บทที่ 1

การออกแบบและสร้างระบบการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชั่นและไมโครฟิลเตรชั่น

1.1 บทนำ

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชั่น(Ultrafiltration,UF)และไมโครฟิลเตรชั่น(Microfiltration,MF) เป็นกระบวนการที่ใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายชนิด ทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร เทคโนโลยีชีวภาพ เภสัชกรรม และเคมี ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เมมเบรนใน อุตสากรรมอาหาร เช่น ใช้ในการแยกน้ำและน้ำตาลแลคโตสออกจากโปรตีนนม การเก็บเกี่ยวโปรตีนจากหางนมในกระบวนการผลิตเนยแข็ง การแยกจุลินทรีย์เพื่อยืดอายุการเก็บและการลดความขุ่นในน้ำผลไม้และไวน์ ความสามารถในการแยกจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการ UF และ MF ในบางกรณีพบว่าสามารถใช้ทดแทนกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยวิธีทางความร้อนบางส่วนหรือทั้งหมดได้ จึงจัดเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ให้ปลอดเชื้อโดยไม่ใช้ความร้อน (Cold sterilization) ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความอ่อนไหวต่อความร้อน สำหรับประเทศไทยมีการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในอุตสาหกรรมบางชนิดแต่ไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากระบบกรองทั้งหมดต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งทำให้มีราคาแพง การขาดผู้เชี่ยวชาญภายในประเทศที่เพียงพอ และการขาดองค์ความรู้ด้านการผลิตเมมเบรนและการประยุกต์ใช้และการพัฒนาระบบกรองที่เพียงพอ ที่สามารถพัฒนาและใช้เทคโนโลยีเมมเบรนได้อย่างมีประสิทธิภาพและพึ่งตนเองได้ เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาและสร้างองค์ความรู้ทั้งในด้านการพัฒนาเมมเบรน การประยุกต์ใช้และการพัฒนาระบบกรอง

นอกจากนี้ข้อจำกัดสำคัญของกระบวนการ UF และ MF เมื่อนำมาใช้กับสารป้อนที่มีองค์ประกอบหรือตัวถูกละลาย โดยเฉพาะเมื่อมีตัวถูกละลายหลายชนิด คือการลดลงของฟลักซ์และการเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บกักของเมมเบรน เนื่องจากการเกิดฟาวลิ่งบนผิวหน้าและหรือในรูพรุนของเมมเบรน ส่งผลให้สมรรถนะของกระบวนการลดลง และการกำจัดฟาวลิ่งออกจากเมมเบรนมีผลกระทบไม่เฉพาะด้านต้นทุนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะสูงถึง 30 % ของค่าดำเนินการ แต่ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดและลดอายุการใช้งานของเมมเบรน (Cheryan,1998) ดังนั้นการลดหรือป้องกันการเกิดฟาวลิ่งจึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการกรอง ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเกิดฟาวลิ่ง ตลอดจนการศึกษาความเป็นไปด้านในการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนกับสารป้อนชนิดต่าง ๆ รวมถึงการทดสอบเมมเบรนชนิดใหม่ จำเป็นต้องใช้ระบบกรองที่มีช่วงการดำเนินการที่กว้างกว่าระบบกรองในระดับอุตสาหกรรมที่ถูกออกแบบให้เหมาะสมเฉพาะสารป้อนแต่ละชนิด กล่าวคือระบบการกรองในระดับการวิจัยนี้ ต้องสามารถใช้กับสารป้อนได้หลากหลายชนิด สามารถทดสอบที่อัตราการไหลที่กว้าง ทั้งในช่วงการไหลแบบราบเรียบ

และปั่นป่วน สามารถปรับความดันหรืออุณหภูมิ ได้ในช่วงกว้าง ใช้ตัวอย่างสารป้อนน้อย และมีระบบการวัดที่ถูกต้องและมีระบบบันทึกข้อมูลที่ดี ดังนั้นการมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ดีนี้จะทำให้สามารถวิจัยเชิงลึกในด้านดังกล่าวเป็นไปได้ (Huisman *et al*, 1997)

ในการทดสอบระบบกรองโดยการศึกษาการเกิดฟาวลิ่งมักใช้สารละลายโปรตีนเป็นสารป้อนตัวอย่าง ซึ่งมีราคาแพงและมีรายงานข้อมูลเหล่านี้อยู่แล้ว ในการทำวิจัยนี้ได้เลือกน้ำตาลโตนดเป็นตัวอย่างสารป้อนตัวอย่าง เนื่องจากมีองค์ประกอบหลายชนิดซึ่งมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดฟาวลิ่ง เช่น จุลินทรีย์ โปรตีน เป็นต้น และที่สำคัญน้ำตาลโตนดสดเป็นวัตถุดิบที่ผลิตได้มากในจังหวัดสงขลา แต่มีปัญหาด้านการเก็บรักษา การแปรรูป และเสื่อมเสีย แม้ว่าการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนสามารถยืดอายุการเก็บได้ แต่ทำให้คุณสมบัติด้านกลิ่นรสซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของน้ำตาลโตนดเสียไป ดั้งนั้นเพื่อยืดอายุการเก็บของน้ำตาลโตนดสดจำเป็นต้องใช้กระบวนการที่ใช้ความร้อนต่ำหรือไม่ใช้ความร้อน การใช้กระบวนการกรองด้วย UF หรือ MF จึงเป็นกระบวนการที่เหมาะในการแก้ปัญหาดังกล่าว ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระบบเมมเบรนนอกจากจะเป็นประโยชน์ในด้านการเข้าใจการเกิดฟาวลิ่งมากขึ้นแล้ว ยังเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบการกรองน้ำตาลโตนดหรือสารป้อนชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงในระดับอุตสาหกรรมและการพัฒนาการผลิตเมมเบรน

วัตถุประสงค์

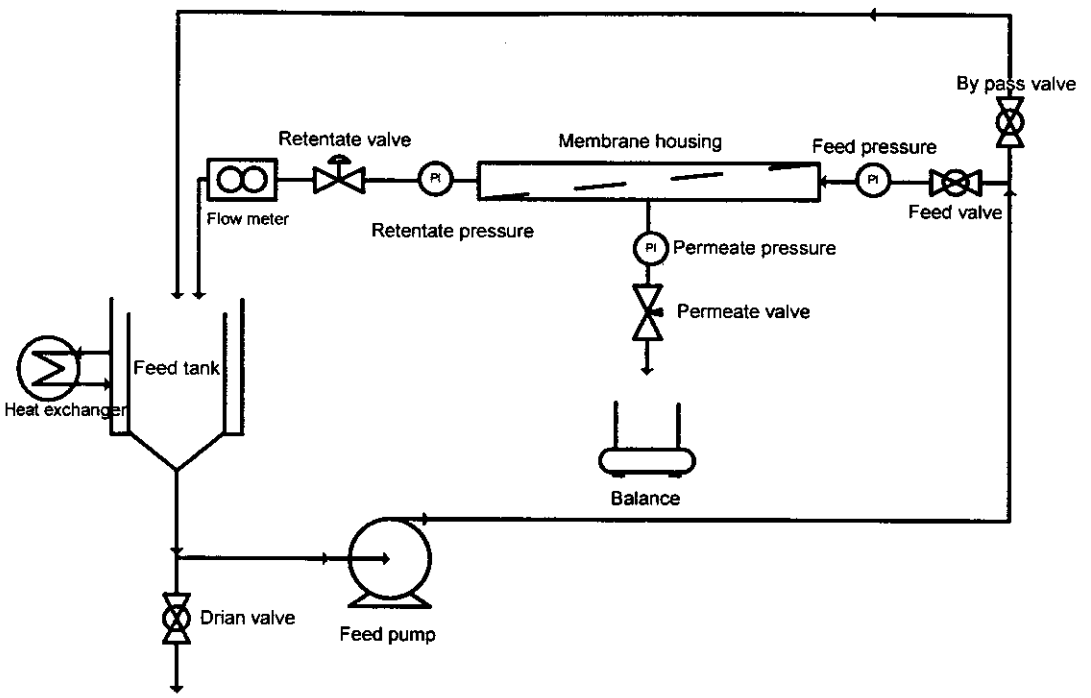
เพื่อออกแบบและสร้างระบบการกรองแบบไหลขวาง สำหรับกระบวนการ UF และ MF สำหรับการศึกษาวิจัยทั้งด้านหลักพื้นฐานและการประยุกต์ในระดับการทดลอง (Laboratory scale)

1.2 หลักการออกแบบและคุณลักษณะของระบบกรอง

คุณลักษณะของระบบกรองที่ใช้ในระดับการทดลองต้องเป็นระบบที่มีลักษณะยืดหยุ่นสามารถปรับเปลี่ยนหรือใช้กับเมมเบรนโมดูลต่างๆ ได้ง่าย ในการออกแบบครั้งนี้มีเป้าหมายที่จะให้ใช้ได้กับเมมเบรนโมดูลที่เป็นท่อเซรามิกเป็นพื้นฐาน แต่อาจจะปรับเปลี่ยนระบบเพียงเล็กน้อยเมื่อต้องใช้กับโมดูลชนิดอื่น มีอุปกรณ์วัดตัวแปรของสภาวะการดำเนินการที่แม่นยำพร้อมกับมีระบบควบคุมและแสดงผลตัวแปรอย่างครบถ้วน ระบบกรองที่ได้ออกแบบมีลักษณะดังภาพที่ 1 และ 2 ระบบกรองติดตั้งบนแผ่นรองรับ (skid) ทำด้วยสแตนเลส เกรด 316

1.2.1 ระดับความดันและช่วงอัตราการไหล

สภาวะการดำเนินการที่สำคัญของระบบเมมเบรนคือความเร็วตามขวางของสารป้อนและระดับความดัน ระดับความเร็วตามขวาง หรือช่วงการไหลของระบบควรครอบคลุมการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน โดยควรมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ไม่น้อยกว่า 50,000 ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ใช้ปั๊มที่สามารถปรับอัตราการไหลได้โดยใช้อินเวอร์ทเตอร์ (Danfoss, Danmark) และวาล์วปรับความดันกลับ (back pressure) ชนิดไดอะแฟรมควบคุม



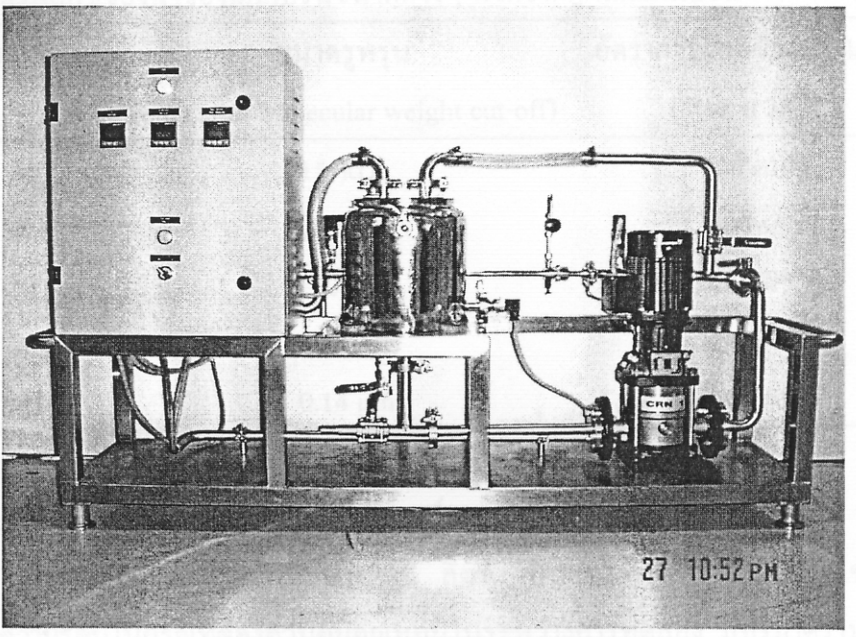
ภาพที่ 1 ส่วนประกอบและ ระบบกรองระดับอัลตราและไมโครฟิลเตรชั่น

โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในระดับอัลตราและไมโครฟิลเตรชั่นอยู่ในระหว่าง 0.1-5 บาร์ ซึ่งปั๊มชนิดหอยโข่ง (Grunfoss, Germany) ขนาด 0.37 kW ให้ความดันสูงสุด 3.1 บาร์ ที่อัตราการไหล 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันที่ได้ต่ำกว่าความดันสูงสุดที่ต้องการเนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณ

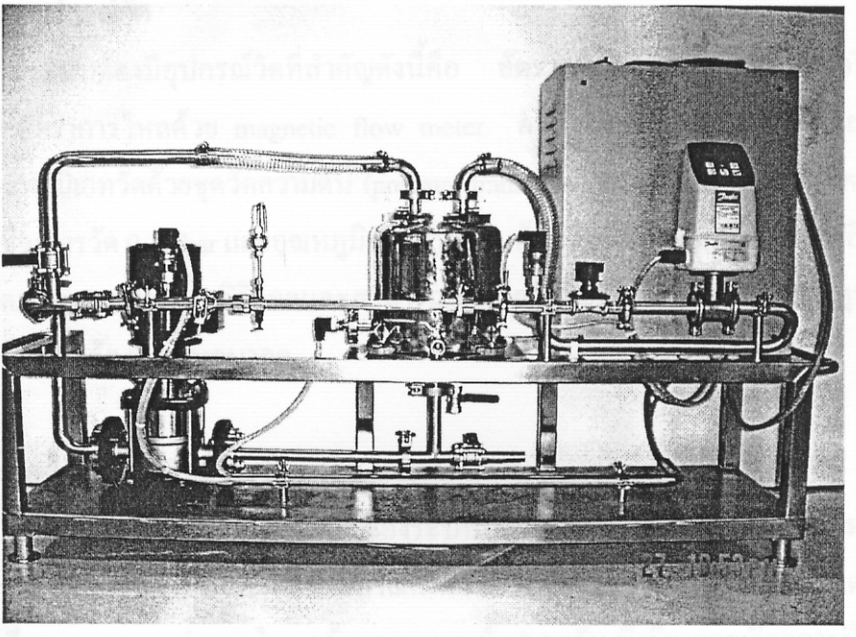
1.2.2 ชนิดของเมมเบรนและเมมเบรนโมดูล

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นระบบกรองต้องมีความยืดหยุ่น สามารถปรับใช้กับเมมเบรนหลายชนิดโดยในเบื้องต้นได้ออกแบบให้สามารถใช้ได้กับเมมเบรนเซรามิก (ZrO_2-TiO_2) ชนิดท่อ (Carbosep, France) ความยาวของเมมเบรน 42 cm มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกและภายใน 10 และ 6 cm ตามลำดับ มีพื้นที่กรอง 0.01 m^2 สอดอยู่ในท่อบรรจุ (Housing) ที่ทำด้วยสแตนเลสขนาดรูพรุนและ Molecular weight cut-off (MWCO) ของเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่นคือ 0.14 μm และระดับอัลตราฟิลเตรชั่นคือ 15 50 150 และ 300 kDa แต่อย่างไรก็ตาม ระบบกรองที่ออกแบบสามารถปรับใช้กับโมดูลชนิดอื่นๆ ได้เมื่อต้องการ เช่น ชนิดแผ่น ท่อม้วนและเส้นใยกลวงโดยปรับเปลี่ยนระบบเล็กน้อย ตารางที่ 1 แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำของเมมบรนขนาดต่างๆ

(a)



(b)



ภาพที่ 2 ภาพถ่ายระบบกรองระดับอัลตราและไมโครฟิลเตรชั่น

a) ภาพถ่ายด้านหน้าของระบบกรอง และ b) ภาพถ่ายด้านหลังของระบบกรอง

ตารางที่ 1 ค่าฟลักซ์ของน้ำของเมมเบรนขนาดต่างๆ ที่ได้จากผู้ผลิตเมมเบรน

เมมเบรน	ขนาดรูพรุน (pore size/ Molecular weight cut-off)	อัตราการไหลของน้ำ l/h.m^2 (4bar at 25 ^{0}C)
M2	15 kDa	500 ±100
M8	50 kDa	400 ±80
M1	150 kDa	750 ±150
M9	300 kDa	800 ±160
M14	0.14 µm	1500 ±300

1.2.3 ระบบท่อ ถังสารป้อน ข้อต่อ และวาล์ว

กำหนดให้ถังสารป้อนมีขนาด 5 ลิตร เป็นแบบถัง 2 ชั้น เพื่อใช้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกรณีที่ต้องควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการทดลอง มีปริมาตรในระบบน้อย ระบบท่อและข้อต่อและวาล์วเปลี่ยนทิศทางทำด้วยสแตนเลส (316L) รวมทั้งวาล์วที่สร้างความดันกลับ อุปกรณ์ทุกชนิดที่สัมผัสกับสารป้อนต้องทนกรดและด่าง เหมาะกับสารป้อนที่เป็นอาหาร

1.2.4 อุปกรณ์วัด

ระบบต้องมีอุปกรณ์วัดที่สำคัญดังนี้คือ อัตราการไหลของสารป้อนหรือรีเทนเททวัดด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลด้วย magnetic flow meter ความดันของสารป้อนขาเข้าและออก และความดันของเพอมิเอทวัดด้วยชุดวัดความดัน (pressure transducer, Danfoss, Danmark) มีความละเอียด ±0.01 bar มีช่วงการวัด 0-10 bar และอุณหภูมิของสารป้อนด้วยเทอร์โมคับเปิ้ลมีความละเอียด ±0.01°C ระบบการวัดแสดงผลเป็นแบบดิจิตอลและสามารถพ่วงต่อกับระบบแสดงผลและควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ได้เมื่อต้องการในอนาคต

1.3 การทดสอบการทำงานของระบบกรอง

การทดสอบระบบการทำงานของระบบบกรองทั้งระดับไมโครและอัลตราฟิลเตรชั่น โดยการศึกษาค่าฟลักซ์ของน้ำและการประมาณค่าความต้านทานของเมมเบรน 4 ขนาด นอกจากนี้ได้ใช้ศึกษาศึกษาการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนทั้ง 2 ระดับ ซึ่งมีรายละเอียดการศึกษาในบทที่ 2 และ 3

ค่าความต้านทานการไหลของเพอมิเอทของเมมเบรน (membrane resistance, R_m) หาได้โดยการหาค่าเพอมิเอทฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ความดันต่างแล้วพล็อตกราฟระหว่างค่าฟลักซ์ (flux, J) กับความดันขับ (transmembrane pressure, TMP) หาค่าความชั่น เพื่อคำนวณค่า R_m โดยใช้ Darcy's law

$$J = \frac{TMP}{\mu R_m} \qquad [1.1]$$

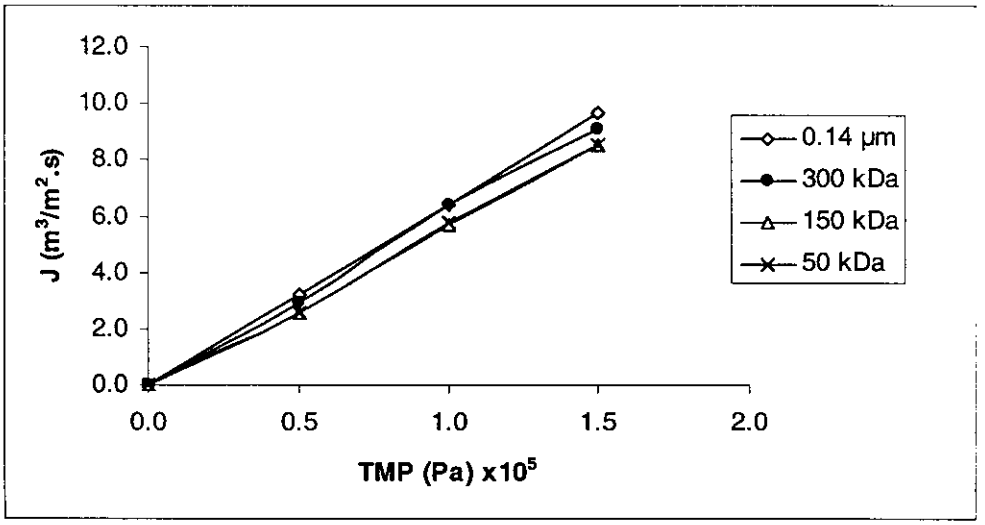
โดยที่ J คือค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท ($m^3.m^{-2}s^{-1}$ หรือ $m.s^{-1}$)

R_m คือความต้านทานของเมมเบรน (m^{-1})

TMP คือความดันขับ (Pa)

μ คือความหนืดของเพอมิเอท (Pa.s)

ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำกับความดันของเมมเบรนชนิดต่างๆ แสดงภาพที่ 3 และตารางที่ 2 แสดงค่า R_m ที่คำนวณด้วยสมการ (1)



ภาพที่ 3 ฟลักซ์ของน้ำกับความดันขับของเมมเบรนชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานการไหลของเมมเบรน

Pore size /MWCO	R_m x10^{12} (m^{-1})
0.14 µm	1.69
300 kDa	1.73
150 kDa	1.80
50 kDa	1.80

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่า R_m ของเมมเบรนมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดรูพรุนของเมมเบรน มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า R_m ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นอีก เช่นความหนาแน่นของ

รูพรุน ในกรณีที่เป็นเมมเบรนที่ทำจากพอลิเมอร์ที่ยังไม่เคยผ่านการอัดด้วยความดัน ค่า R_m ยังขึ้นกับความดันที่ใช้ เนื่องจากพอลิเมอร์ยุบตัวเมื่อถูกอัดด้วยความดัน (compaction) แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นกับเมมเบรนที่ทำจากเซรามิก (Huisman *et al.* 1997)

1.4 สรุป

ระบบกรองที่ออกแบบและสร้างสามารถทำงานได้ตามเป้าหมาย ยกเว้นความดันขับซึ่งไม่สามารถทำได้ถึง 5 บาร์ เนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณในการจัดซื้อปั๊ม วัสดุอุปกรณ์ที่สัมผัสกับวัสดุอาหารและวัสดุชีวภาพและข้อต่อ ข้องอ วาล์ว ได้ออกแบบโดยใช้หลักสุขอนามัย (hygienic design) ระบบวัดแสดงผลเป็นแบบดิจิตอลซึ่งทำให้การบันทึกและติดตามทำได้สะดวก การควบคุมความดันและอัตราการไหลสามารถทำได้ง่ายโดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์และวาล์วความดันกลับ อุณหภูมิของสารป้อนสามารถควบคุมโดยใช้ถังสารป้อนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเพียงพอ ได้ทดสอบการทำงานของระบบโดยใช้น้ำเป็นสารป้อนเพื่อหาค่าความต้านทานการไหลของเพอมมิเอทของเมมเบรนพบว่าระบบสามารถทำงานได้ดี นอกจากนี้ยังได้ใช้ศึกษาค่าฟลักซ์ ฟาวลิ่ง กลไกการเกิดฟาวลิ่ง และค่าฟลักซ์วิกฤติในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนด (บทที่ 2 และ 3) แต่ไรอย่างยังต้องการชุดติดตามการไหลเพอมิเอทโดยใช้เครื่องชั่งที่สามารถบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์และระบบการแสดงและบันทึกความดัน อัตราการไหลและอุณหภูมิด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้สามารถศึกษาติดตามค่าเหล่านี้ได้ละเอียดและแม่นยำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาทั้งในด้านการเข้าใจถึงกลไกการแยกสารและการเกิดฟาวลิ่งเมื่อใช้สารป้อนชนิดต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

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

Huisman, I.H., Johansson, D., Trägårdh, G. and Trägårdh, C. 1997. Design of a crossflow microfiltration unit for studies of flux and particle transport, Trans. IChemE. 75: 508-512.