บทที่ 3

ผลการทดลอง และบทวิจารณ์

จากการศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้ได้แสดงผลการทดลอง ดังนี้

3.1 คุณสมบัติของน้ำฝรั่ง

3.2 ค่าฟลักซ์น้ำกลั่นผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน

3.3 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อเพอมิเอทฟลักซ์

3.4 ค่าความต้านทานการไหลผ่านเมมเบรนต่าง ๆ

3.5 ผลของความดัน และอัตราการไหลต่อการกักกัน

3.1 คุณสมบัติของน้ำฝรั่ง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำฝรั่งก่อนและหลังการทดลอง โดยวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความขุ่น (NTU) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในรูปของความหวาน (°บริกซ์) ปริมาณกรดทั้งหมด (กรัม/ลิตร) และปริมาณของแข็งทั้งหมด (กรัม/ลิตร) หลังจากการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดต่างๆ และขนาดรูพรุนต่างๆ พบว่าคุณสมบัติของน้ำฝรั่งมีค่าดังตาราง 3.1 จะเห็นว่าน้ำฝรั่งหลังจากผ่านการกรองแล้วมีปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ลดน้อยลง โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในน้ำฝรั่งก่อนและหลังกรองมีความแตกต่างกันน้อยมากหรือเกือบคงที่ อาจกล่าวได้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ก่อนและหลังกรองไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ค่าความหวานหรือของแข็งที่ละลายได้ (Dissolved solid:DS) ลดลงไม่มากนัก ค่าที่ลดลงมากอย่างเห็นได้ชัดเจนคือ ค่าความขุ่น (Turbidity) และปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) ตามลำดับ พบว่าน้ำฝรั่งที่ผ่านการกรองแล้วมีลักษณะใสออกเหลืองอ่อนจนถึงเข้มปานกลาง ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดรูพรุนของเมมเบรน มีกลิ่นหอมของน้ำฝรั่งมาก นอกจากนี้ปริมาณกรดทั้งหมด (Total acidity: TA) ในน้ำฝรั่งหลังผ่านการกรองด้วยเมมเบรนมีค่าลดลงด้วย จากข้อมูลของ อมรรัตน์ มุขประเสริฐ(2545) ซึ่งได้รายงานถึงองค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำฝรั่งจากผลสด (ตาราง ข.1)

ตาราง 3.1 คุณสมบัติของน้ำฝรั่งก่อนและหลังการทดลอง

เมมเบรน		pH	TA (g/l)	DS (^{o}Brix)	TS (g/l)	Turbidity (NTU)
Feed		3.97 –4.20	1.54 –2.66	7.20 –8.00	21.26-30.72	62.10-98.70
Peameate	Polysulfone					
	MWCO 50,000	3.85	1.35	5.98	3.78	0.56
	MWCO 100,000	4.05	1.94	5.82	3.35	2.37
	Polyvinilidene fluoride					
	- GVWP	3.95	1.98	7.51	6.57	4.18
	- GVHP	3.91	1.36	6.90	13.92	3.57
	Cellulose nitrate					
	- 0.10 µm	3.83	2.24	6.38	6.90	5.74
	- 0.45 µm	4.10	1.73	6.70	15.13	14.08
	Cellulose acetate	4.10	1.51	6.65	10.62	13.26
	Ceramic	3.98	1.83	7.22	2.05	4.82

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะความใสของน้ำฝรั่งหลังการทดลองพบว่า น้ำฝรั่งจากการกรองด้วยเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันมีความเข้มของสีมากกว่าจากการกรองด้วยเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยจะมีลักษณะสีเหลืองอ่อนถึงเข้มปานกลาง แต่น้ำฝรั่งหลังจากการกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันมีลักษณะค่อนข้างใส กลิ่นของน้ำฝรั่งหลังจากการกรองด้วยเมมเบรนทั้งสองแบบจะมีลักษณะความเข้มของกลิ่นใกล้เคียงกัน แต่มากกว่าในน้ำฝรั่งก่อนการกรอง

ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานของ Wu และคณะ (1990) ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบการทำน้ำแอปเปิ้ลให้ใสด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้เมมเบรนชนิดเซรามิกส์ขนาดรูพรุน 0.1 ไมโครเมตร และเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟนขนาดรูพรุน MWCO 5,000 และ 50,000 พบว่าน้ำแอปเปิลหลังจากการกรองด้วยเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันมีลักษณะสีเข้มกว่า ค่าความขุ่น ปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณ

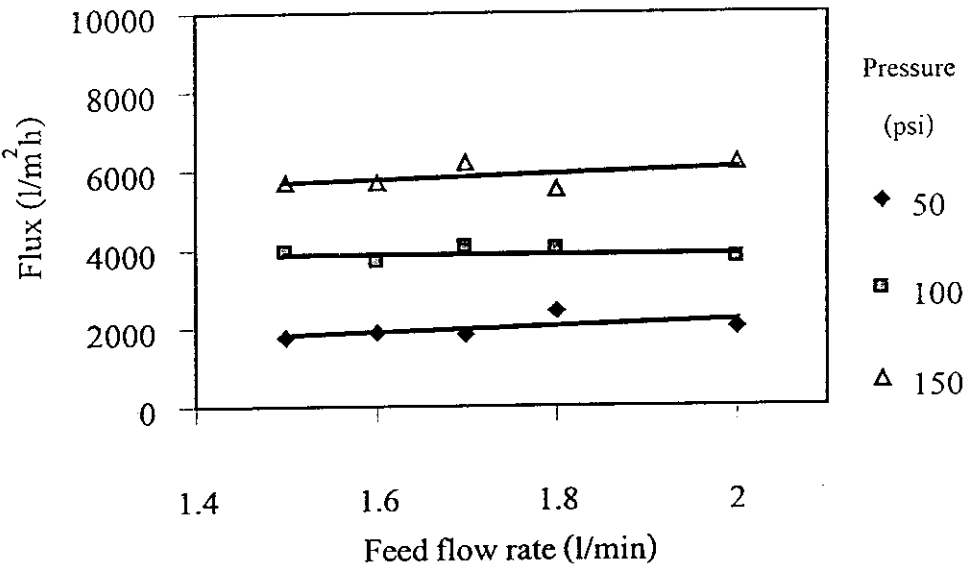
ของแข็งที่ละลายได้ (°บริกซ์) มากกว่าน้ำแอปเปิลที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน นอกจากนี้ได้รับการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสด้วย ปริมาณเพอมิเอทฟลักซ์จากการกรองด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันมากกว่าจากกระบวนการกรองด้วยอัลตราฟิลเตรชันภายใต้การทดลองที่สภาวะคล้ายคลึงกัน แต่ไม่มีความแตกต่างของพลังงานที่ใช้ Yu และคณะ (1986) รายงานว่าองค์ประกอบของรสชาติที่สำคัญต่างๆในน้ำเสาวรสถูกกักกันไว้ได้ร้อยละ 80 เมื่อกรองด้วยเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

3.2 การทดสอบฟลักซ์ของน้ำของเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน

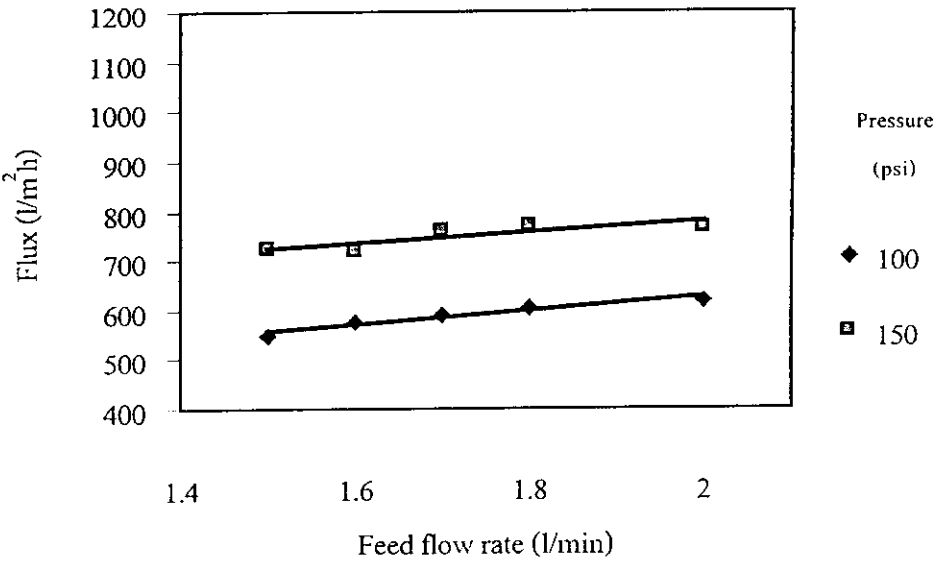
ได้ทำการตรวจสอบคุณภาพของเมมเบรนก่อนการใช้งาน โดยทำการทดสอบฟลักซ์ของน้ำผ่านเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน ได้ผลการทดลองดังนี้

3.2.1 เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน

จากการศึกษาการทดสอบฟลักซ์น้ำกลั่นผ่านเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 50,000 และ 100,000 ที่อัตราการไหลของสารป้อนและความดันต่างๆ

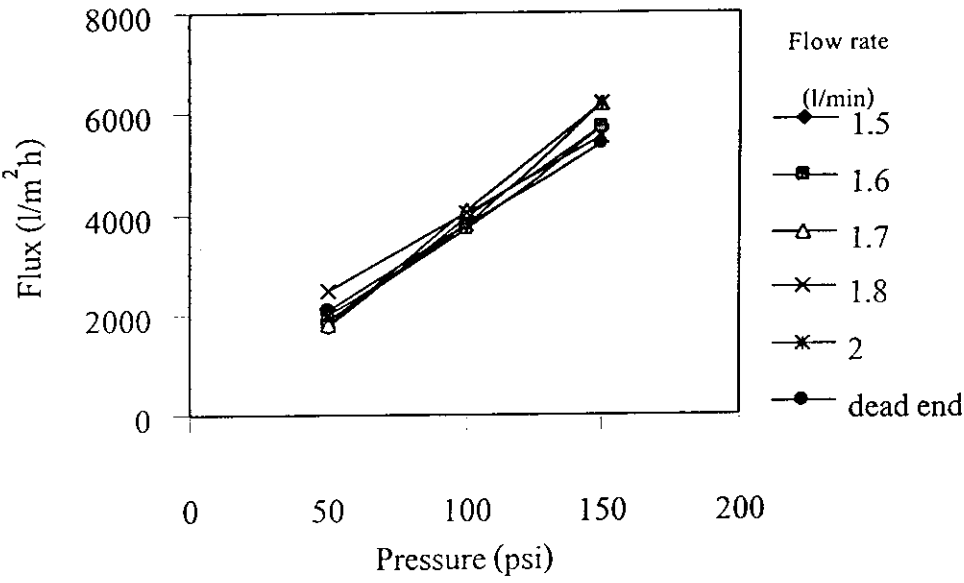


ภาพประกอบ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำกลั่นกับอัตราการไหลสารป้อนที่ความดันต่างๆ สำหรับการกรองด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 100,000 ระบบการกรองแบบไหลขวาง



ภาพประกอบ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำกลั่นกับอัตราการไหลสารป้อนที่ความดันต่างๆ สำหรับการกรองด้วย เมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 50,000 ระบบการกรองแบบไหลขวาง

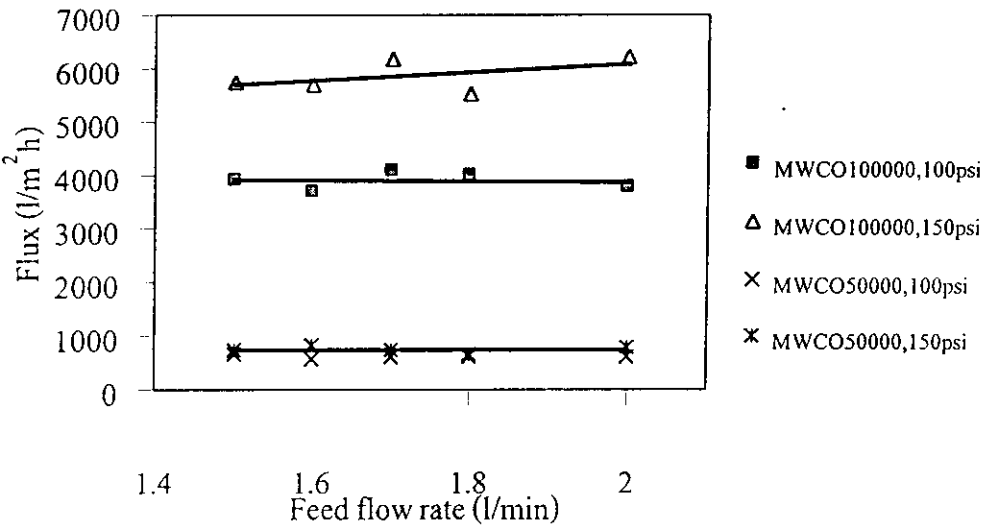
จากการทดลองพบว่าฟลักซ์ของน้ำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันแต่ไม่ขึ้นกับอัตราการไหล ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (3) ดังภาพประกอบ 3.1 และ 3.2 ฟลักซ์น้ำของเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน MWCO 50,000 มีค่า 576.0 - 820.8 ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง ฟลักซ์น้ำของเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน MWCO 100,000 มีค่า 1,756.8 - 6,199.2 ลิตร/เมตร^2 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำกลั่นกับความดัน ที่อัตราการไหลสารป้อนต่างๆ สำหรับการกรองด้วย เมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 100,000 ระบบการกรองแบบไหลขวาง

เมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์น้ำของเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน MWCO 100,000 เมื่อกรองด้วยระบบการไหลแบบ dead-end มีค่า 2,088.0 - 5,403.6 ลิตร/เมตร^2 ชั่วโมง โดยฟลักซ์น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าฟลักซ์น้ำจากระบบการไหลแบบ dead-end มีค่าใกล้เคียงกับระบบการไหลแบบขวาง นั่นคือ ระบบการไหลแบบ dead-end และแบบไหลขวางไม่มีผลต่อฟลักซ์น้ำเมื่อดำเนินการที่ความดันต่ำ (50 ปอนด์/นิ้ว^2) แต่ระบบการไหลแบบขวาง มีค่าฟลักซ์น้ำมากกว่าระบบการไหลแบบ dead- end เมื่อความดันสูงขึ้น ดังภาพประกอบ 3.3

เปรียบเทียบผลของขนาดรูพรุนต่อฟลักซ์น้ำกลั่นของเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน MWCO 50,000 และ 100,000 ดังภาพประกอบ 3.4 ที่ความดัน 100 ปอนด์/นิ้ว^2 พบว่าขนาดรูพรุน MWCO 100,000 ให้ปริมาณฟลักซ์น้ำกลั่นสูงกว่าขนาดรูพรุน MWCO 50,000 ทุกค่าอัตราการไหลและความดัน ดังนั้นความต้านทานเมมเบรนของโพลีซัลโฟนขนาดรูพรุน MWCO 100,000 น้อยกว่าความต้านทานเมมเบรนของโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 50,000

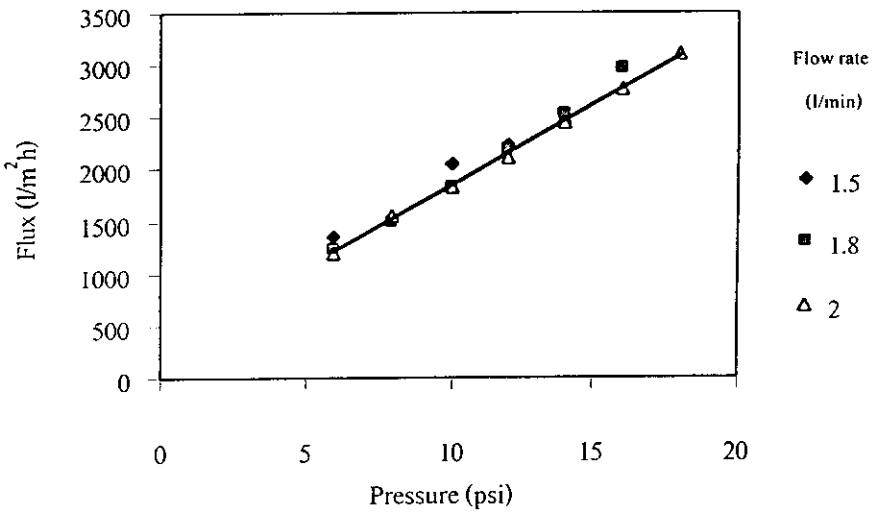


ภาพประกอบ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำกลั่นกับความดัน ที่อัตราการไหลสารป้อนต่างๆ สำหรับการกรองด้วย เมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 50,000 และ 100,000 ระบบการกรองแบบไหลขวาง

และเมื่อคำนวณค่าความต้านทานของเมมเบรน (R_m) พบว่า ค่าความต้านทานของเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน MWCO 50,000 มีค่า 1.30 $\pm$ 0.30 กิโลปาลคาล/(ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง) และ MWCO 100,000 มีค่า 0.17 $\pm$ 0.02 กิโลปาลคาล/(ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง)

3.2.2 เมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน

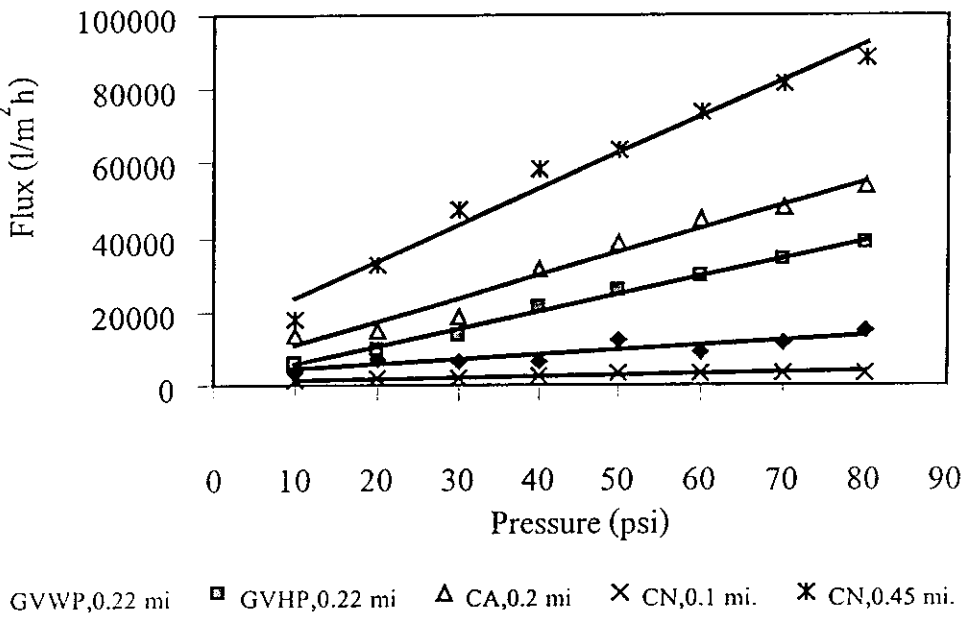
ทดสอบผ่านเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ขนาดรูพรุน 0.3 ไมโครเมตร ที่ความดัน 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 ปอนด์/นิ้ว^2 อัตราการไหล 1.5, 1.8, และ 2.0 ลิตร/นาที พบว่าฟลักซ์น้ำของเมมเบรนเซรามิกส์ มีค่า 1202.4 - 3310.4 ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.5 เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดัน แต่ไม่ขึ้นกับอัตราการไหล ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (3)



ภาพประกอบ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำกลั่นกับอัตราการไหลสารป้อนที่ความดันต่างๆ สำหรับการกรองด้วย เมมเบรนชนิดเซรามิกส์ขนาดรูพรุน 0.3 ไมโครเมตร ระบบการกรองแบบไหลขวาง

เมื่อทำการทดสอบฟลักซ์ของน้ำผ่านเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP และ GVWP) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร เซลลูโลสอะซิเตท ขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร เซลลูโลสไนเตรท ขนาดรูพรุน 0.1 และ 0.45 ไมโครเมตร ด้วยระบบการกรองแบบไหลขวาง อัตราการไหลสารป้อนคงที่ 1 ลิตร/นาที ดังภาพประกอบ 3.6 พบว่าให้ผลทำนองเดียวกับเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ คือ ค่าฟลักซ์น้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นในทุกชนิดของเมมเบรน โดยมีค่าฟลักซ์น้ำของเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP) 5774.4 - 38523.6 ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง เมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVWP) 3931.2 - 14547.6 ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง เซลลูโลสอะซิเตท 13395.6 - 53701.2 ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง เซลลูโลสไนเตรท ขนาดรูพรุน 0.1 ไมโครเมตร 1242.0 - 32292.0 ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง และ เซลลูโลสไนเตรท ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร 17974.8 - 88682.4 ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง

เปรียบเทียบผลของคุณสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ GVHP และ GVWP พบว่า เมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVWP: มีคุณสมบัติความชอบน้ำ) จะมีค่าฟลักซ์น้ำต่ำกว่าเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP: มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ เนื่องจากมีความพรุนน้อยกว่าเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์



ภาพประกอบ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำกลั่นกับอัตราการไหลสารป้อน ที่ความดันต่าง ๆ โดยใช้เมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ระบบการกรองแบบไหลขวาง

ตาราง 3.2 ความต้านทานของเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน

ชนิดเมมเบรน	ขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)	R_m (กิโลปาสคาล/(ลิตร/เมตร^{2}ชั่วโมง))
โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์		
- GVHP	0.22	0.013±0.002
- GVWP	0.22	0.030±0.012
เซลลูโลสอะซิเตท	0.22	0.009
เซลลูโลสไนเตรท	0.10	0.11±0.05
	0.45	0.005±0.001
เซรามิกส์	0.30	0.035±0.005

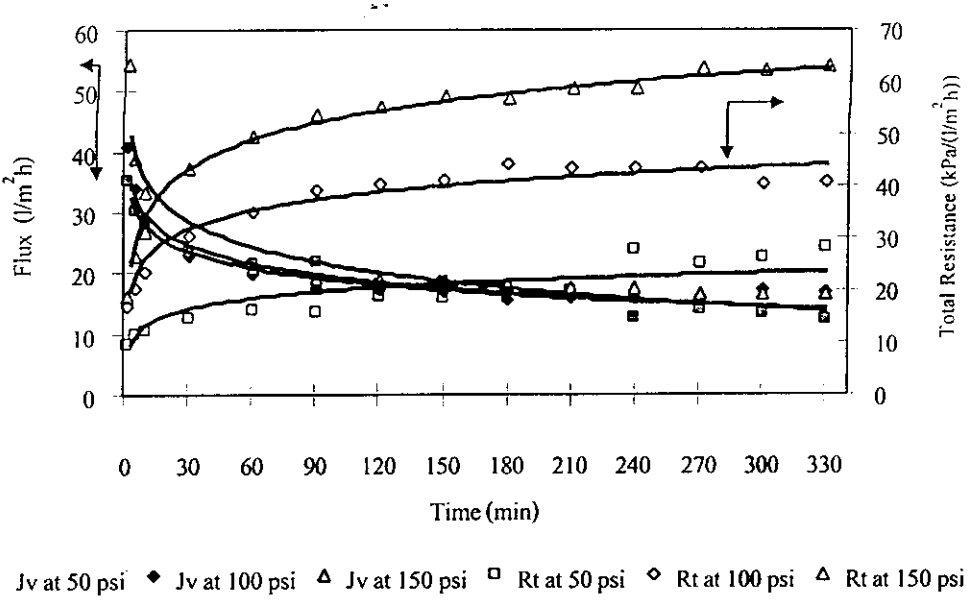
(GVHP) ที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวหน้าเมมเบรนแล้ว ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Madaeni และ Fane (1996) นอกจากนี้ได้รายงานว่าเมมเบรนทั้งสองมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุลบ

คำนวณค่าความต้านทานของเมมเบรน (R_M) ของเมมเบรนชนิดต่างๆ ได้ดังตาราง 3.2

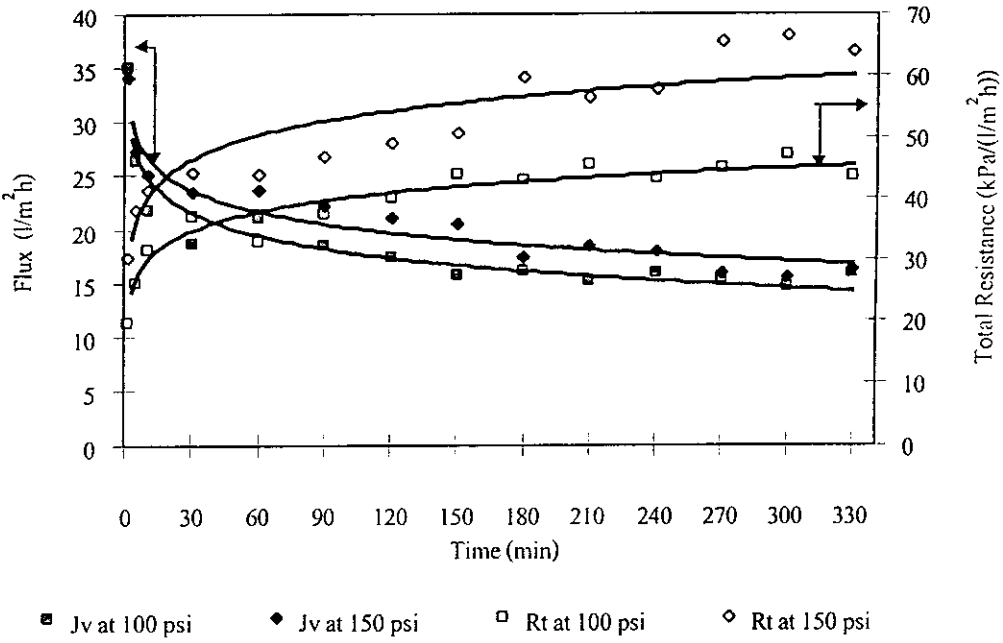
3.3 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อเพอมิเอทฟลักซ์

3.3.1 การลดลงของเพอมิเอทฟลักซ์ต่อเวลา

ทดลองหาค่าฟลักซ์ของน้ำฝรั่งหรือเพอมิเอทฟลักซ์ จากการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันได้ผลการทดลองดังนี้



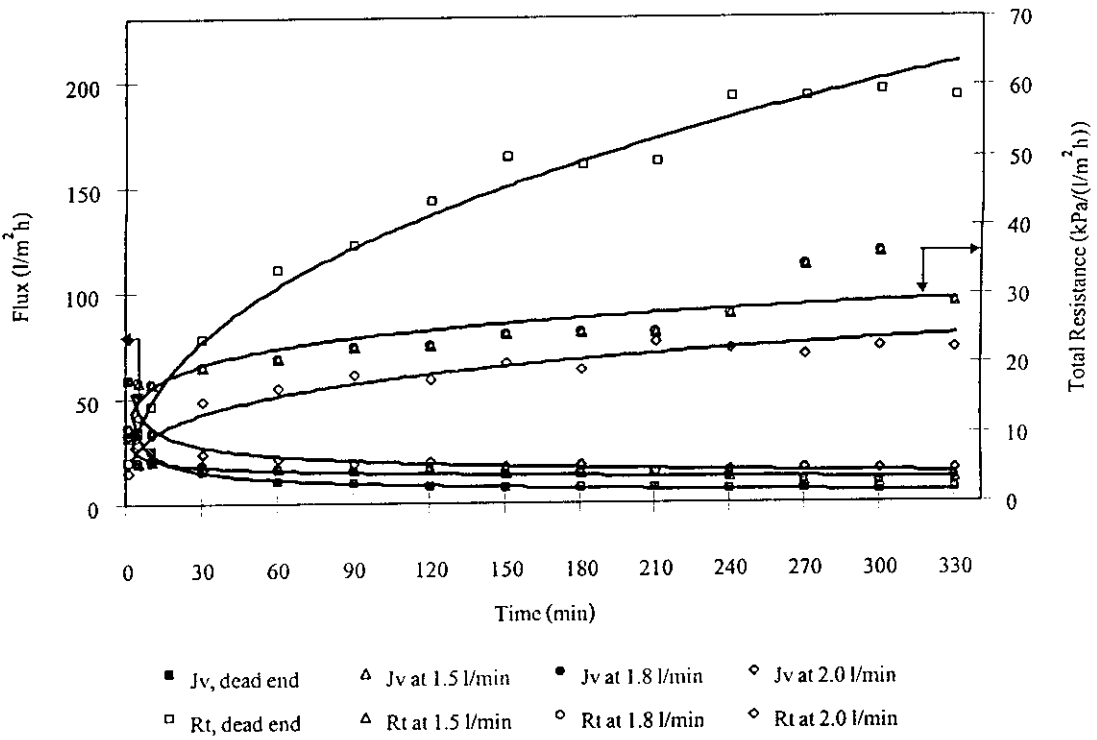
ภาพประกอบ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 100,000 อัตราการไหลสารป้อน 2.0 ลิตร/นาที ระบบการกรองแบบไหลขวาง



ภาพประกอบ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 50,000 อัตราการไหลสารป้อน 2.0 ลิตร/นาที ระบบการกรองแบบไหลขวาง

1. กระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

ศึกษาการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟนขนาดรูพรุน 50,000 และ 100,000 ภาพประกอบ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาในการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน 100,000 ระบบการกรองแบบไหลขวาง พบว่า เพอมิเอทฟลักซ์ลดลงต่อเวลา โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก และเมื่อเวลาผ่านไป ฟลักซ์ลดลงอย่างต่อเนื่องช้าๆ จนมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ การที่ฟลักซ์ลดลงในช่วงแรกอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและ เจลโพลาไรเซชัน ซึ่ง Bhattacharya และคณะ (2001) ได้พบว่า การลดลงของฟลักซ์อย่างรวดเร็วในช่วง 2 – 3 นาทีแรกของการกรอง เนื่องจากการเกิดความดันออสโมติกของสารละลายเพิ่มขึ้น และการเพิ่มความต้านทานของการกรองผ่านเมมเบรนของตัวทำละลาย



ภาพประกอบ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 100,000 ความดัน 50 ปอนด์/นิ้ว^2

เนื่องจากชั้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Carnerio และคณะ (2002) และ Chiampo และ Conti (1999) ซึ่งพบว่าเพอมิเอทฟลักซ์จะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก หลังจากนั้นเพอมิเอทฟลักซ์จะเริ่มลดลงอย่างช้า ๆ ตลอดเวลา หรือเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากถึงจุดสมดุลของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเริ่มเกิดเป็นชั้นเจลจากปรากฏการณ์เจลโพลาไรเซชัน ชั้นเจลจะหนาขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้นเรื่อยกับเวลา นอกจากนี้มีงานวิจัยในทำนองเดียวกันโดย Bruijn และคณะ (2002) พบว่าการลดลงของเพอมิเอทฟลักซ์แบ่งได้ 2 ระยะ คือ ระยะแรกการลดลงอย่างรวดเร็วของเพอมิเอทฟลักซ์ในช่วง 5 นาทีแรก แล้วลดลงอย่างต่อเนื่องช้า ๆ หลังจากดำเนินการผ่านไป 5 นาที การลดลงของฟลักซ์ เนื่องมาจากการดูดซับคอลลอยด์บนผิวหน้าเมมเบรน และเริ่มเกิดชั้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน การลดลงระยะหลังเป็นการลดลง

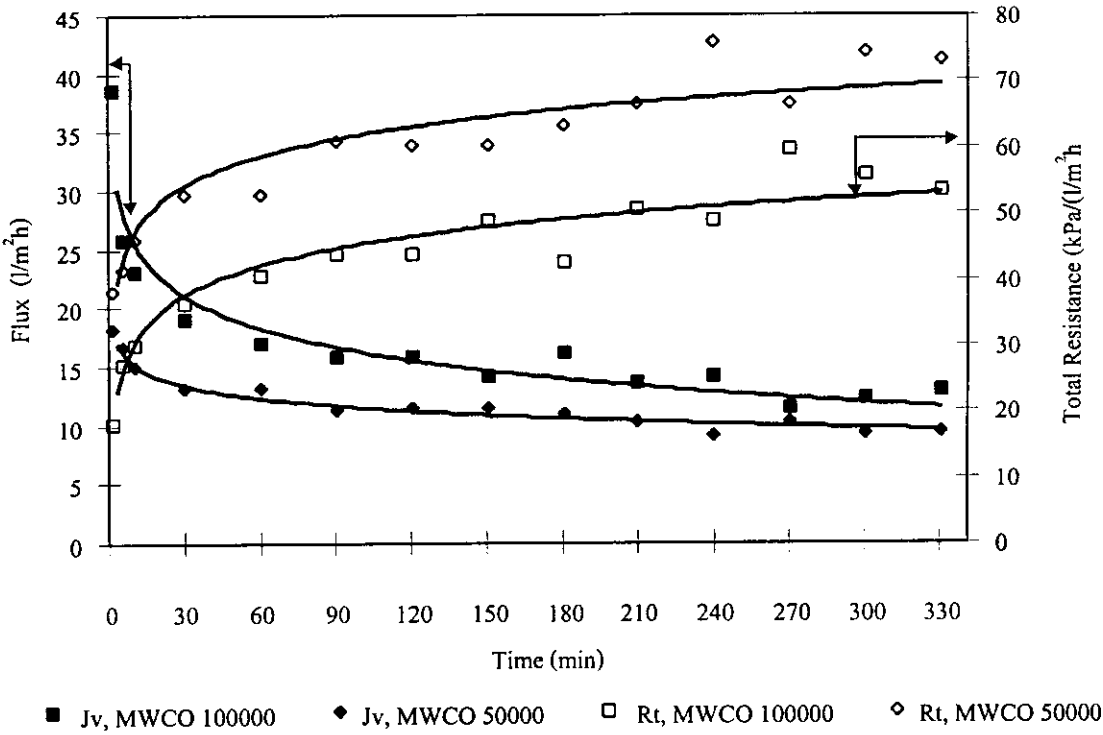
ลงของฟลักซ์อย่างช้าๆ เนื่องจากการถึงจุดสมดุลของการเกิดชั้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน จนเกิดเป็นชั้นหนาของเจลขึ้น

จากการพิจารณาผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความดันในช่วงแรกเพอมิเอทฟลักซ์ของการกรองน้ำฝรั่งที่ความดันสูง (150 ปอนด์/นิ้ว^2) มีค่ามากกว่าเมื่อกรองด้วยความดันต่ำ (100 และ 50 ปอนด์/นิ้ว^2) แต่เมื่อเวลาผ่านไปเพอมิเอทฟลักซ์จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากันในทุกค่าความดันที่ใช้ในการกรอง ให้ผลทำนองเดียวกันเมื่อกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 50,000 ดังภาพประกอบ 3.8

ภาพประกอบ 3.9 ผลของอัตราการไหลต่อการลดลงของเพอมิเอทฟลักซ์ต่อเวลา พบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเพอมิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลสูงจะมีเพอมิเอทฟลักซ์มากกว่าที่อัตราการไหลต่ำตลอดเวลาที่ดำเนินการทดลองจนถึงสภาวะฟลักซ์คงที่ เนื่องจากที่อัตราการไหลสูงมีแรงเฉือนมากกว่าที่อัตราการไหลต่ำ ทำให้การสะสมของอนุภาคสารละลายที่ผิวหน้าเมมเบรนยากกว่า

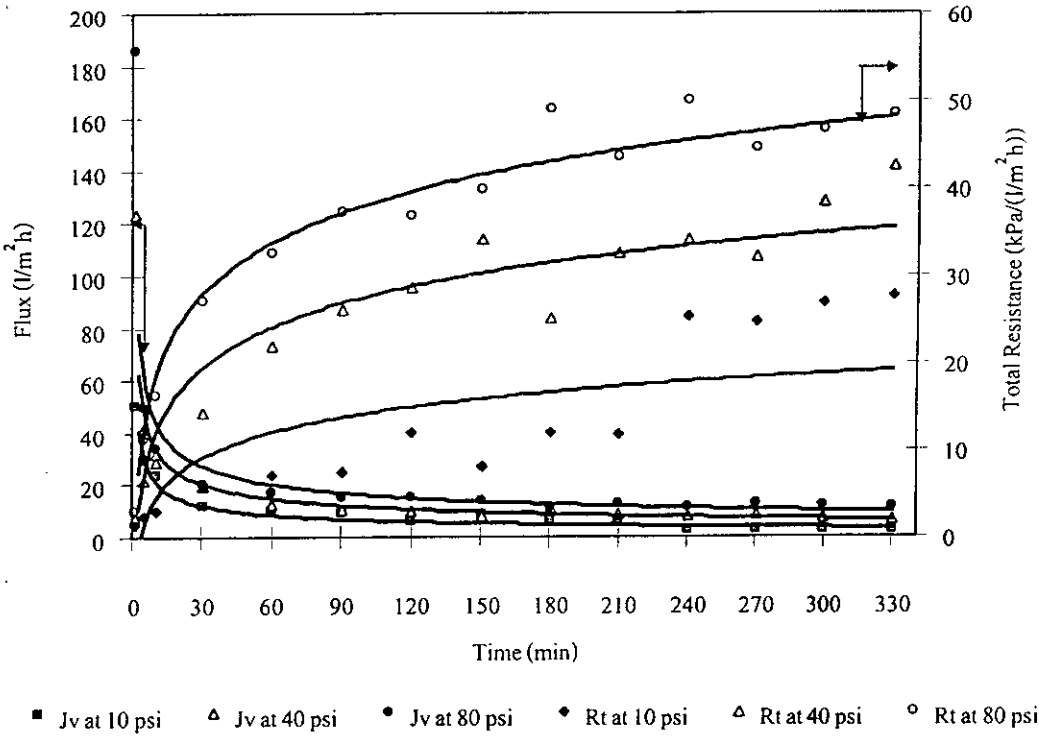
จากการศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดตะกอนของน้ำฝรั่งด้วยกระบวนการเมมเบรนในลักษณะการกรองแบบ dead-end และ แบบไหลขวาง ผลการทดลอง ดังภาพประกอบ 3.9 พบว่าที่สภาวะดำเนินการกรองที่ 50 ปอนด์/นิ้ว^2 ลักษณะการกรองแบบ dead-end จะให้เพอมิเอทฟลักซ์น้อยกว่าระบบการไหลแบบขวางทุก ๆ อัตราการไหล (1.5, 1.8 และ 2.0 ลิตร/นาที) เพอมิเอทฟลักซ์ของการไหลแบบความขวางที่อัตราการไหลต่ำ (1.5 ลิตร/นาที) จะมีค่าใกล้เคียงกับ dead-end แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ปริมาณเพอมิเอทฟลักซ์ของการไหลแบบขวางจะมีค่ามากกว่าการไหลแบบ dead-end มาก โดยช่วง 20 นาทีแรกการกรองแบบการไหลแบบ dead-end มีการลดลงของฟลักซ์อย่างรวดเร็ว ในอัตราที่สูงกว่าการกรองแบบไหลขวางมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปการกรองด้วยการไหลทั้ง 2 แบบ มีพฤติกรรมการลดลงของฟลักซ์คล้ายคลึงกัน

เมื่อพิจารณาการกรองด้วยการไหลทั้ง 2 ลักษณะ พบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเพอมิเอทฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกของการดำเนินการที่ความดันสูง จะเกิดการอุดตันของอนุภาคสารป้อนบนผิวเมมเบรนมากกว่าการดำเนินการที่ความดันต่ำทำให้ความหนาของชั้นเจลหนาขึ้น เนื่องจากความดันที่สูงขึ้น เจลที่เกิดขึ้นเป็นเจลที่ถูกอัดแน่นเนื่องจากแรงดัน (Compressible gel) ซึ่งทำให้เพิ่มความต้านทาน ดังนั้นเมื่อความดันสูงขึ้น ความต้านทาน



ภาพประกอบ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ความดัน100 ปอนด์/ นิ้ว^2 อัตราการไหลสารป้อน 1.5 ลิตร/นาที

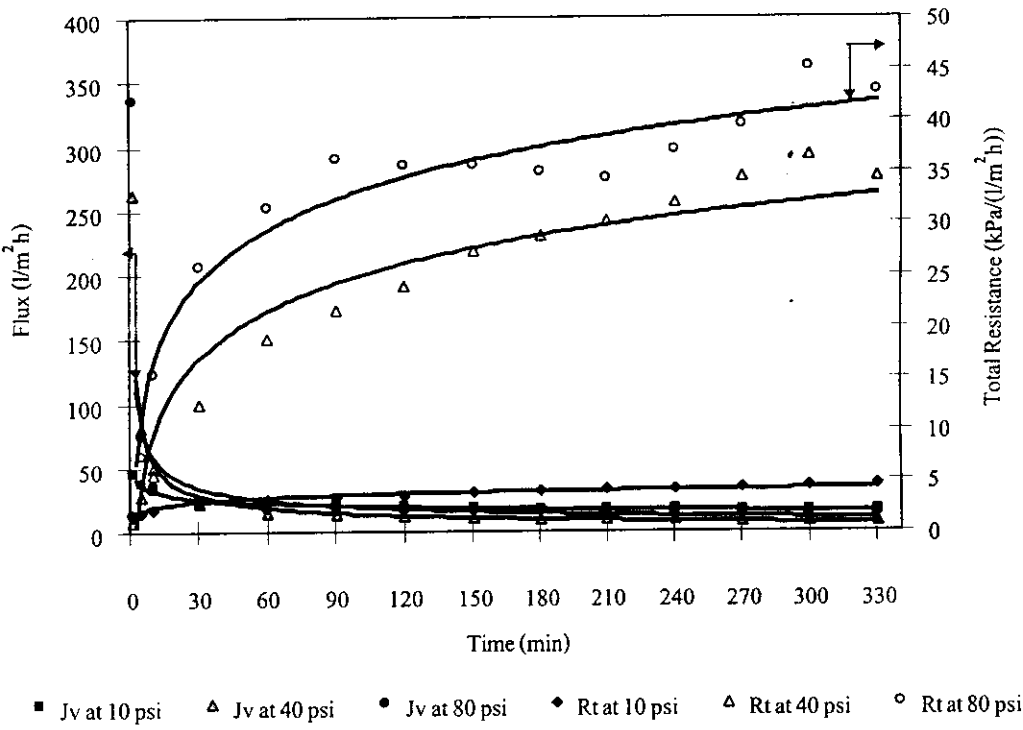
ของการกรองแบบ dead-end จึงมีค่าสูงขึ้นมากกว่าการกรองแบบการไหลขวาง และทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้น้อยกว่า ในการกรองด้วยลักษณะการกรองแบบ dead-end มีลักษณะการป้อนสารละลายในทิศทางตั้งฉากกับเมมเบรน ซึ่งทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเมมเบรนที่เรียกว่า เค้ก ซึ่งถ้ากรองไปนาน ๆ จะทำให้เกิดการสะสมของเค้กมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มมากขึ้นนั้นคือ ความสามารถในการซึมผ่านแผ่นเมมเบรนของสารละลายลดน้อยลง จึงเป็นเหตุให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่การไหลแบบขวางเป็นการป้อนสารละลายขนานกับเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมิเอท ซึ่งมีลักษณะการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วนส่งผลให้แรงเฉือนของกระแสการป้อนไปกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคสารละลายบนผิวหน้ายากมาก



ภาพประกอบ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVWP) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร อัตราการไหลสารป้อน 1.0 ลิตร/นาที

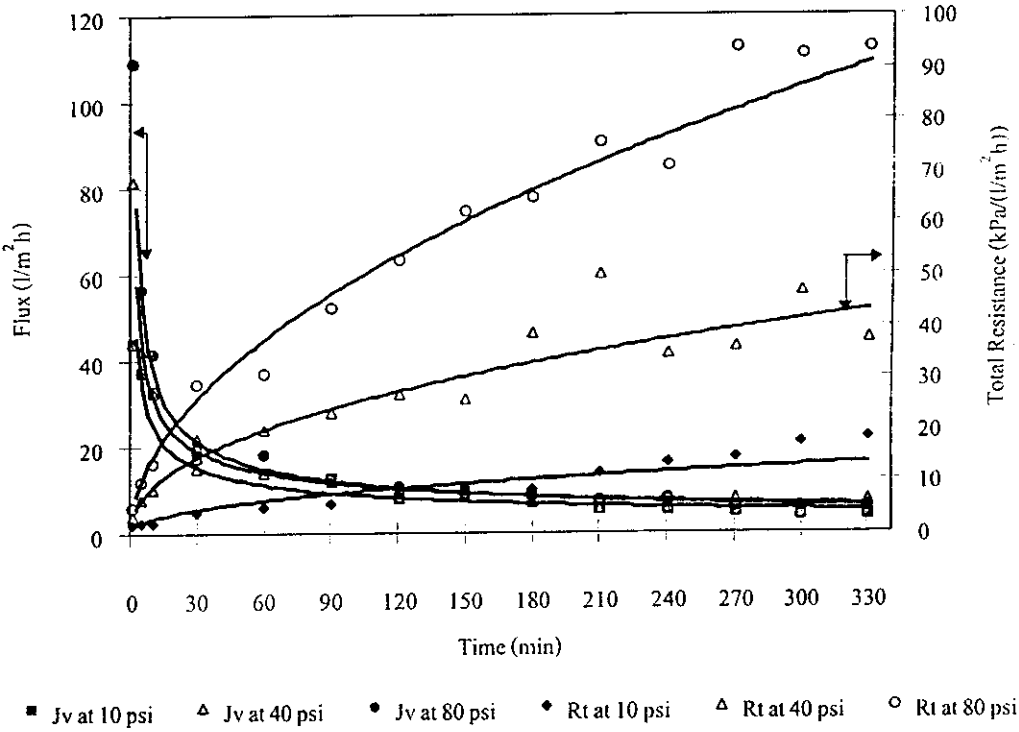
ขึ้น ดังนั้นการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน/เจล จึงน้อยลงทำให้เค้กมีชั้นบาง ๆ เท่านั้น ฟลักซ์ที่ได้จึงมากกว่าการกรองแบบ dead end ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Koltuniewicz และคณะ (1995) ซึ่งได้ทดลองเปรียบเทียบผลการกรองสารอิมัลชันน้ำมันในน้ำในลักษณะการไหลแบบ dead-end และการไหลแบบขวาง พบว่าการกรองแบบ dead-end จะให้เพอมิเอทฟลักซ์น้อยกว่าการกรองแบบการไหลแบบขวาง

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การกรองน้ำฝรั่งด้วยการกรองแบบไหลขวางจะมีความเหมาะสมมากกว่าการกรองแบบ dead-end ทั้งนี้ลักษณะการกรองแบบ dead-end เหมาะสำหรับที่จะกรองอนุภาคสารละลายที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร หรือกรองสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่น้ำฝรั่งมีอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเหมาะกับการกรองในระบบไหลขวางซึ่งเหมาะสำหรับกรองอนุภาคที่มีขนาด 0.1 – 10 ไมโครเมตร ได้แก่สารละลายที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสารแขวนลอยสูงและสารละลายอิมัลชัน



ภาพประกอบ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์(GVHP) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร อัตราการไหลสารป้อน 1.0 ลิตร/นาที

จากภาพประกอบ 3.10 เมื่อพิจารณาผลของขนาดรูพรุนต่อการลดลงของเวลา พบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ (MWCO 100,000) จะมีอัตราการลดลงของเพอมิเอทฟลักซ์ในช่วงแรกอย่างรวดเร็ว แล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่องช้าๆ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Cheryan (1998) รายงานว่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนและอนุภาคตัวถูกละลายในสารป้อนมีความสำคัญ ดังภาพประกอบ 1.11 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ในช่วงแรกจะให้ฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็ก แต่เมื่อเวลาผ่านไปเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าจะให้ปริมาณฟลักซ์สูงกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดเนื่องจากเมมเบรนมีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ แต่อนุภาคของสารละลายมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรน ทำให้เกิดการเกาะติดภายในรูพรุน ดังนั้นปริมาณฟลักซ์จึงลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 2 - 3 นาทีแรกของการดำเนินการ นอกจากนี้การดำเนินการภายใต้ความดันสูงจะทำให้การการอัด

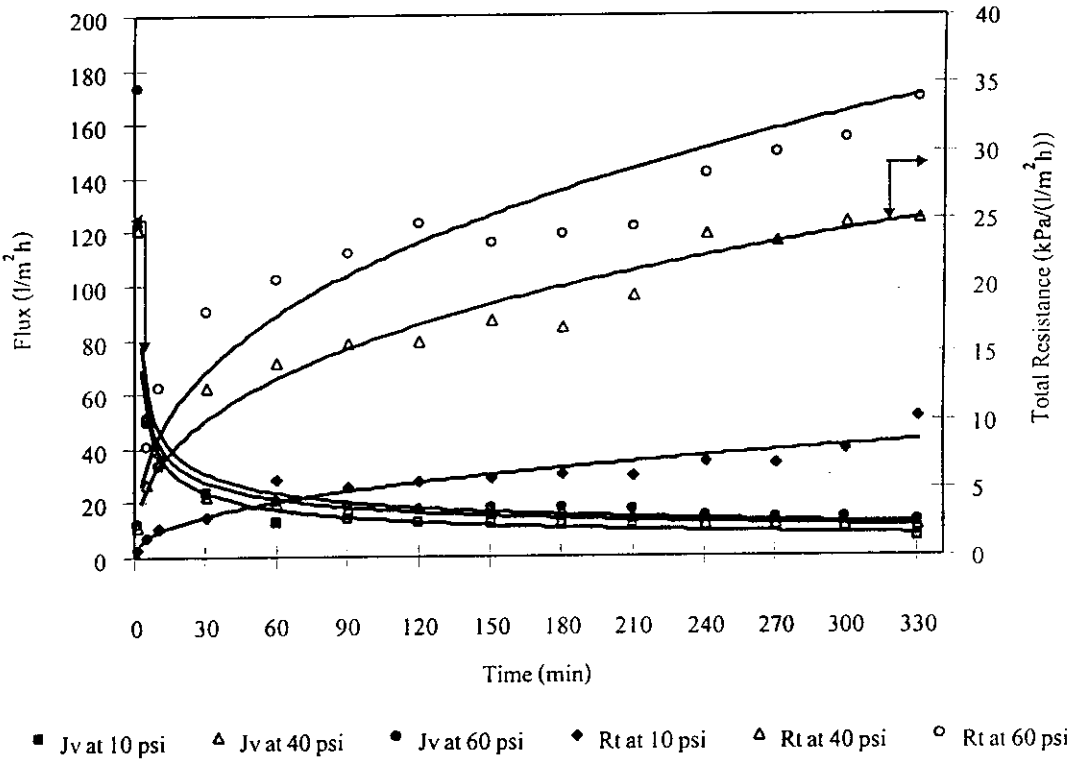


ภาพประกอบ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดเซลลูโลสไนเตรท ขนาดรูพรุน 0.1 ไมโครเมตร อัตราการไหลสารป้อน 1.0 ลิตร/นาที

แน่นของเค็กมากขึ้น ส่งผลให้ทำความสะอาดยากมากขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดรูพรุนของเมมเบรนเล็กกว่าอนุภาคของสารละลายป้อน อนุภาคจะไม่เข้าไปเกาะติดภายใ: รูพรุนแต่จะเกาะติดบนผิวหน้าเมมเบรน ดังนั้นถ้าดำเนินการแบบการไหลขวางไม่มีผลกระทบต่อค่าฟลักซ์

2. กระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

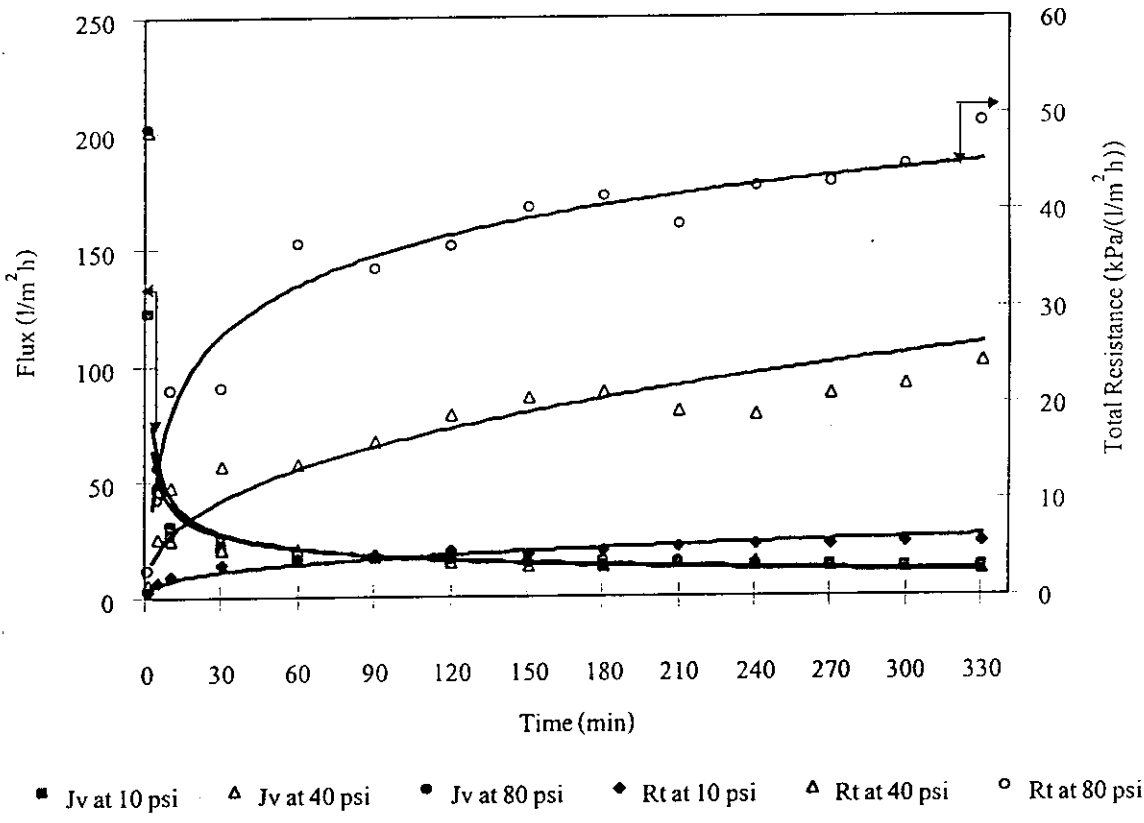
ศึกษาการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP และ GVWP) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร เซลลูโลสอะซิเตทขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร เซลลูโลสไนเตรทขนาดรูพรุน 0.1 และ 0.45 ไมโครเมตร ผลการทดลองดังภาพประกอบ 3.11 ค่าเพอมิเอทฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก และเมื่อเวลาผ่านไปเพอมิเอทมี



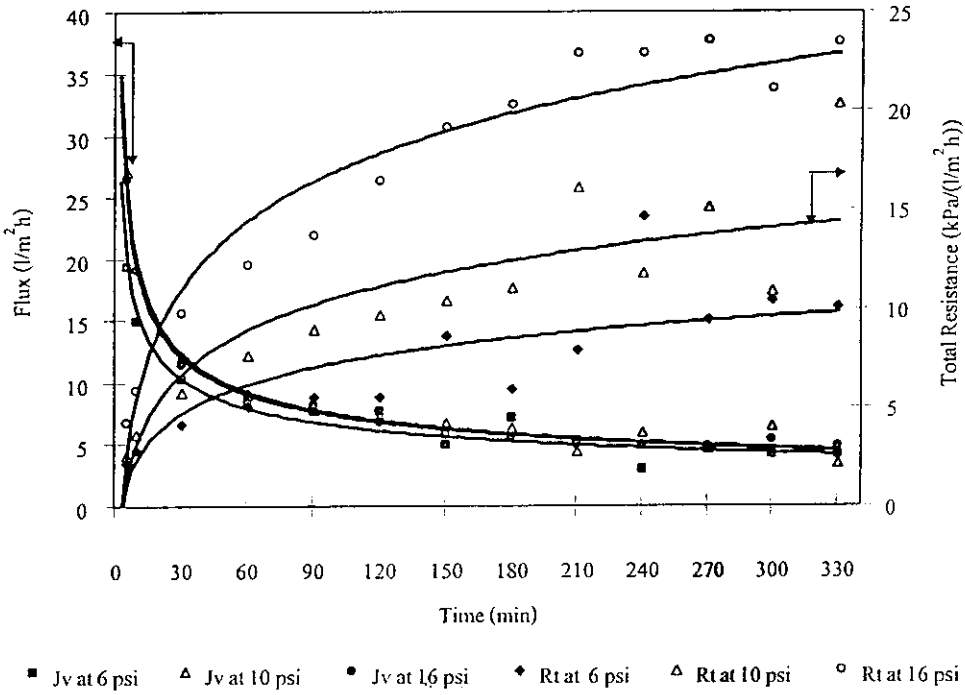
ภาพประกอบ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดเซลลูโลสไนเตรท ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร อัตราการไหลสารป้อน 1.0 ลิตร/นาที

ค่าเพิ่มขึ้น และมีค่ามากกว่าตลอดช่วงระยะเวลาการกรองน้ำฝรั่ง และมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งให้ผลการทดลองเหมือนกันกับเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP) ดังภาพประกอบ 3.12 แต่ความดันมีผลต่อเพอมิเอทฟลักซ์ของ GVHP ที่สภาวะความดันต่ำ (10 ปอนด์/นิ้ว^2) เพอมิเอทฟลักซ์จะค่อยๆลดลงตลอดเวลาการทดลอง แต่ที่สภาวะความดันสูง (40 และ 80 ปอนด์/นิ้ว^2) เกิดการลดลงของฟลักซ์อย่างรวดเร็วในช่วงแรก และลดลงช้าๆ อย่างต่อเนื่องจนถึงสภาวะสมดุล พบว่าเมื่อเพอมิเอทฟลักซ์ลดลงอย่างคงที่ช้าๆ เมื่อดำเนินการกรองที่สภาวะความดันต่ำจะมีเพอมิเอทฟลักซ์มากกว่าที่ความดันสูง เพราะการลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกอย่างรวดเร็ว การกรองที่สภาวะความดันสูงทำให้การสะสมความเข้มข้นของสารละลายมากจนเกิดเป็นชั้นเจลได้ง่ายกว่าที่สภาวะความดันต่ำ และการเพิ่มความดันทำให้เจลถูกอัดแน่นขึ้นเนื่องจากแรงดันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความต้านทานการกรองผ่านของสารละลายตัวถูกละลายจึงผ่านไปผิวหน้าของเมมเบรนไปได้ยากขึ้น

พฤติกรรมการลดลงของเพอมิเอทต่อเวลาของการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดเซลลูโลสไนเตรทขนาดรูพรุน 0.1 ไมโครเมตร (ภาพประกอบ 3.13) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร (ภาพประกอบ 3.14) เซลลูโลสอะซิเตท (ภาพประกอบ 3.15) และเซรามิกส์ (ภาพประกอบ 3.16) มีลักษณะคล้ายคลึงกับการกรองด้วยเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ ดังกล่าวข้างต้น



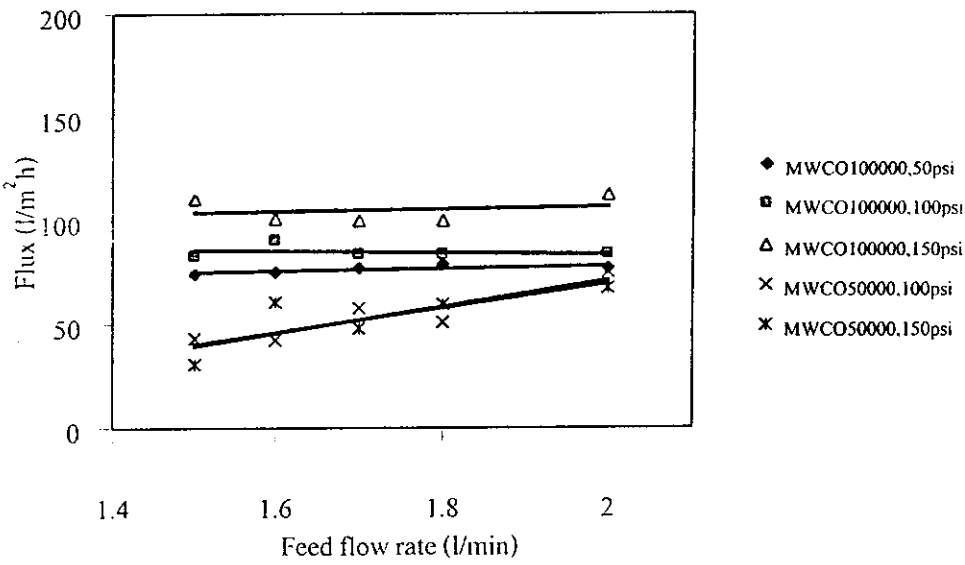
ภาพประกอบ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดเซลลูโลสอะซิเตท ขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร อัตราการไหลสารป้อน 1.0 ลิตร/นาที



ภาพประกอบ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่ง ด้วยเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ ขนาดรูพรุน 0.3 ไมโครเมตร อัตราการไหลสารป้อน 2.0 ลิตร/นาที

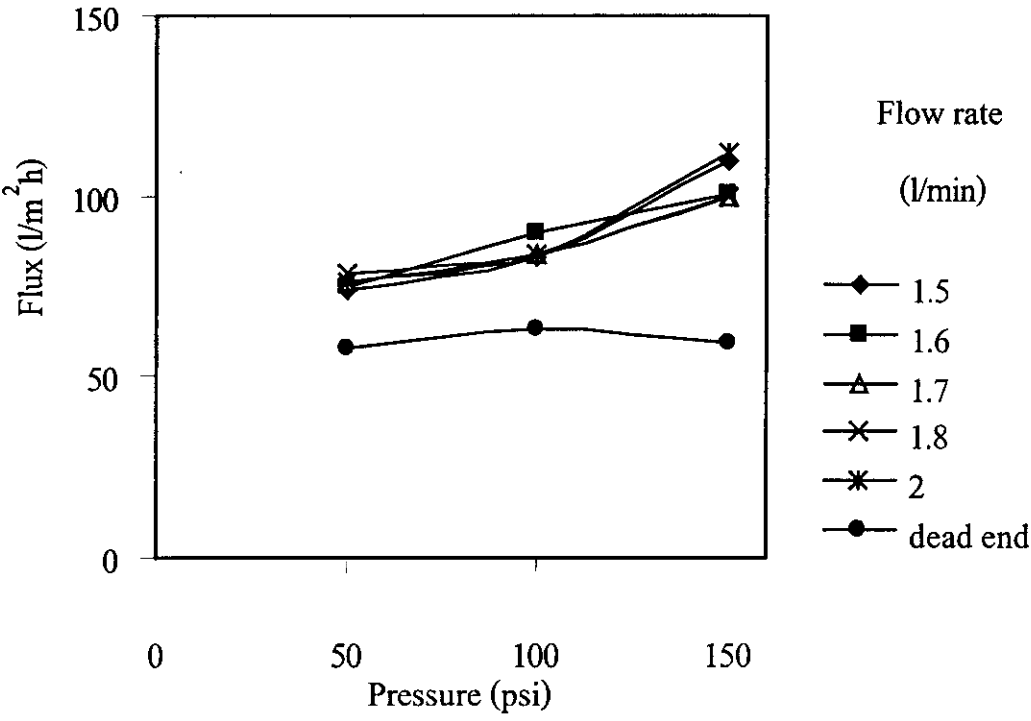
Ho และ Sirkar (1992) รายงานว่าจากการศึกษาของ Fane (1986) ได้พิจารณาการลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกของการกรองด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในเทอมของทฤษฎีของชั้นขอบเขต (boundary layer) การดูดซับและการเกาะติดภายในรูพรุน การลดลงในช่วงหลังของฟลักซ์ เนื่องจากการสะสมของอนุภาค/การดูดซับและการเกิดเค้ก และมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Howell และ Velicangil (1987) ซึ่งได้แบ่งช่วงการลดลงของ ฟลักซ์ต่อเวลาเป็น 3 ช่วง คือ

1. การลดลงในช่วงนาทีแรก เริ่มเกิดชั้นของคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันแต่ยังไม่ถึงจุดสมดุล
2. การลดลงในช่วง 1-10 นาที เนื่องจากกระบวนการดูดซับของตัวถูกละลาย
3. การลดลงในระยะยาว เนื่องจากมีชั้นเจลเกิดขึ้นทำให้เกิดการต้านทานการไหล



ภาพประกอบ 3.17 แสดงผลของอัตราการไหลสารป้อนต่อเพอมิเอทฟลักซ์สำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 50,000 และ 100,000 ที่ความดันต่างๆ

Choe และคณะ (1986) อ้างโดย Cheryan (1998) ได้สรุปความสัมพันธ์ของการเกาะติดภายในรูพรุนกับการดูดซับ จากการศึกษาการกรองสารละลายของกรดโพลีอะคริลิก (polyacrylic acid; PA) และ สารละลายโปรตีนนมโบวีนจากอัลบูมิน (bovin serum albumin; BSA) สารละลายทั้งสองชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันคือ 90,000 ดาลตัน และ 68,000 ดาลตัน ตามลำดับ การลดลงของฟลักซ์ของการกรองสารละลาย BSA ในช่วงแรก เนื่องจากการอุดตันบนผิวหน้าของเมมเบรน จากแรงกระทำของคุณสมบัติความการไม่ชอบน้ำของเมมเบรน แต่การลดลงของฟลักซ์จากการกรองสารละลาย PA เนื่องจากการเกาะติดภายในรูพรุนมากกว่า นั่นคือสาเหตุของการลดลงของฟลักซ์สารละลาย BSA เกิดจากการดูดซับที่ผิวของเมมเบรนมากกว่าการเกาะติดภายในรูพรุน

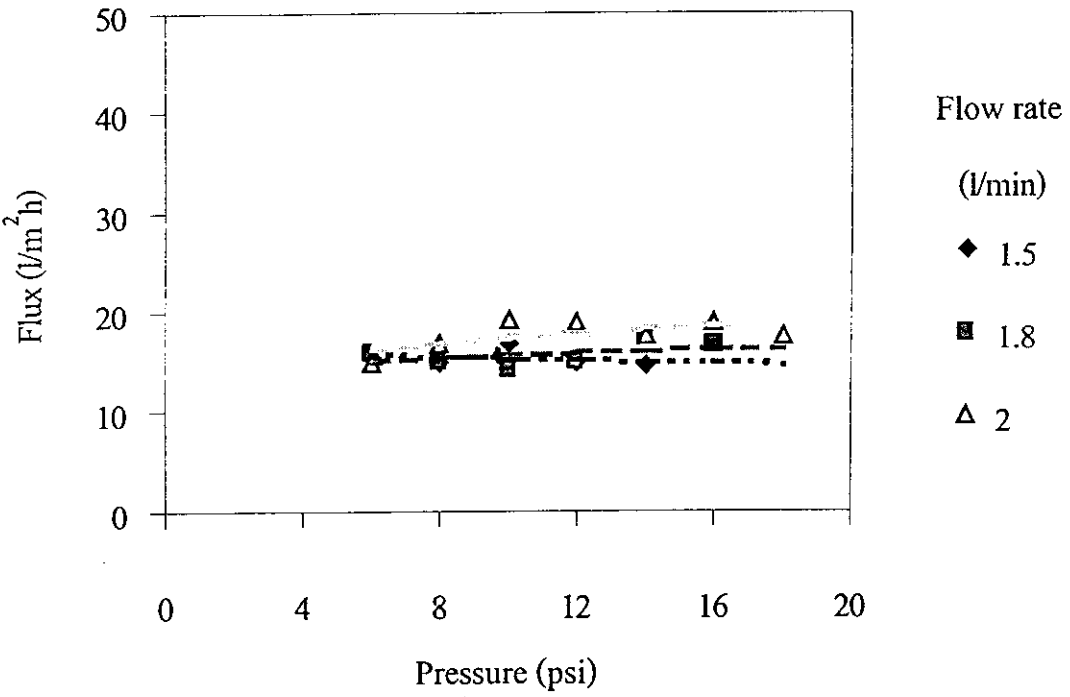


ภาพประกอบ 3.18 แสดงผลของอัตราการไหลสารป้อนต่อเพอมิเอทฟลักซ์สำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 100,000 ที่ความดันต่างๆ

3.3.2 ผลของความดันต่อเพอมิเอทฟลักซ์

1. กระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

จากการศึกษาผลของความดันและอัตราการไหลต่อการกำจัดตะกอนในน้ำฝรั่ง แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบ 3.17 พบว่า เพอมิเอทฟลักซ์ของเมมเบรนโพลีซัลโฟน MWCO 50,000 เพิ่มขึ้นกับความดันที่อัตราการไหลของสารป้อนในช่วงกลางๆ คือ 1.6 และ 1.7 ลิตร/นาที แต่ที่อัตราการไหลต่ำ (1.5 ลิตร/นาที) และสูง (1.8 – 20 ลิตร/นาที) การเพิ่มความดันจะไม่ทำให้ปริมาณฟลักซ์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มแรงขับดันให้เพอมิเอทผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้มากขึ้น เมื่อความเข้มข้นที่ผิวของเมมเบรนสูงขึ้นจนถึงขีดจำกัดความสามารถในการละลาย ทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้นที่ผิวเมมเบรน ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นเจลเรียกว่าการเกิดเจลโพลาไรเซชัน การเพิ่มความดันจะทำให้ชั้นเจลหนา

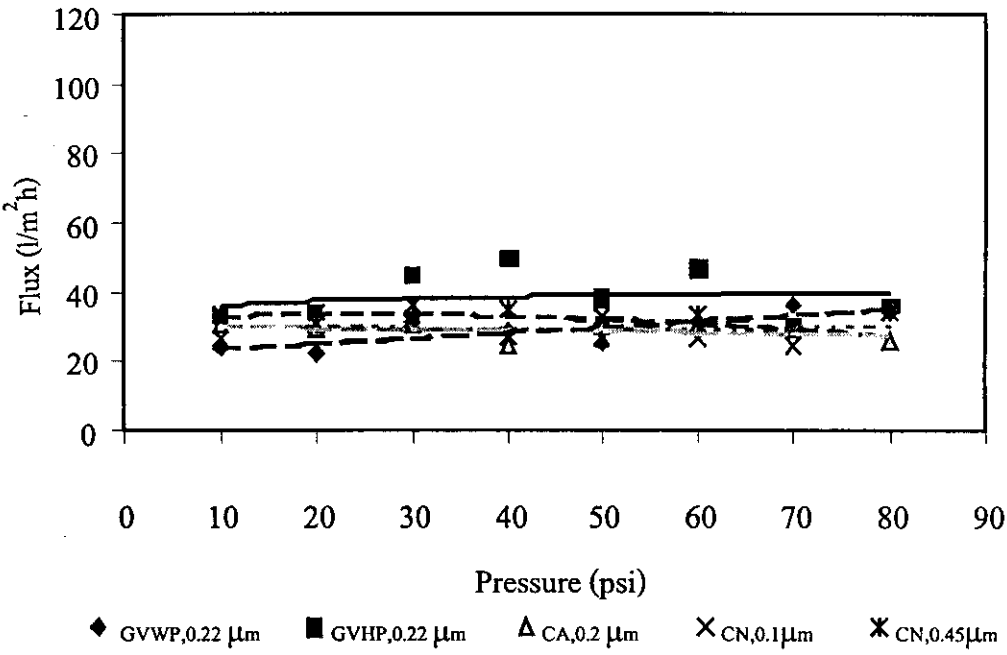


ภาพประกอบ 3.19 แสดงผลของความดันต่อเพอมิเอทฟลักซ์สำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วย เมมเบรนชนิดเซรามิกส์ ขนาดรูพรุน 0.3 ไมโครเมตร ที่อัตราการไหลสารป้อนต่างๆ

และอัดแน่นขึ้น รวมทั้งเกิด fouling สูง ซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มความต้านทานการไหลนั่นเอง ดังนั้นอัตราการไหลผ่านเมมเบรนของสารละลายจึงลดลง การเกิดเจลสามารถเกิดขึ้นในระยะเวลารวดเร็วมาก ทำให้การเพิ่มความดันไม่มีผลต่อเพอมิเอทฟลักซ์ นั่นคือเพอมิเอทฟลักซ์มีค่าคงที่หรือมีความแตกต่างกันน้อยมากในทุกๆ ค่าความดันที่ใช้ในการกำจัดตะกอน

เมื่อเปรียบเทียบเพอมิเอทฟลักซ์ของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนต่างกันคือโพลีซัลโฟนขนาดรูพรุน MWCO 50,000 และ 100,000 พบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะให้ปริมาณเพอมิเอทฟลักซ์มากกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กในทุกค่าอัตราการไหลและความดันที่ได้ทำการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรูพรุนใหญ่การส่งผ่านสารละลายผ่านเมมเบรนทำได้ง่ายกว่าขนาดรูพรุนเล็ก

เมื่อพิจารณาผลของความดันต่อเพอมิเอทฟลักซ์ในระบบการไหลแบบ dead-end พบว่าการเพิ่มความดันทำให้เพอมิเอทฟลักซ์ลดต่ำลง เนื่องจากการไหลเป็นการไหลแบบตั้ง



ภาพประกอบ 3.20 แสดงผลของความดันต่อเพอมิเอทฟลักซ์สำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ที่อัตราการไหลสารป้อน 1 ลิตร/นาที

ฉากกับผิวหน้าเมมเบรน ดังนั้นการเพิ่มความดันจึงส่งผลให้เกิดการอัดแน่นของชั้นเจลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนของสารละลายมากขึ้น ส่งผลให้สารละลายผ่านเมมเบรนไปได้ยากขึ้นจึงทำให้เพอมิเอทฟลักซ์น้อยลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 3.18 และเมื่อเปรียบเทียบผลของระบบการไหลแบบ dead - end และแบบไหลขวางต่อเพอมิเอทฟลักซ์ พบว่าระบบการไหลแบบขวางจะให้เพอมิเอทฟลักซ์สูงกว่าการไหลแบบ dead - end ทุกอัตราการไหล และเมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบการไหลแบบขวาง จะมีแรงเฉือนที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำให้การสะสมของสารละลายที่ผิวหน้าเมมเบรนน้อยจึงเกิดชั้นเจลได้ยาก

2. การกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

ภาพประกอบ 3.19 ผลของความดันต่อเพอมิเอทฟลักซ์ของการกรองน้ำฝรั่งคือเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ ขนาดรูพรุน 0.3 ไมโครเมตร อัตราการไหลสารป้อน 1.5, 1.8 และ 2.0 ลิตร/นาที เมื่อพิจารณาที่สภาวะอัตราการไหลต่ำ (1.5 ลิตร/นาที) พบว่าเมื่อเพิ่มความดันปริมาณ ฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่ความดันมีผลต่อการเพิ่มของปริมาณฟลักซ์น้อยมาก

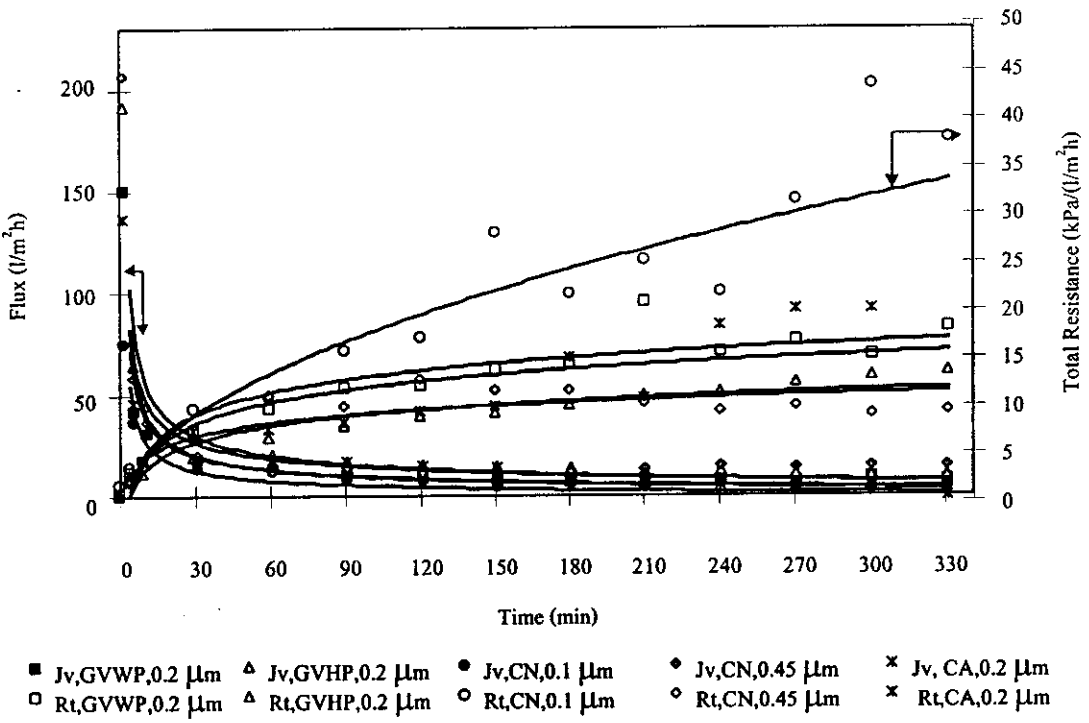
ความดันเพิ่มทำให้ เพอมิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่สภาวะอัตราการไหลกลาง (1.8 ลิตร/นาที) การเพิ่มความดันทำให้เพอมิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้น จนถึงความดัน 14 ปอนด์/นิ้ว^2 จึงทำให้เพอมิเอทฟลักซ์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความดันจนถึง 14 ปอนด์/นิ้ว^2 นี้ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวเมมเบรนสูงถึงขีดจำกัดความสามารถในการละลาย ซึ่งเกิดการตกตะกอนที่ผิวเมมเบรนและมีลักษณะเป็นเจล ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดันสูงขึ้นอีก เจลจะถูกอัดแน่นและหนาขึ้น ทำให้เกิดการต้านทานการไหล ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดันจึงไม่ทำให้เพอมิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่อาจมีค่าคงที่หรือน้อยลงนั้นเอง มีพฤติกรรมลักษณะเดียวกันนี้ที่สภาวะอัตราการไหลสูง (20 ลิตร/นาที) ซึ่งมีเพอมิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงความดัน 10 ปอนด์/นิ้ว^2

ภาพประกอบ 3.20 ผลของความดันต่อเพอมิเอทฟลักซ์เมื่อกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดต่างๆ ที่สภาวะอัตราการไหลสารป้อนคงที่ 1 ลิตร/นาที พบว่าเพอมิเอทฟลักซ์ของเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP) และ เซลลูโลสไนเตรท ขนาดรูพรุน 0.1 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นกับความดัน การกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVWP) และเซลลูโลสอะซิเตท มีพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของเพอมิเอทฟลักซ์ เนื่องจากผลของความดันคล้ายคลึงกับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ที่อัตราการไหลกลางและสูง (1.8 และ 2.0 ปอนด์/นิ้ว^2) ตามลำดับ นั้นคือเพอมิเอทฟลักซ์ของเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ เซลลูโลสไนเตรท ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร และเซลลูโลสอะซิเตท จะเพิ่มต่อความดันจนถึงที่ความดัน 30, 30 และ 40 ปอนด์/นิ้ว^2 ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานของ Cheryan (1998) เมื่อดำเนินการด้วยความดันต่ำ ความเข้มข้นสารป้อนต่ำและความเร็วสารป้อนสูง ผลของคอนเซนเตรชันโพราไรเซชันต่อฟลักซ์จะน้อยมาก ปริมาณฟลักซ์ขึ้นกับความดันที่ให้กับระบบ แต่เมื่อดำเนินการที่ความดันสูงปริมาณฟลักซ์จะไม่ขึ้นกับความดันที่ให้กับระบบ แต่จะขึ้นกับการถ่ายเทมวล ดังภาพประกอบ 1.14 เมื่อเพิ่มความดันปริมาณฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ แต่เมื่อถึงจุดสมดุล ปริมาณฟลักซ์จะไม่เปลี่ยนแปลง ชั้นเจลที่เกิดขึ้นจะถูกอัดแน่นเนื่องจากความดันที่สูงขึ้น นั้นเมื่อเพิ่มความดันจนถึงจุดวิกฤตจะผลให้ส่งปริมาณฟลักซ์ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบผลของขนาดรูพรุนต่อเพอมิเอทฟลักซ์ของเมมเบรนชนิดเซลลูโลสไนเตรท พบว่าขนาดรูพรุนใหญ่ (0.45 ไมโครเมตร) จะมีเพอมิเอทฟลักซ์สูงกว่าขนาดรูพรุนเล็ก (0.1 ไมโครเมตร) แต่ขนาดรูพรุนใหญ่ (0.45 ไมโครเมตร) จะมีพฤติกรรมการ

เพิ่มขึ้นของเพอมิเอทต่อความดันถึงจุดอิ่มตัวที่ความดัน 30 ปอนด์/นิ้ว^2 แต่ขนาดรูพรุนเล็กจะมีแนวโน้มการเพิ่มเพอมิเอทฟลักซ์แปรผันตรงกับความดัน

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของความชอบน้ำ (คุณสมบัติความชอบน้ำ) และไม่ชอบน้ำ (คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ) ของเมมเบรน พบว่าเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP) มีเพอมิเอทฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVWP) ทุกค่าความดัน เนื่องจากกระบวนดูดซับเพกทินของเมมเบรน ซึ่ง Czekaj และคณะ (2000) ได้รายงานถึงการวิจัยการดูดซับน้ำตาลโมเลกุลเชิงซ้อน (polysaccharide) และแทนนิน (tannin) ในเมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์ (เมมเบรนชนิดโพลีไวนิลไพโรลิโดน (ปรับปรุงคุณสมบัติ) โพลีอีเทอร์ซัลโฟน และโพลีไวนิลคลอไรด์) พบว่า ผลการดูดซับน้ำตาล



ภาพประกอบ 3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดัน 30 ปอนด์/นิ้ว^2 อัตราการไหลสารป้อน 1.0 ลิตร/นาที

โมเลกุลเชิงซ้อนกับแทนนินขึ้นอยู่กับสภาพมีขั้วของเมมเบรน (membrane polarity) โดยเมมเบรนที่มีสภาพมีขั้วมากจะยิ่งมีการดูดซับของโพลีฟีนอลมาก ในขณะเดียวกันผิวหน้าเมมเบรนที่สภาพมีขั้วเป็นปัจจัยจำกัดของการดูดซับน้ำตาลโมเลกุลเชิงซ้อน

จากภาพประกอบ 20 และ 21 พบว่า เมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP) ที่สภาวะความดัน 40 ปอนด์/นิ้ว^2 จะให้ปริมาณเพอมิเอทฟลักซ์มากที่สุด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของเพอมิเอทฟลักซ์ต่อเวลาพบว่าในช่วงระยะเริ่มต้นโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP) และ เซลลูโลสไนเตรท 0.45 ไมโครเมตร จะมีปริมาณเพอมิเอทฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนชนิดอื่นๆ ตลอดระยะเวลาดำเนินการ แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเพอมิเอทโดยเฉพาะในด้านความใส ซึ่งพบว่าเพอมิเอทที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP) มีความใสมากว่าเมมเบรนชนิดอื่นๆ จึงเหมาะต่อการนำมาใช้กำจัดตะกอนในน้ำฝรั่งมากที่สุด

3.3.3 ผลของอัตราการไหลต่อเพอมิเอทฟลักซ์

1. กระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

จากภาพประกอบ 3.17 พบว่าเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 100,000 มีพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ต่ออัตราการไหลเช่นเดียวกับเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 50,000 แต่อัตราการไหลมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์น้อยมากจนเกือบคงที่ ซึ่งผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiraratananonon และ Chanachai (1996)

2. กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

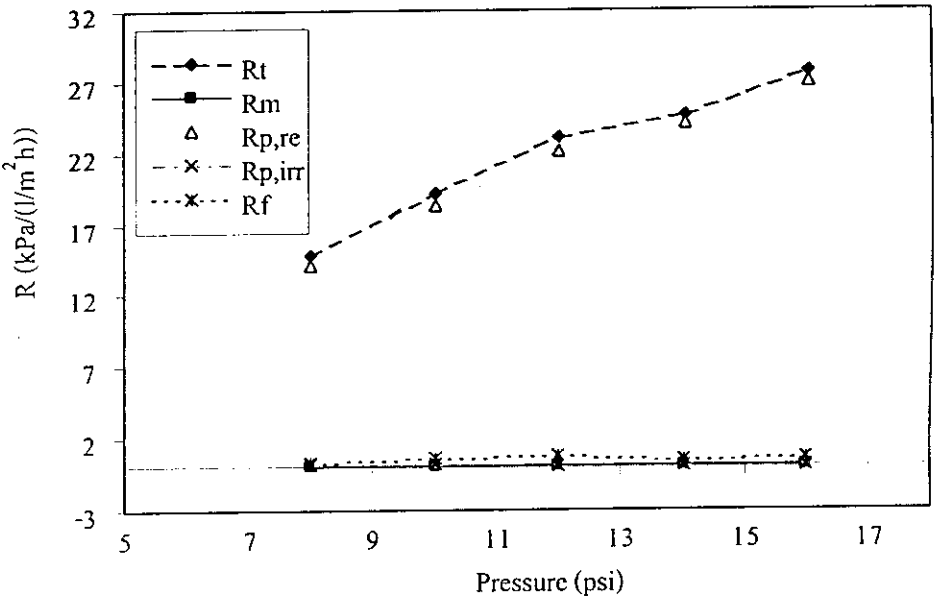
จากภาพประกอบ 3.19 ผลของอัตราการไหลต่อเพอมิเอทฟลักซ์ เมื่อพิจารณาที่ความดันเดียวกัน พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเพอมิเอทฟลักซ์จะมีค่าสูงขึ้น ที่ความดันต่ำ (6 ปอนด์/นิ้ว^2) อัตราการไหลไม่มีผลต่อเพอมิเอทฟลักซ์ เมื่อความดันสูงขึ้นอัตราการไหลสูง (2.0 ลิตร/นาที) จะให้ค่าฟลักซ์สูงขึ้น แต่อัตราการไหลต่ำและขนาดกลาง (1.5 และ 1.8 ลิตร/นาที) อัตราการไหลจะมีผลต่อการเพิ่มของเพอมิเอทฟลักซ์น้อยมาก เหตุผลดังอธิบายข้างต้น

เมื่อดำเนินการในช่วงความดันต่ำจะเกิดแรงเฉือนสูงบนผิวหน้าเมมเบรนและทำให้สารละลายไม่สามารถเกาะติดผิวหน้าเมมเบรนได้ ทำให้ปริมาณฟลักซ์เพิ่มขึ้นและเป็นการลดความต้านทานเชิงกลของชั้น fouling ปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นจะไม่เกิดขึ้นถ้าดำเนินการโดยใช้ความดันสูงร่วมกับความเร็วสูง สารละลายที่มีขนาดเล็กจะมีลักษณะการแพร่แบบ

บราวเนียนเมื่อดำเนินการโดยใช้แรงเฉือนต่ำ และการแพร่ผ่านนี้ไม่ขึ้นอยู่กับแรงเฉือน แรงเฉือนจะมีผลต่อการแพร่ผ่านเมมเบรนของสารละลายที่ประกอบด้วยอนุภาคใหญ่ โดยจะแพร่ผ่านเมมเบรนด้วยการแพร่แบบแรงเฉือนเหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นกับสารละลายซึ่งมีอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่ อนุภาคขนาดใหญ่ของสารละลายจะถูกแรงยกตัวทำให้ลอยตัวขึ้นจากผิวหน้าเมมเบรน ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะยังเกาะอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้เกิดการแบ่งเป็นชั้นของอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ออกจากกัน เกิดการอุดตันของเมมเบรนมากขึ้น โดยเป็นการอุดตันที่เกิดภายในรูพรุน

3.4 ผลของความดันและอัตราการไหลต่อค่าความต้านทานต่างๆ

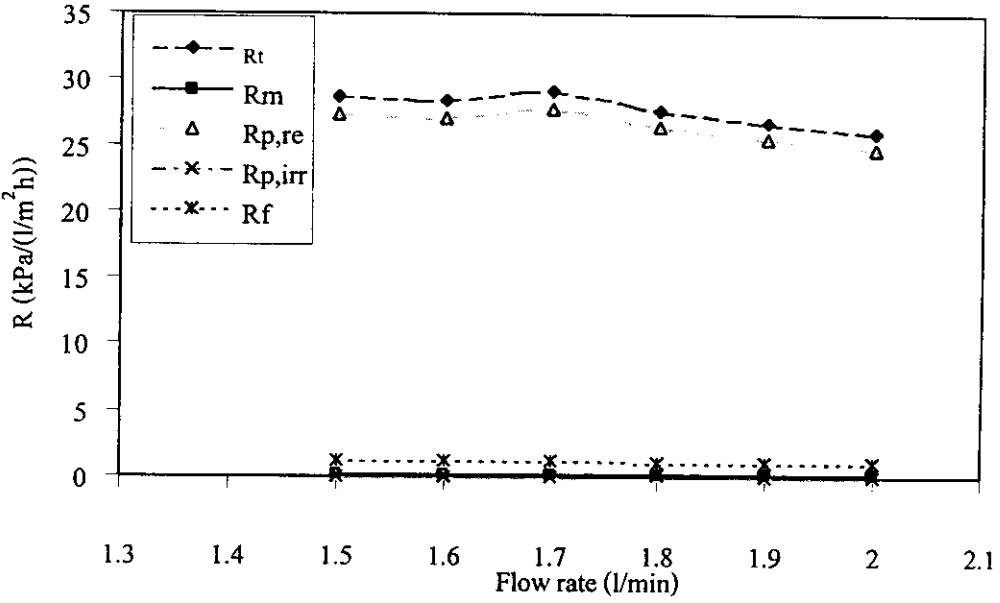
ภาพประกอบ 3.22 แสดงผลของความดันต่อค่าความต้านทานต่างๆ ซึ่งเมื่อความดันสูงขึ้น R_t ; $R_{p,re}$, $R_{p,ir}$ และ R_f มีค่าสูงขึ้นด้วย จากการศึกษาข้างต้นในช่วงความดันที่ศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความดันในการดำเนินการสูงขึ้น เพอมิเอทฟลักซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ ความดัน ทั้งนี้เพราะมีความต้านทานเกิดขึ้น ซึ่งเมื่อความดันสูงขึ้น ความต้านทานรวมจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า $R_{p,re}$, $R_{p,ir}$ และ R_f จึงสูงมากขึ้นด้วย การเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มแรงขับดันให้ตัวถูกละลายผ่านรูพรุนของเมมเบรนมากขึ้น แต่เมื่อถึงจุดอิ่มตัวจะทำให้เกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเกิดเป็นชั้นเจลขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดันขึ้นมีผลให้ชั้นเจลหนาขึ้นและอัดตัวแน่นมาก ทำให้ช่องว่างในชั้นเจลมีน้อยลงหรือเล็กลง ดังนั้นค่า $R_{p,re}$ จึงสูงขึ้น เนื่องจากความดันสูงมีโอกาสเกิด CP/GP สูง โมเลกุลของแป้งและของเพกทินเกิดการจับรวมตัวกันมากขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของชั้นเจลกับชั้น fouling น้อยลง ค่า $R_{p,ir}$ จึงสูงขึ้น ที่ความดันสูงค่า R_f มีค่าสูงเพราะว่าตัวถูกละลายขนาดเล็กเช่นน้ำตาลและกรดต่างๆ สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้มาก ทำให้มีโอกาสที่จะเกิด fouling ภายในรูพรุนได้มากอีกด้วย ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiraratananon และ Chanachai (1996)



ภาพประกอบ 3.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความดันสำหรับการกรองน้ำฝรั่ง ด้วยเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ ขนาดรูพรุน 0.3 ไมโครเมตร อัตราการไหลสารป้อน 1.8 ลิตร/นาที

ภาพประกอบ 3.23 แสดงให้เห็นผลของอัตราการไหลต่อความต้านทานต่าง ๆ ซึ่งเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นค่า R_t, $R_{p,re}$, R_f และ $R_{p,ir}$ มีค่าลดลง เนื่องจากที่อัตราการไหลสูงมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายและแรงเฉือนสูง ชั้น CP/GP จึงมีความหนาน้อย เนื่องจากเกิดการสะสมของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของเมมเบรนน้อยลง โอกาสที่ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะไปอุดตันในรูพรุนของเมมเบรนก็น้อยลงด้วย นั้นคือเกิด fouling ได้ยากกว่า

ที่ความดัน 12 ปอนด์/นิ้ว^2 พบว่ามีค่า R_t, $R_{p,re}$, R_m, R_f และ $R_{p,ir}$ เท่ากับ 23.07, 22.16, 0.10, 0.77 และ 0.05 กิโลปาสคาล/ (ลิตร / เมตร^2. ชั่วโมง) ตามลำดับ ซึ่ง $R_{p,re}$ มีค่าเป็นร้อยละ 96.05 ของ R_t ซึ่งแสดงว่าการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดนี้สามารถล้างเอาเจลออกได้ง่าย

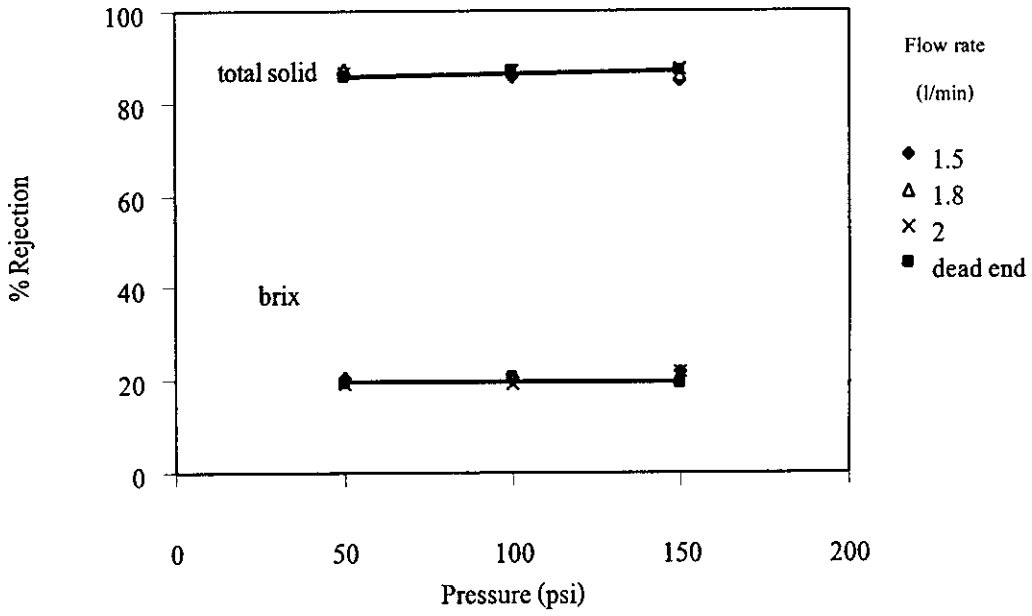


ภาพประกอบ 3.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอัตราการไหลสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ ขนาดรูพรุน 0.3 ไมโครเมตร ความดัน 16 ปอนด์/นิ้ว^2

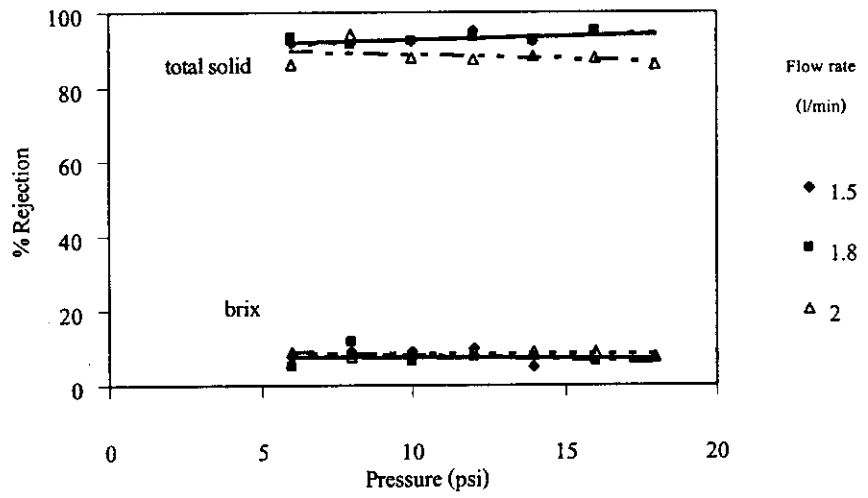
3.5 ผลของความดันและอัตราการไหลต่อการกักกัน

3.5.1 ผลของความดัน

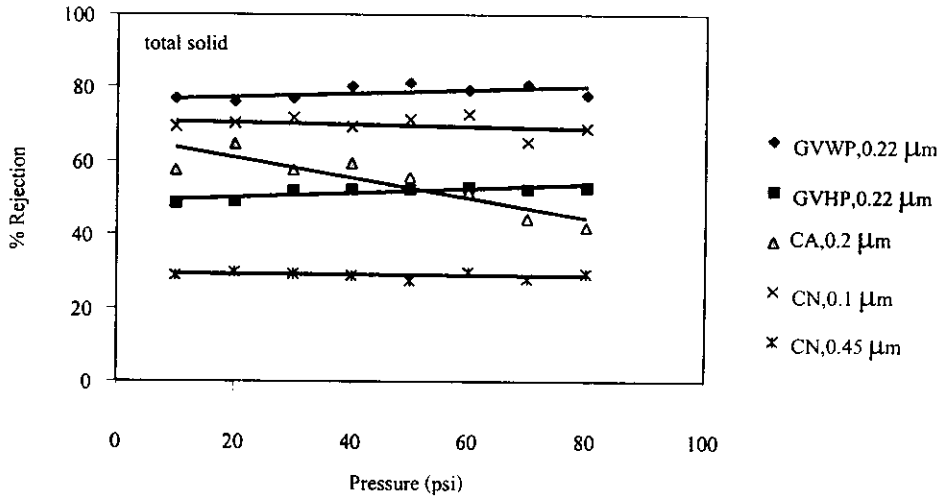
ภาพประกอบ 3.24 3.25 3.26 และ 3.27 ผลของความดันต่อเปอร์เซ็นต์การกักกันของแข็งรวมและการกักกันบริกซ์ ที่อัตราการไหลและความดันต่างๆของเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน (ข้อมูลภาคผนวก ข) พบว่าความดันมีผลเล็กน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของการกักกันของแข็งรวมและการกักกันบริกซ์ในเมมเบรนทุกชนิด เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนมากขึ้น ชั้นเจลจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน/เจล ถูกอัดแน่นมากขึ้น ทำให้สามารถกักกันตัวถูกละลายได้มาก ผลของความดันต่อการกักกันของแข็งรวมและบริกซ์มีน้อยมาก จากการทดลองพบว่า เมมเบรนทุกชนิดสามารถกักกันของแข็งทั้งหมดไว้ได้มาก โดยเฉพาะในเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กๆ อย่างเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน (MWCO 100,000 และ 50,000) ได้ถึงร้อยละ 87



ภาพประกอบ 3.24 แสดงผลของความดันต่อการกักกันของแข็งรวมทั้งหมดและของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน ขนาดรูพรุน MWCO 100,000 ที่อัตราการไหลสารป้อน 1 ลิตร/นาที



ภาพประกอบ 3.25 แสดงผลของความดันต่อการกักกันของแข็งรวมทั้งหมดและของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ ขนาดรูพรุน 0.3 ไมโครเมตร ที่อัตราการไหลสารป้อนต่างๆ



ภาพประกอบ 3.26 แสดงผลของความดันต่อการกักกันของแข็งรวมทั้งหมดสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ที่อัตราการไหลสารป้อน 1 ลิตร/นาที

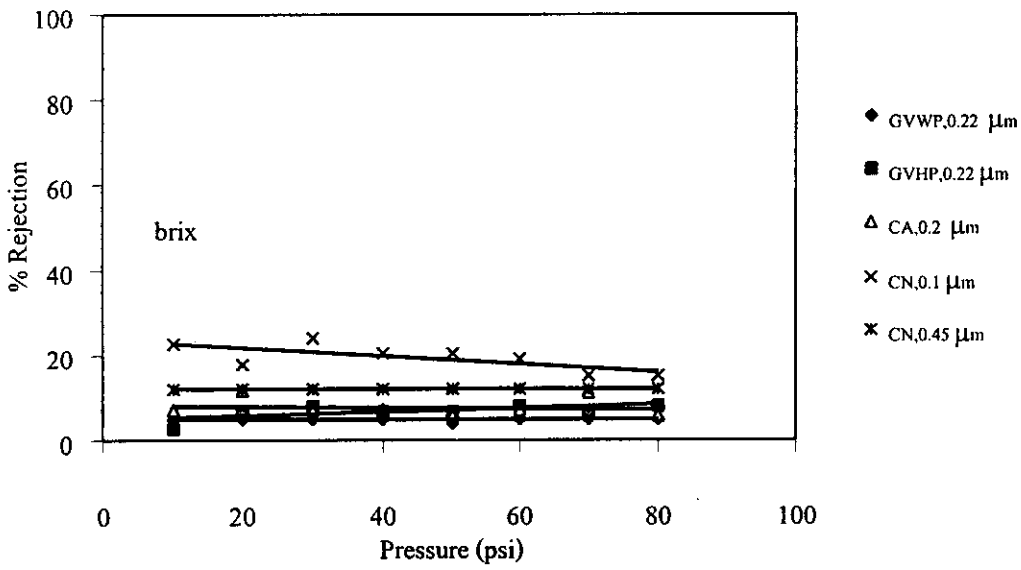
เมมเบรนชนิดเซลลูโลสไนเตรท ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร มีค่าการกักกันของแข็งต่ำแสดงว่าสามารถกักกันของแข็งไว้ได้น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบการกักกันของของแข็งรวมทั้งหมดของเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVHP) กับ (GVWP) พบว่า GVWP สามารถกักกันของแข็งรวมไว้ได้มากกว่า GVHP ที่เป็นเช่นนี้เพราะเกิดเจลขึ้นที่ผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งเปรียบเสมือนเมมเบรนชั้นที่สองและเกิด fouling ขึ้นที่ผิวเมมเบรนและภายในรูพรุนของเมมเบรน เมมเบรนชนิดเซลลูโลสอะซิเตท ขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร แสดงคุณสมบัติการกักกันของแข็งรวมลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ของแข็งสามารถผ่านเมมเบรนได้มากขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากเมมเบรนชนิดนี้มีผิวหน้าขรุขระจึงเกิดการสะสมของของแข็งที่ผิวหน้าเมมเบรน เมื่อความดันสูงขึ้นจึงทำให้อนุภาคมีโอกาสหลุดลอดผ่านเมมเบรนไปได้มากขึ้น

3.5.2 ผลของอัตราการไหล

ภาพประกอบ 3.24 และ 3.25 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการกักกันของของแข็งและบริกซ์ลดลงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเพิ่มแรงเฉือนทำให้เพอมิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นและความต้านทานลดลง

ค่าการกักกันบริกซ์มีค่าต่ำแสดงว่า เมมเบรนทุกชนิดสามารถกักกันน้ำตาลไว้ได้น้อย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ น้ำตาลมีขนาดโมเลกุลเล็ก (เช่น ซูโครส 342 kDa) โดยเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVWP) สามารถกักกันน้ำตาลไว้ได้ต่ำสุด และต่ำกว่า GVHP เมื่อเทียบกัน แต่ GVWP สามารถกักกันของแข็งรวมไว้ได้มากที่สุด แสดงว่าสารละลายที่ทำให้เกิดการอุดตันบนเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (GVWP) เป็นสารประกอบอื่นในน้ำฝรั่งยกเว้นน้ำตาล ซึ่งโดยทั่วไปน้ำฝรั่งมีองค์ประกอบที่เป็นสารแขวนลอยอยู่มาก เช่น แป้ง เซลลูโลส เฮทมิเซลลูโลส และเพกทิน ซึ่งสารเหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

จากการเปรียบเทียบผลระบบการไหลแบบ dead-end และแบบไหลขวางต่อค่าการกักกันของแข็งรวมและบริกซ์ พบว่าระบบการไหลจะไม่มีผลต่อค่าการกักกันทั้งสอง แต่ขึ้นอยู่กับความดันและอัตราการไหล



ภาพประกอบ 3.27 แสดงผลของความดันต่อการกักกันของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดสำหรับการกรองน้ำฝรั่งด้วยเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ที่อัตราการไหลสารป้อน 1 ลิตร/นาที