมตร/ ตร.เมตรวินาที) และ  $\mu_p$  คือ ความหนืดของเพอมีเอท (ปาสคาลวินาที)

ความต้านทานเมมเบรน ( $R_m$ ) สามารถคำนวณได้ จากฟลักซ์ของน้ำจากสมการ

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_p J_w} \quad [5]$$

เมื่อ  $J_w$  คือ ฟลักซ์ของน้ำของเมมเบรนสะอาด หลังจากการใช้งานแล้ว ทำการไล่สารป้อนออกจาก ระบบและกำจัดชั้นฟาวลิงที่ผันกลับได้ด้วยน้ำสะอาด ค่า ความต้านทานที่เหลืออยู่หลังไล่แล้ว จึงประกอบด้วย ความ ต้านทานเมมเบรน ( $R_m$ ) และความต้านทานของฟาวลิงที่ ผันกลับไม่ได้ ( $R_{irf}$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ [6]

$$R_m + R_{irf} = \frac{TMP}{\mu_w J'_w} \quad [6]$$

เมื่อ  $J'_w$  คือ ฟลักซ์น้ำสะอาดของเมมเบรนหลังการ กรอง

ความต้านทานของฟาวลิงที่ไม่สามารถผันกลับได้ ( $R_{irf}$ ) สามารถคำนวณโดยการแทนค่าของ  $R_m$  จากสมการ [5] ลงในสมการ [7] จะได้ดังนี้

$$R_{irf} = \frac{TMP}{(\mu_w J_w)} - R_m \quad [7]$$

คำนวณค่าความต้านทานแบบผันกลับได้ ( $R_{rf}$ ) โดยใช้ค่าที่ได้จากสมการ [4], [5] และ [7] แทนในสมการ [3]

ในทดลองครั้งนี้ใช้ความดันขับ 100 กิโลปาสกาล ความเร็วตามขวาง 3.5 เมตร/วินาที อุณหภูมิ  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  เพื่อวิเคราะห์ค่า  $R_m$ ,  $R_f$ ,  $R_{rf}$  และ  $R_{irf}$

**ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง**

**1. ผลของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันต่อสมบัติของน้ำตาลโตนด**

**1.1 สมบัติทางกายภาพ**

สมบัติทางกายภาพของน้ำตาลโตนดที่ผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน แสดงดัง Table 1 ผลการวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้ระบบ Hunter lab (L,a,b) ซึ่งกำหนดว่าหากค่า L มีค่าเข้าใกล้ 100 แสดงว่าวัตถุมีความสว่าง ค่า a มีค่าเป็นบวกแสดงว่าวัตถุมีเฉดสีแดง และเมื่อค่า b เป็นบวกแสดงว่าวัตถุมีเฉดสีเหลือง (Carneiro et al., 2002) พบว่า เมื่อกรองน้ำตาลโตนดผ่านเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

ค่า L a และ b มีความแตกต่างจากน้ำตาลโตนดสดอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยค่า L เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ค่าความขุ่นในรูปของความสามารถในการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร พบว่า น้ำตาลโตนดส่วนของเพอมีเอทมีความแตกต่างจากน้ำตาลโตนดสดอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ค่าการผ่านทะลุของแสงของส่วนเพอมีเอทมีค่าสูงสุด 98.1% 99.0% 98.2% และ 99.8% เมื่อผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และ MWCO 300 และ 50 กิโลดาลตันตามลำดับ จากค่าสีและค่าการผ่านทะลุของแสงชี้ให้เห็นว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันสามารถเพิ่มความใสของน้ำตาลโตนดได้ โดยความใสของน้ำตาลโตนดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน หรือ MWCO ขนาดเล็กลง ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการกักกันสารของเมมเบรน โดยทั่วไปเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าสามารถกักกันสารได้น้อยกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

การวิเคราะห์ค่าความหนืดของน้ำตาลโตนดที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  พบว่าความหนืดในส่วนของเพอมีเอทมีค่าลดลงเล็กน้อยและมีความแตกต่างจากน้ำตาลโตนดสด ( $p \leq 0.05$ ) เนื่องจากเมมเบรนสามารถกักเก็บองค์ประกอบขนาดใหญ่ เช่น สารแขวนลอย ไว้ในส่วนของรีเทนเทท (Alvarez et al., 1998) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Carneiro และคณะ (2002) ในการศึกษากระบวนการ

**Table 1. Physical properties of fresh sugar palm sap and permeate obtained by microfiltration (pore size 0.2 and 0.1  $\mu\text{m}$  at TMP 100 kPa) and ultrafiltration (MWCO 300 and 50 kDa at TMP 250 kPa) at cross-flow velocity 3.5 m/s temperature  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ .**

Properties	Fresh sugar palm sap	Permeate				
		0.2 $\mu\text{m}$	0.1 $\mu\text{m}$	300 kDa	50 kDa	
Color	L <sup>1</sup>	72.46 $\pm$ 1.46 <sup>b</sup>	97.27 $\pm$ 0.90 <sup>a</sup>	98.36 $\pm$ 0.40 <sup>a</sup>	97.14 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	98.04 $\pm$ 0.81 <sup>a</sup>
	a <sup>2</sup>	2.80 $\pm$ 0.32 <sup>a</sup>	0.04 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	-0.05 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	-0.027 $\pm$ 0.16 <sup>b</sup>	-0.10 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>
	b <sup>3</sup>	14.86 $\pm$ 0.95 <sup>a</sup>	4.75 $\pm$ 1.55 <sup>b</sup>	3.37 $\pm$ 0.60 <sup>b</sup>	5.27 $\pm$ 1.52 <sup>b</sup>	3.82 $\pm$ 1.19 <sup>b</sup>
Transmittance(%) at 650 nm	64.99 $\pm$ 1.61 <sup>b</sup>	98.09 $\pm$ 0.52 <sup>a</sup>	99.02 $\pm$ 0.37 <sup>a</sup>	98.15 $\pm$ 0.75 <sup>a</sup>	99.77 $\pm$ 0.56 <sup>a</sup>	
Viscosity (mPa.s) at 25 <sup>o</sup> C	1.35 $\pm$ 0.005 <sup>a</sup>	1.26 $\pm$ 0.005 <sup>c</sup>	1.26 $\pm$ 0.005 <sup>c</sup>	1.29 $\pm$ 0.005 <sup>b</sup>	1.32 $\pm$ 0.003 <sup>b</sup>	

**Note** Each value is the mean of triplicate determinations  $\pm$  standard deviation  
<sup>a-c</sup>, Mean within rows of permeate followed by the same letter are not significantly different at  $p > 0.05$   
<sup>1</sup>L<sub>Hunter</sub> - luminosity (0 = black and 100 = white)    <sup>2</sup>a<sub>Hunter</sub> - (from -80 to zero = green, from zero to +100 = red)  
<sup>3</sup>b<sub>Hunter</sub> - (from -100 to zero = blue, from zero to +70 = yellow)



ไมโครฟิลเตรชันน้ำสับปะรดโดยใช้เมมเบรนรูพรุนขนาด 0.3 ไมโครเมตร ที่พบว่าเพอมีเอทความหนืดลงและมีความใสเพิ่มขึ้น

**1.2 สมบัติทางเคมี**

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำตาลโตนดเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชันแสดงใน Table 2 พบว่าค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดแตกต่างกันน้ำตาลโตนดสดอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าเมมเบรนสามารถกักกันองค์ประกอบบางส่วนไว้ในรีเทนเททแต่อาจมีองค์ประกอบบางส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนผ่านเมมเบรนได้ และพบว่าค่าพีเอชและค่ากรดทั้งหมด (คิดในรูปกรดแลคติก) ของน้ำตาลโตนดที่ผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันและน้ำตาลโตนดสดไม่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลคู่ที่พบในน้ำผลไม้รวมทั้งน้ำตาลรีดิวซ์และนอนรีดิวซ์ (non-reduce) (นิธิยา, 2545) จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน ( $p < 0.05$ ) โดยในส่วนของเพอมีเอทมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเฉลี่ย 11.18% 10.38% 10.55% และ 10.55% เมื่อผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และ MWCO 300 และ 50 กิโลดาลตัน ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของน้ำตาลซึ่งมีขนาดเล็ก

กว่ารูพรุนของเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันมากกว่ารูพรุนระดับอัลตราฟิลเตรชัน ดังนั้นโมเลกุลของน้ำตาลจึงสามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนที่มีขนาดใหญ่ได้มากกว่า (Merin and Shomer, 1999)

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีความสามารถในการรีดิวซ์อ็อกซิดอน เช่น  $Cu^{2+}$  และ  $Fe(CN)_6^{3+}$  ในสภาวะของสารละลายต่าง เนื่องจากมีไฮดรอกซีแอลดีไฮด์และไฮดรอกซีคีโตนเป็นโซ่เปิด (นิธิยา, 2545) การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของน้ำตาลโตนดเมื่อผ่านกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในส่วนของเพอมีเอทแตกต่างจากน้ำตาลโตนดสดอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเพอมีเอท มีค่าเฉลี่ย 0.57% 0.59% 0.50% และ 0.64% เมื่อใช้เมมเบรน ขนาด 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และ MWCO 300 และ 50 กิโลดาลตัน ตามลำดับ (Table 2) ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างกระบวนการกรองอนุภาคขนาดใหญ่และจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกกักกันไว้ในส่วนของรีเทนเทท ทำให้จุลินทรีย์ในกลุ่มยีสต์ซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถผลิตเอนไซม์อินเวอร์เทส สามารถย่อยน้ำตาลซูโครสไปเป็นน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุกโทสจึงทำให้สามารถรีดิวซ์กับอ็อกซิดอนต่างๆ ได้ แต่ในส่วนของเพอมีเอทจะมีจุลินทรีย์น้อยและซูโครสไม่ได้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและยังจับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยพันธะ  $\alpha$ -(1→2) ทำให้ไม่มีหมู่

**Table 2. Chemical properties of fresh sugar palm sap and permeate obtained by microfiltration (pore size 0.2 and 0.1µm at TMP 100 kPa) and ultrafiltration (MWCO 300 and 50 kDa at TMP 250 kPa) at cross-flow velocity 3.5 m/s temperature 50±1°C.)**

Properties	Fresh sugar palm sap	Permeate			
		0.2 µm	0.1 µm	300 kDa	50 kDa
Total soluble solid (°Brix)	12.33±0.57 <sup>a</sup>	9.80±0.20 <sup>c</sup>	9.67±0.50 <sup>c</sup>	11.20±0.20 <sup>b</sup>	11.33±0.57 <sup>b</sup>
Total solid (%)	12.28±0.23 <sup>ab</sup>	12.42±0.13 <sup>a</sup>	11.93±0.78 <sup>abc</sup>	11.54±0.25 <sup>bc</sup>	11.20±0.39 <sup>c</sup>
pH	5.18±0.21 <sup>ab</sup>	5.45±0.15 <sup>ab</sup>	5.01±0.30 <sup>b</sup>	5.16±0.05 <sup>ab</sup>	5.38±0.15 <sup>ab</sup>
Acidity as lactic acid (%)	0.047±0.005 <sup>a</sup>	0.043±0.002 <sup>a</sup>	0.048±0.012 <sup>a</sup>	0.027±0.005 <sup>b</sup>	0.027±0.005 <sup>b</sup>
Total sugar (%)	11.39±0.29 <sup>a</sup>	11.18±0.49 <sup>ab</sup>	10.38±0.54 <sup>b</sup>	10.55±0.56 <sup>bc</sup>	10.55±0.49 <sup>ab</sup>
Reducing sugar (%)	0.88±0.07 <sup>a</sup>	0.57±0.13 <sup>b</sup>	0.59±0.08 <sup>b</sup>	0.59±0.07 <sup>b</sup>	0.64±0.08 <sup>b</sup>
Protein content (g/100ml)	0.29±0.04 <sup>a</sup>	0.25±0.03 <sup>ab</sup>	0.23±0.01 <sup>b</sup>	0.25±0.03 <sup>ab</sup>	0.23±0.00 <sup>b</sup>

Note Each value is the mean of triplicate determinations ± standard deviation  
<sup>a-b</sup>, Mean within rows of permeate followed by the same letter are not significantly different at  $p > 0.05$

แอลดีไฮด์และหมู่คีโตนอิสระ ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในส่วนของเพอมีเอทต่ำกว่าที่พบในน้ำตาลโดนดสด (สุมาลี, 2535) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ de Barros และคณะ (2003) เมื่อกรองน้ำสับปะรดด้วยไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.01 ไมโครเมตร

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนของน้ำตาลโดนดเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชันพบว่าปริมาณโปรตีนในเพอมีเอทมีความแตกต่างกับน้ำตาลโดนดสดอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมมเบรนสามารถกักกันโปรตีนไว้ได้บางส่วน โดยอาจส่งผลสมบัติทางกายภาพของเพอมีเอทดังที่ได้อภิปรายไว้แล้ว ซึ่งได้ผลในทำนองเดียวกันกับผลการทดลองของ Matta และคณะ (2004) ที่ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทางด้านคุณภาพของน้ำเซอร์เมื่อผ่านเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.3 ไมโครเมตร

## 2. การแยกจุลินทรีย์

ผลการวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดในน้ำตาลโดนดหลังผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดในส่วนของเพอมีเอทมีค่าเฉลี่ย  $5.33 \ 3.25 \times 10^2 \ 6.67$  และ  $9.88 \times 10^3$  โคโลนี/มล. เมื่อผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.2 0.1 ไมโครเมตร 300 และ 50 กิโลดาลตัน ตามลำดับ (Table 3) จุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกกักกันด้วยเมมเบรนไว้ในส่วนของรีเทนเทท ส่งผลให้ส่วนของเพอมีเอทมีจำนวนจุลินทรีย์ลดลง

ผลการวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียแลคติกในน้ำตาลโดนดหลังผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน พบว่ามีจำนวนแบคทีเรียแลคติกเฉลี่ย  $< 1.0 \times 10^{-1}$  โคโลนี/มล. ทั้งนี้จำนวนแบคทีเรียแลคติกในส่วนของ

รีเทนเททมีค่าน้อยกว่าจำนวนแบคทีเรียแลคติกในส่วนของน้ำตาลโดนดเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะสภาวะในการทดลองที่ทำการดำเนินการกรองที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ได้ (Matta et al., 2004)

ผลการวิเคราะห์จำนวนยีสต์และราในน้ำตาลโดนดสดและเพอมีเอท พบว่าไม่มีเชื้อยีสต์และราในส่วนของเพอมีเอท เมื่อกรองผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และ MWCO 300 กิโลดาลตัน แต่พบว่ามีเชื้อยีสต์และราในส่วนของเพอมีเอทเมื่อกรองผ่านเมมเบรนที่มี MWCO 50 กิโลดาลตัน จำนวน  $6.85 \times 10^2$  โคโลนี/มล. ซึ่งเป็นจำนวนที่สูงกว่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานของน้ำตาลโดนด (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, มพช.113/2546) และได้ผลในทำนองเดียวกันเมื่อทำการทดลองซ้ำอีก 5 ครั้ง อาจเป็นไปได้ว่าระบบการกรองหรือเมมเบรนอาจมีจุดบกพร่องจุดเล็กๆ เกิดขึ้น

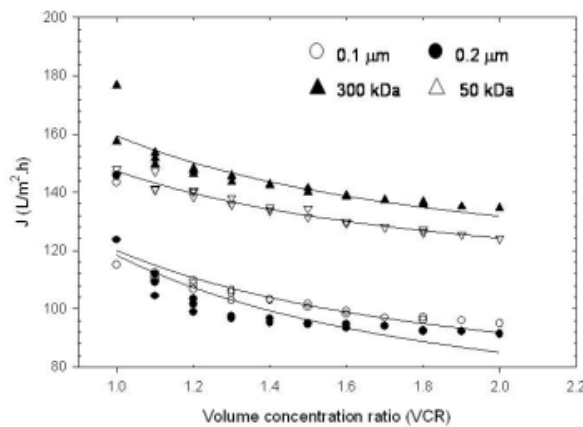
## 3. การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์

ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทในระหว่างการกรองน้ำตาลโดนดด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน MWCO ขนาด 300 และ 50 กิโลดาลตัน แสดงดัง Figure 2 ค่าฟลักซ์เริ่มต้นมีค่าเฉลี่ย 143.3 145.7 176.7 และ 148.0 ลิตร/ตร.เมตรชั่วโมง เมื่อกรองด้วยเมมเบรนขนาด 0.2 0.1 ไมโครเมตร 300 และ 50 กิโลดาลตัน ตามลำดับ ค่าฟลักซ์มีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) เมื่อมีค่า VCR เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดฟาวลิงในรูพรุนและชั้นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน

**Table 3. Microbiological properties of fresh sugar palm sap and permeate obtained by microfiltration (pore size 0.2 and 0.1  $\mu\text{m}$  at TMP 100 kPa) and ultrafiltration (MWCO 300 and 50 kDa at TMP 250 kPa) at cross-flow velocity 3.5 m/s temperature  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ .**

Properties	Fresh sugar palm sap	Permeate			
		0.2 $\mu\text{m}$	0.1 $\mu\text{m}$	300 kDa	50 kDa
Total viable count (CFU/ml)	$9.22 \times 10^7$	5.33	$3.25 \times 10^2$	6.67	$9.88 \times 10^3$
Lactic acid bacteria (CFU/ml)	$7.00 \times 10^6$	0	0	0	0
Yeast and mold (CFU/ml)	$7.08 \times 10^7$	0	0	0	$6.85 \times 10^2$





**Figure 2. Flux versus VCR during microfiltration (pore size 0.2 and 0.1 µm, TMP 100 kPa) and ultrafiltration (MWCO 300 and 50 kDa, TMP 250 kPa) of sugar palm sap at cross-flow velocity 3.5 m/s and temperature 50±1°C.**

(Mordon *et al.*, 2000)

จากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน มีค่าต่ำกว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน ทั้งนี้เนื่องจากระดับความดันขับที่ใช้และอาจจะเกิดจากผลของขนาดของรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า จึงมีความเป็นไปได้ที่สารแขวนลอยหรืออนุภาคขนาดเล็กเกิดการสะสมที่ผนังภายในรูพรุนได้มากกว่าส่งผลให้เกิดฟาวลิงอย่างรุนแรงและรวดเร็ว (Dornier *et al.*, 1995)

#### 4. ความต้านทานเนื่องจากฟาวลิง

การลดลงของฟลักซ์ในระหว่างการกรองเป็นปัญหาหลักต่อประสิทธิภาพกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน โดยในน้ำผลไม้ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ โปรตีนและสารแขวนลอย ซึ่งเป็นสารประกอบที่เป็นของแข็ง สามารถสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนหรืออุดตันรูพรุนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูพรุนและส่งผลต่อการเพิ่มความต้านทานการไหลของเพอมีเอท ของเมมเบรนเนื่องจากฟาวลิง (Youn *et al.*, 2004)

ความต้านทาน  $R_m$  สามารถคำนวณได้จากฟลักซ์ของน้ำสะอาดของเมมเบรนก่อนใช้งาน ความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงที่ไม่สามารถผันกลับได้ ( $R_{if}$ ) เป็นความต้านทานที่เกิดจากฟาวลิงบนผิวหน้าหรือในรูพรุนของเมมเบรนไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำไม่ว่าสภาวะใดๆ นอกจากใช้สารเคมีทำความสะอาด และความต้านทาน

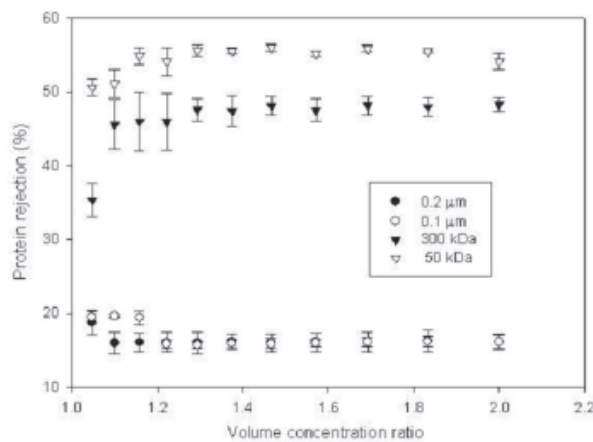
เนื่องจากฟาวลิงที่ผันกลับได้หรือจากชั้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ( $R_{pf}$ ) ซึ่งความต้านทานนี้สามารถกำจัดออกด้วยน้ำสะอาดที่ความเร็วตามขวางที่เหมาะสม โดยอาศัยแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนในระหว่างการกรอง

จากการศึกษาความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงในกระบวนการกรองน้ำตาลโตนด ด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน (Table 4) พบว่า  $R_m$  มีค่าจำเพาะในแต่ละเมมเบรน ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของขนาดรูพรุน และความหนาแน่นของรูพรุน (Zeman and Zydney, 1996) จากการทดลองพบว่าความต้านทาน  $R_m$  ของเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และ MWCO ขนาด 300 และ 50 กิโลดาลตัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.26 \times 10^{12}$   $1.38 \times 10^{12}$   $1.67 \times 10^{12}$  และ  $1.78 \times 10^{12}$  เมตร<sup>-1</sup> ส่วนค่าความต้านทาน  $R_{pf}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $7.34 \times 10^{12}$   $8.84 \times 10^{12}$   $5.46 \times 10^{12}$  และ  $4.99 \times 10^{12}$  เมตร<sup>-1</sup> ตามลำดับ และค่าความต้านทาน  $R_{if}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.49 \times 10^{12}$   $0.47 \times 10^{12}$   $0.29 \times 10^{12}$  และ  $0.23 \times 10^{12}$  เมตร<sup>-1</sup> สำหรับเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.1 ไมโครเมตร และ MWCO ขนาด 300 และ 50 กิโลดาลตัน ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทาน  $R_{if}$  มีค่าสูงกว่า  $R_{pf}$  ในทุกๆ ขนาดรูพรุนและ MWCO ของเมมเบรนที่ใช้ศึกษา ความต้านทาน  $R_{if}$  มักเกิดจากฟาวลิงที่ประกอบด้วยอนุภาคและสารโมเลกุลใหญ่ในสารป้อนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ซึ่งสะสมบนผิวหน้าของเมมเบรนและยึดกันด้วยแรง

**Table 4. Fouling resistances of microfiltration and ultrafiltration membranes**

Pore size/MWCO	0.2 µm	0.1 µm	300 kDa	50 kDa
<b>Resistance</b>				
$R_m (m^{-1}) \times 10^{12}$	1.26±0.04*	1.38±0.08	1.67±0.05	1.78±0.05
$R_{irf} (m^{-1}) \times 10^{12}$	0.49±0.21 <sup>a</sup>	0.47±0.15 <sup>a</sup>	0.29±0.06 <sup>b</sup>	0.23±0.03 <sup>b</sup>
$R_{rf} (m^{-1}) \times 10^{12}$	7.37±1.47 <sup>ns</sup>	8.84±0.04 <sup>ns</sup>	5.46±0.67 <sup>ns</sup>	4.99±0.07 <sup>ns</sup>

**Note** \* Each value is the mean of triplicate determinations ± standard deviation  
<sup>a-b</sup>, Mean within rows of permeate followed by the same letter are not significantly different at p>0.05  
<sup>ns</sup>, not significant at p>0.05



**Figure 3. Protein rejection during microfiltration (pore size 0.2 and 0.1 µm, TMP 100 kPa) and ultrafiltration (300 and 50 kDa, TMP 250 kPa) of sugar palm sap at cross-flow velocity 3.5 m/s and temperature 50±1°C.**

กระทำอย่างหลวมๆ สามารถหลุดออกได้ง่าย เมื่อปรับเปลี่ยนสภาวะการกรองหรือการล้างด้วยน้ำสะอาด ส่วนความต้านทาน  $R_{irf}$  เกิดจากฟาวลิงที่ใกล้ชิดและยึดด้วยแรงกระทำอย่างแข็งแรงกับเมมเบรนทั้งบนผิวหน้าและในรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งโดยทั่วไปมีน้อยกว่าค่า  $R_{rf}$  (Grandison et al., 2000) นอกจากนี้สังเกตได้ว่าเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.2 ไมโครเมตร มีค่าความต้านทาน  $R_{irf}$  สูงกว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการดูดซับหรืออุดตันของอนุภาคหรือตัวถูกละลายภายในรูพรุนของเมมเบรน โดยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่ามีโอกาสเกิดการอุดตันได้มากกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า โดยทั่วไปองค์ประกอบในน้ำผลไม้ทำให้เกิดฟาวลิงมากที่สุดคือ เพคติน โปรตีน และสารแขวนลอย แต่ในองค์-

ประกอบอื่นๆ เช่น สารประเภทน้ำตาล แร่ธาตุ และกรดอินทรีย์ ก็สามารถเกิดฟาวลิงได้เช่นเดียวกัน (Chilukuri et al., 2001; Crozes et al., 1993) สำหรับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันน้ำตาลโดนด อาจเป็นไปได้ว่าโปรตีนมีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดฟาวลิงทั้งที่ผิวหน้าและในรูพรุนของเมมเบรนนอกจากสารแขวนลอย จึงได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงการกักกันโปรตีนตลอดการทดลอง ซึ่งได้ผลดัง Figure 3 พบว่าเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุนขนาด 0.1 และ 0.2 ไมโครเมตรสามารถกักกันโปรตีนได้อยู่ในช่วง 10-20% ขณะที่เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันที่มี MWCO 300 และ 50 กิโลดาลตัน มีค่าการกักกันโปรตีนอยู่ในช่วง 40-60% จากค่าการกักกันชี้ให้เห็นว่าโปรตีนสามารถผ่านเมมเบรน

ระดับไมโครฟิลเตรชันได้มากกว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน จึงมีโอกาสดังกล่าวในรูปของเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันได้มากกว่า อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาถึงกลไกหรือตำแหน่งการเกิดฟาวลิงในเชิงลึก ให้เข้าใจถึงกลไกและตำแหน่งการเกิดฟาวลิง เพื่อที่จะสามารถหาวิธีลดหรือป้องกันการเกิดฟาวลิงได้เหมาะสม

### สรุป

จากการใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันในการกรองน้ำตาลโดนด พบว่าสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำตาลโดนดมีการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดี โดยเพอมีเอทที่ได้มีความใสเพิ่มขึ้นและมีความหนืดลดลง เนื่องจากปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลง ขณะที่ค่ากรด พีเอช ในเพอมีเอทไม่แตกต่างจากน้ำตาลโดนดสด กระบวนการทั้ง 2 ระดับสามารถแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำตาลโดนดได้ดี โดยทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด แบคทีเรียแลคติก ยีสต์และราในส่วนของเพอมีเอทลดลงอย่างมากได้ ซึ่งส่งผลดีต่อการยืดอายุการเก็บของน้ำตาลโดนด ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอททั้งระดับอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเกิดฟาวลิงและการเกิดคอนเซนเตรชันโพไลไรเซชัน โดยพบว่ามีความต้านทานเนื่องจากฟาวลิง  $R_{rf}$  และ  $R_{if}$  ของเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันมีค่าสูงกว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันเพิ่มความใสและลดปริมาณจุลินทรีย์ได้อย่างดี แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา และควรมีการศึกษาทำความเข้าใจกลไกการเกิดฟาวลิงในเชิงลึกเพื่อให้สามารถป้องกันหรือลดปัญหาดังกล่าวให้มากที่สุด

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเงินทุนการวิจัยจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยประจำปี 2546

### เอกสารอ้างอิง

- มาตรฐานชุมชน (ออนไลน์). 2546. สืบค้นจาก: <http://library.itsi.go.th/T/Fulltex/CPS/alphabetical/P1.html> (22 พฤษภาคม 2548).
- นิธิยา รัตนานนท์. 2545. เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ
- สุมาลี เหลืองสกุล. 2535. จุลชีววิทยาทางอาหาร. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร. กรุงเทพฯ
- Alvarez, S., Alvarez, R., Riera, F.A. and Coca, J. 1998. Influence of depectinization on apple juice ultrafiltration, *Colloids and Surfaces.*, 138: 377-382.
- A.O.A.C. 1999. Official Methods of Analysis of A.O.A.C. International. 16<sup>th</sup> ed, The Association of Official Analytical Chemists, Virginia.
- Bailey, A.F.G., Barbe, A.M., Hogan, P.A., Johnson, R.A. and Sheng, J. 2000. The effect of ultrafiltration on the subsequent concentration of grape juice by osmotic distillation, *J. Membrane Sci.*, 164: 195-204.
- 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.
- Dornier, M., Petermann, R. and Deloux, M. 1995. Influence of start-up procedure on crossflow microfiltration of raw cane sugar, *J. Food Eng.*, 24: 213-224.
- Carneiro, L., Iralla dos Santos, S., Flavia dos Santos, G., Matta, V.M. and Cabral, L.M.C. 2002. Cold sterilization and clarification of pineapple juice by tangential microfiltration, *Desalination.*, 148: 93-98.
- Cheryan, M. 1998. Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, Technomic publish Co. Lancaster, USA.
- Chilukuri, S.V.V., Marshall, A.D., Munro, P.A. and Singh, H. 2001. Effect of sodium dodecyl sulphate and cross-flow velocity on membrane fouling during cross-flow microfiltration of lactoferrin solutions, *Chem Eng and Proc.*, 40: 321-328.
- Crozes, G. Anselme, C. and Mallevialle, J. 1993. Effect of adsorption of organic matter on fouling of

- ultrafiltration membranes, *J. Membrane Sci.*, 84: 61-77.
- Grandison, A.S., Youravong, W. and Lewis M.J., 2000. Hydrodynamic factors effecting flux and fouling during ultrafiltration of skimmed milk, *Lait.*, 80 (1): 165-174.
- Jiratananon, R., Uttapap, D. and Tangamornsuksun, C. 1997. Self-forming dynamic membrane for ultrafiltration of pineapple juice, *J. Membrane Sci.*, 129: 135-143.
- 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.
- Matta, V.M., Moretti, R.H. and Cabral, L.M.C. 2004. Microfiltration and reverse osmosis for clarification and concentration of acerola juice, *J. Food Eng.*, 61: 477-482.
- 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.
- Mordon, M., Girard, B. and Moresoli, C. 2000. Modeling flux behavior for membrane filtration of apple juice, *Food Res Inter.*, 33: 539-548.
- Pereira, C.C., Rufino, J.M., Habert, A.C, Nobrega, R., Cabral, M.C. and Borges, C.P. 2002. Membrane for processing tropical fruit juice, *Desalination.*, 148: 57-60.
- 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.
- Youn, K.G., Hong, J.H., Bae, D.H., Kim, S.J. and Kim, S.D. 2004. Effective clarifying process of reconstituted apple juice using membrane filtration with filter-aid pretreatment, *J. Membran Sci.*, 228: 179-186.
- Zeman, L.J. and Zydney, A.L. 1996. Microfiltration and ultrafiltration principles and application, Marcel Dekker, Inc. New York.