

บทที่ 2

ปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการแยกสารละลาย NaCl น้ำตาล และองค์ประกอบบางชนิด ของน้ำปลาเจือจางด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

บทนำต้นเรื่อง

กระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบจากสารละลายป้อน โดยอาศัยแรงดันขับ สำหรับกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนแรงดันขับมาจากผลต่างของความดันผลต่างของศักย์ไฟฟ้า ผลต่างของความเข้มข้น เป็นต้น (Schaep *et al*, 1998)

ในช่วง 30 ปีมานี้ได้มีการพัฒนากระบวนการแยกด้วยเมมเบรนขึ้นมาใหม่ซึ่งถูกเรียกว่า “นาโนฟิลเตรชัน” นาโนฟิลเตรชัน (NF) เป็นกระบวนการแยกที่อาศัยแรงดันขับซึ่งมีคุณสมบัติอยู่ระหว่าง ออสโมซิสผันกลับ (RO) และอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เมื่อเปรียบเทียบกับอัลตราฟิลเตรชันกับนาโนฟิลเตรชัน พบว่าเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าซึ่งมีผลทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (MW) ใหญ่กว่า 200 จะถูกกักกันไว้และเมื่อเปรียบเทียบกับออสโมซิสผันกลับ พบว่าค่าการกักกันไอออนที่มีวาเลนซ์เดี่ยว (monovalent ions) จะต่ำกว่า โดยนาโนฟิลเตรชันจะกักกันได้ประมาณร้อยละ 10-80 (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของเมมเบรน) แต่สามารถกักกันไอออนที่มีวาเลนซ์ตั้งแต่ 2 ขึ้นไป (multivalent ions) ได้มากกว่าร้อยละ 90 (Raman *et al*, 1994)

โดยทั่วไปกระบวนการนาโนฟิลเตรชันใช้สำหรับการผลิตน้ำดื่มจากน้ำกระด้าง (water softening) การแยกสารพิษโมเลกุลเล็กๆออกจากน้ำ การแยกสารให้สีในอุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ การผลิตเนยแข็งและน้ำผลไม้และการเก็บเกี่ยวกรดอะมิโนและสารปฏิชีวนะ เป็นต้น (Jiraratananon *et al*, 2000 ; Ducom and Cabassud, 1999 ; Matsubara *et al*, 1996)

นาโนฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกที่มีกลไกการกักกันสารทั้งผลของประจุและขนาด ทำให้ขนาดรูพรุนของเมมเบรนเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญที่ใช้ในการหาค่าขนาดตัวถูกละลาย

เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันแสดงถึงคุณสมบัติจากการมีกลุ่มไอออนประเภท $-SO_3H$ และ $-COOH$ บนโครงสร้างโพลิเมอร์ซึ่งมีผลทำให้เมมเบรนมีประจุ ดังนั้นเมื่อทำการกรองสารละลายที่มีตัวถูกละลายมีประจุจะทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่างตัวถูกละลายกับเมมเบรน (Bowen *et al*, 1997)

ในนาโนฟิลเตรชัน การจะบรรยายถึงผลของขนาดจำเป็นจะต้องกำหนดขนาดรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งวิธีการที่ใช้กันบ่อยๆสำหรับเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน เช่น gas adsorption-

desorption, permoporometry ไม่เหมาะกับการกำหนดขนาดรูพรุนของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันซึ่งมีขนาดรูพรุนเล็กกว่ามาก ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคที่ทันสมัยกว่า เช่น Field Emission Scanning-Electron Microscopy (FESEM) และ Atomic Force Microscopy (AFM) เป็นต้น ที่สามารถแสดงภาพของผิวหน้าเมมเบรน แต่อย่างไรก็ตาม ภาพของพื้นผิวเมมเบรนไม่สามารถบอกถึงทุกสิ่งทุกอย่างเกี่ยวกับโครงสร้างของรูพรุนได้ ดังนั้นก่อนดำเนินการทดลองจริงจึงจำเป็นต้องมีการประเมินขนาดรูพรุนของเมมเบรนก่อน

โดยปกติการประเมินขนาดรูพรุนของเมมเบรนจะทำได้โดยการกรองสารละลาย น้ำตาลหรือสารละลายชนิดอื่นๆที่ไม่มีประจุ ถ้าเมมเบรนสามารถกักกันตัวถูกละลายได้มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 90 ก็จะถือว่าเมมเบรนมีขนาดรูพรุนเท่ากับน้ำหนักโมเลกุลของสารชนิดนั้น (Wang, *et al* 1995)

Xu และ Lebrun (1999) ศึกษาผลของ pH ของสารละลาย NaCl ต่อค่าการกักกัน NaCl โดยใช้เมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน (NF 45, Filmtec) กรองสารละลาย NaCl เข้มข้น 4.4 ถึง 105.5 mol/m³ ความดันขับ 1000 kPa และ pH 3 ถึง 10 พบว่าค่าการกักกัน NaCl มีค่าต่ำสุดที่ pH = 6.5 ซึ่งเป็น Isoelectric point (pI) ของเมมเบรน แต่เมื่อ pH > pI เมมเบรนมีประจุเป็นลบ ค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้นและเมื่อ pH < pI เมมเบรนมีประจุเป็นบวก ค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้นในทุกความเข้มข้นของสารละลาย NaCl

Schaep และคณะ (1999) ศึกษาความสามารถในการกักกันสารละลาย NaCl, MgCl₂, Na₂SO₄ และ MgSO₄ โดยใช้เมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน 4 ชนิดคือ NTR 7450 (Nitro Denko), CA 30 (Hoechst) และ NF 40 (Dow) มีประจุเป็นลบ ส่วน UTC 20 (Toray Industries) มีประจุเป็นบวก โดยสารละลายเกลือมีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ถึง 2 ความดันขับ 20 bar และ pH 5.5 พบว่า NF 40 และ UTC 20 มีค่าการกักกัน Na₂SO₄, MgCl₂ และ MgSO₄ เกลือร้อยละ 80 ส่วนค่าการกักกัน NaCl เกลือร้อยละ 50 อันเนื่องมาจากเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดนี้มีขนาดรูพรุนเล็กคือประมาณ 0.41 nm และ 0.42 nm ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน CA 30 และ NTR 7450 มีค่าการกักกันเกลือทั้ง 4 ชนิดต่ำอันเนื่องมาจากเมมเบรนมีขนาดรูพรุนใหญ่คือประมาณ 0.94 nm และ 0.69 nm ตามลำดับ

Perry และ Linder (1989) ศึกษาการแยกสารอินทรีย์ที่มีประจุและน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (150 - 1000 Da) ออกจากสารละลาย NaCl โดยใช้เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันซึ่งมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่างออสโมซิสผันกลับที่กักกันตัวถูกละลายไว้ทุกชนิดและอัลตราฟิลเตรชันที่กักกันเฉพาะสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ พบว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300 Da จะถูกกักกันไว้ได้มากกว่าร้อยละ 90 ในขณะที่ NaCl ถูกกักกันไว้ได้น้อยกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาณเกลือที่ถูกกักกันไว้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์ที่มีประจุถูกกักกันไว้ได้เพิ่มขึ้น

Vellanga และ Tragardh (1998) ศึกษาการกักกันสารละลาย NaCl สารละลายน้ำตาล

และสารละลาย NaCl ผสมน้ำตาลชูโครส โดยใช้เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันชนิด Thin film (DS5, Desalination) ส่วนของรีเทนเททและเพอมีเอทจะไหลวนกลับไปยังถังป้อนใหม่เพื่อรักษาระดับความเข้มข้นให้คงที่ โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 23.5°C อัตราการไหล 1.96 m/s และความดันขับ 8 ถึง 21 bar โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaCl และชูโครสเป็น 0-4 g/l และ 0-80 g/l ตามลำดับพบว่าค่าการกักกันสารละลาย NaCl ลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้น แต่สำหรับการกักกันน้ำตาลชูโครส ค่าการกักกันของสารละลายน้ำตาลจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำตาล

Nawak และคณะ (1996) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการกรองน้ำเสียที่มีเกลือ NaCl หรือ CaCl₂ ผสมอยู่ โดยใช้ระดับความเข้มข้นของเกลือต่างกัน (1-25 kg/m³) ที่ความดันขับ 0.2 MPa เมมเบรนที่ใช้มีอยู่ 5 ชนิด โดยทำมาจากวัสดุที่แตกต่างกันคือ Polyethersulfone (PES), Cellulose (C), Cellulose acetate (CA), Polysulfone (PS) และ Polyaramide (PA) (Intersep Nadir) ในการหาค่าฟลักซ์เชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การกักกันเกลือ โดยให้ระบบมีอัตราการไหล ความดันและความเข้มข้นของเสียคงที่ จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการกักกันเกลือลดลงอันเป็นผลมาจากการแพร่และค่าฟลักซ์เชิงปริมาตรลดต่ำลงอันเนื่องมาจากความดันออสโมติก

Alkhatim และคณะ (1998) ศึกษาการใช้เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันชนิด NF-45 และ NF-90 (Filmtec) ในการบำบัดน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตหางนมที่มี NaCl เข้มข้น 1250 ppm, MgSO₄ เข้มข้น 740 ppm และ KCl เข้มข้น 1250 ppm ผสมอยู่ โดยทำการศึกษาผลของความดัน ค่า pH และอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อย เมมเบรน NF-45 กักกัน NaCl ร้อยละ 24, KCl ร้อยละ 32 และ MgSO₄ ร้อยละ 85 ขณะที่เมมเบรน NF-90 กักกัน NaCl ร้อยละ 60, KCl ร้อยละ 65 และ MgSO₄ ร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาด้านพลังงานที่ใช้เทียบกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับพบว่ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าออสโมซิสผันกลับ ร้อยละ 60

เนื่องจากการนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆ จากที่กล่าวมาแล้ว จึงได้มีการผลิตเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันขึ้นมามากมายหลายชนิด ซึ่งการจะนำเมมเบรนเหล่านี้ไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติในการกักกันสารที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นในการศึกษาสารละลายเดี่ยวๆ ที่ความเข้มข้นต่างๆ และสภาวะการดำเนินงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ความดันขับต่างๆ อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายต่ำ ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้จะศึกษาในสารละลายผสม (น้ำตาล) ที่มีความเข้มข้นของสารละลาย NaCl และ โปรรินสูง ซึ่งไม่เคยมีผู้ทำการศึกษามาก่อน ดังนั้นการศึกษารั้งนี้จะศึกษาถึงเรื่องอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างตัวถูกละลายกับตัวถูกละลาย ตลอดจนผลของสภาวะที่ใช้ใน

การทดลองและที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ส่งผลต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและการกักกันของตัวถูกละลายซึ่งจะส่งผลให้เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการดำเนินการสูงสุด

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของชนิด pH และความเข้มข้นของสารละลายและอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายกับตัวถูกละลายของสารละลาย NaCl น้ำตาลซูโครส กลูโคส และน้ำปลาเจือจางต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันของสารละลาย NaCl น้ำตาลและองค์ประกอบบางชนิดในน้ำปลา
2. ศึกษาผลของความดันขับและความเร็วตามขวางของการดำเนินงานต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันของสารละลาย NaCl น้ำตาลและองค์ประกอบบางชนิดในน้ำปลา

1. วัสดุ อุปกรณ์

1.1 NaCl ตราปทุมทิพย์

1.2 น้ำตาลซูโครส ตรามิตรผลและน้ำตาลกลูโคส ตรากลูโคลิน

1.3 น้ำปลา ตราปลาหมึก

1.4 ระบบเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง

ระบบเมมเบรนระดับโรงงานทดลอง (pilot plant scale) มีรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 2-1 โดยมีถังป้อนขนาด 50 ลิตร การป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบจะใช้ปั๊มสารป้อน สามารถปรับอัตราการไหลของสารป้อนและความดัน โดยการปรับวาล์วของรีเทนเททและปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (inverter) ควบคุมอุณหภูมิในการกรองสารละลายให้คงที่ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$ โดยใช้น้ำกรองในการหล่อเย็นระบบ

เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบท่อม้วน (spiral wound) ชนิด Thin film (DK2540, Osmonic Inc.) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อม้วนและความยาวเป็น 63.5 มม.(mm.) และ 1.016 เมตร (m.) พื้นที่การกรอง 1.77 ตารางเมตร (m^2) สามารถกักกัน MgSO_4 ที่ความเข้มข้น 2000 mg/l ได้ร้อยละ 98

2. วิธีการทดลอง

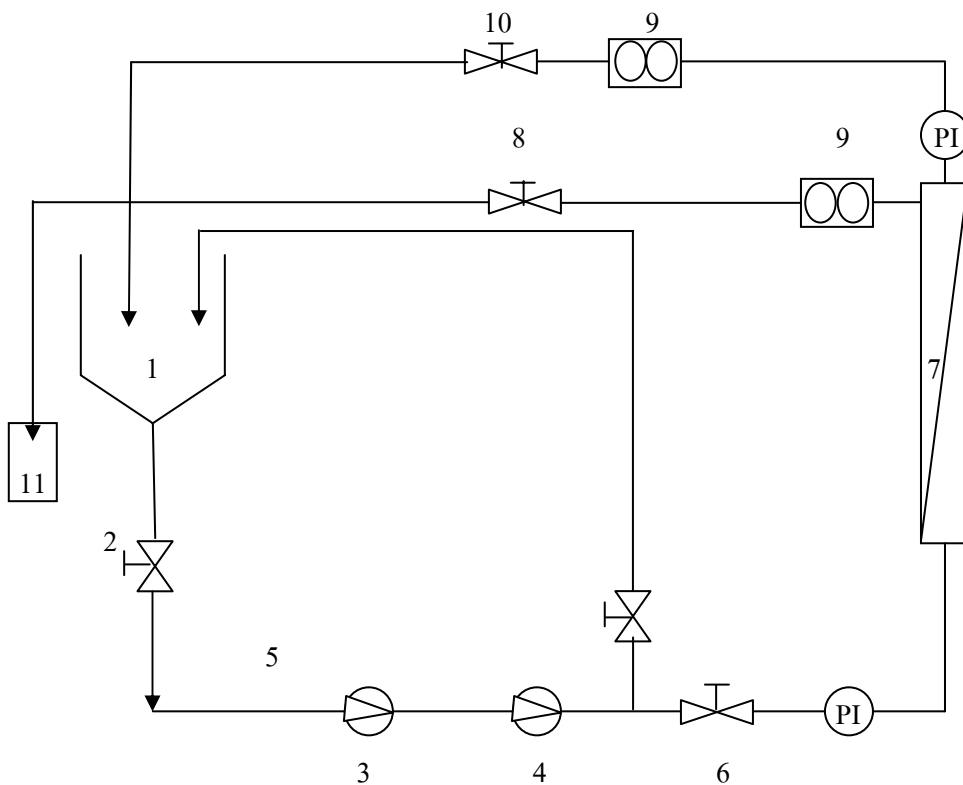
1. ศึกษาผลของความเข้มข้นและความดันต่อค่าการกักกันและค่าฟลักซ์ของสารละลาย NaCl น้ำตาลซูโครสและกลูโคส

- สารละลายNaClที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25(w/v) ตามลำดับ
- สารละลายน้ำตาลซูโครสและกลูโคสที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 (w/v)

ตามลำดับ

- สารละลายผสมระหว่างNaClที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 (w/v) และ สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (w/v) ตามลำดับ

โดยใช้ความดันขับ 5 ระดับ คือ 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 bar ตามลำดับ โดยควบคุมความเร็วตามขวางของสารป้อน 500 l/h. ที่อุณหภูมิ 28 ± 3 °C และ pH 7 ภายใต้การดำเนินการกรองแบบป้อนกลับ (total recycle mode)



(1) Feed tank, (2) Drain valve, (3) Feed pump, (4) High pressure pump, (5) By pass valve, (6) Feed valve, (7) Nanofiltration module, (8) Permeate valve, (9) Flow meter, (10) Retentate valve, (11) Permeate container and (PI) Pressure indicator

ภาพที่ 2-1 ระบบนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง

Figure 2-1 Nanofiltration pilot plant scale system

2. ศึกษาผลของ pH และความดันขับต่อค่าการกักกันและค่าฟลักซ์ของสารละลาย NaCl

- pH ที่ใช้มี 5 ระดับ คือ 5, 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ

โดยใช้สารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (w/v) และ ความดันขับ 5 ระดับ คือ 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 bar ตามลำดับ โดยควบคุมความเร็วตามขวางของสารป้อน 500 l/h ที่อุณหภูมิ 28 ± 3 °C และ pH 7 ภายใต้การดำเนินการกรองแบบป้อนกลับ

3. ศึกษาผลของความเร็วตามขวางของสารป้อนค่าการกักกันและค่าฟลักซ์ของสารละลาย NaCl น้ำตาลซูโครส และ กลูโคส

- ความเร็วตามขวางของสารป้อน 4 ระดับ คือ 100, 350, 600 และ 850 l/h

โดยใช้สารละลาย NaCl และ น้ำตาลซูโครส ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 (w/v) โดยควบคุมอุณหภูมิ 28 ± 3 °C และความดันขับที่ 6 bar และ pH 7 ภายใต้การดำเนินการกรองแบบป้อนกลับ

4. ศึกษาผลของระดับน้ำปลาเจือจางและความดันต่อค่าการกักกัน NaCl และ โปรตีนและค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท

- ระดับน้ำปลาเจือจางที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 (v/v) ตามลำดับ โดยใช้ความดันขับ 5 ระดับ คือ 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 bar ตามลำดับ โดยควบคุมความเร็วตามขวางของสารป้อน 500 l/h. ที่อุณหภูมิ 28 ± 3 °C และ pH 5.5 ภายใต้ลักษณะการดำเนินการกรองแบบป้อนกลับ

5. ศึกษาผลของความเข้มข้น NaCl ที่เติมลงในน้ำปลาเจือจางและความดันต่อค่าการกักกัน NaCl และ โปรตีนและค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของน้ำปลาเจือจาง

- ความเข้มข้นของสารละลาย NaCl ที่เติมลงไปร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 (w/v) ตามลำดับ

โดยใช้ความดันขับ 5 ระดับ คือ 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 bar ตามลำดับ โดยควบคุมน้ำปลาเจือจางที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 (v/v) ความเร็วตามขวางของสารป้อน 500 l/h ที่อุณหภูมิ 28 ± 3 °C และ pH 5.5 ภายใต้การดำเนินการกรองแบบป้อนกลับ

6. ศึกษาผลของ pH ต่อค่าการกักกัน NaCl และ โปรตีนและค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของน้ำปลาเจือจาง

- pH ที่ใช้มี 3 ระดับ คือ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ

โดยใช้ความดันขับ 5 ระดับ คือ 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 bar ตามลำดับ โดยควบคุมน้ำปลาเจือจางที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 (v/v) ความเร็วตามขวางของสารป้อน 500 l/h ที่อุณหภูมิ 28 ± 3 °C และ pH 5.5 ภายใต้การดำเนินการกรองแบบป้อนกลับ

7. ศึกษาผลของความเร็วตามขวางของสารป้อน ต่อค่าการกักกันNaClและโปรตีนและค่าฟลักซ์ของเพอมีอเทของน้ำปลาเจือจาง

- ความเร็วตามขวางของสารป้อน 4 ระดับ คือ 100, 350, 600 และ 850 l/h

โดยใช้น้ำปลาเจือจางที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 (v/v) โดยควบคุมอุณหภูมิ 28 ± 3 °C และความดันขั้วที่ 6 bar และ pH 5.5 ภายใต้การดำเนินการกรองแบบป้อนกลับ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมี

- พีเอช โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PB-20)

- ปริมาณNaClในสารละลายเกลือ โดยใช้ Conductivity (Xu *et al*, 2005)

- ปริมาณNaClในสารละลายผสม (A.O.A.C, 2000)

- ปริมาณน้ำตาลซูโครสและกลูโคส โดยใช้ Hand Refractometer (ยี่ห้อ ATAGO รุ่น N2)

- ปริมาณน้ำตาลซูโครสในสารละลายผสมตามวิธี Phenol sulfuric (Chaplin, 1986)

2.2 การวิเคราะห์ฟาวลิง

การวิเคราะห์ความต้านทานของกระบวนการเมมเบรนสามารถแยกความต้านทานการไหลของเพอมีอเทเป็นความต้านทานของเมมเบรน (R_m) ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (R_{if}) และความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลาริเซชัน (R_p)

ดังนั้นความต้านทานรวม (R_t) ในสมการที่ [2.1] ประกอบด้วย

$$R_t = R_m + R_{if} + R_{ip} \quad [2.1]$$

ซึ่งความต้านทานแต่ละตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

1.) ความต้านทานรวม (R_t) สามารถคำนวณได้จากการเขียนกราฟระหว่างฟลักซ์ของสารละลายกับ TMP ที่ใช้ในการวัดค่าฟลักซ์ดังกล่าว จำนวนความชันของกราฟแล้วเปรียบเทียบกับสมการที่ [2.2]

$$R_t = \frac{TMP}{\mu_p J} \quad [2.2]$$

$$R_t = \frac{1}{\mu_p \text{slope}} \quad [2.3]$$

เมื่อ	TMP	=	ความดันขับที่ให้กับระบบ (Pa)
	J	=	ฟลักซ์ของสารละลาย ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
	μ_p	=	ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)

2.) ความต้านทานเมมเบรน (R_m) สามารถคำนวณได้จากการเขียนกราฟระหว่างฟลักซ์ของน้ำกรองกับ TMP ที่ใช้ในการวัดค่าฟลักซ์ดังกล่าว คำนวณความชันของกราฟแล้วเปรียบเทียบกับสมการที่ [2.4]

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_w J_w} \quad [2.4]$$

$$R_m = \frac{1}{\mu_w \text{slope}} \quad [2.5]$$

เมื่อ	TMP	=	ความดันขับที่ให้กับระบบ (Pa)
	J_w	=	ฟลักซ์ของน้ำกรองก่อนการใช้งาน ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
	μ_w	=	ความหนืดของน้ำกรอง (Pa.s)

หลังจากการใช้งานแล้วจะทำกราฟความดันเมมเบรนด้วยน้ำกรองเพื่อกำจัดชั้นคอนเซนต์เรชั่น โพลารไรเซชั่น ดังนั้นค่าความต้านทานของชั้น โพลารไรเซชั่นจึงถูกกำจัดออกไป ค่าความต้านทานที่เหลืออยู่คือ ความต้านทานเมมเบรน (R_m) และความต้านทานของฟาวลิงที่ไม่สามารถผันกลับได้ (R_{irf}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเขียนกราฟระหว่างฟลักซ์ของน้ำกรองหลังจากการล้างเมมเบรนกับ TMP ที่ใช้ในการวัดค่าฟลักซ์ดังกล่าว คำนวณ ความชันของกราฟแล้วเปรียบเทียบกับสมการที่ [2.6]

$$R_m + R_{irf} = \frac{TMP}{\mu_w J_w} \quad [2.6]$$

$$R_m + R_{irf} = \frac{1}{\mu_w \text{slope}} \quad [2.7]$$

เมื่อ	TMP	=	ความดันขับที่ให้กับระบบ (Pa)
	J'_w	=	ฟลักซ์ของน้ำกรองหลังจากการล้างเมมเบรน ($m^3/m^2.s$)
	μ_w	=	ความหนืดของน้ำกรอง (Pa.s)

3.) ความต้านทานของชั้นโพลารไรซ์ (R_{irf}) สามารถคำนวณโดยการแทนค่าของสมการที่ [2.3] และ [2.7] ลงในสมการที่ [2.1]

4.) ความต้านทานของฟาวลิง (R_{irf}) สามารถคำนวณโดยการแทนค่าของ R_m จากสมการ [2.5] ลงในสมการ [2.8] จะได้ดังนี้

$$R_{irf} = \frac{TMP}{(\mu_w J'_w) - R_m} \quad [2.8]$$

โดยดำเนินการล้างที่ความดันขับ 4.0 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h อุณหภูมิ $28 \pm 3^\circ C$

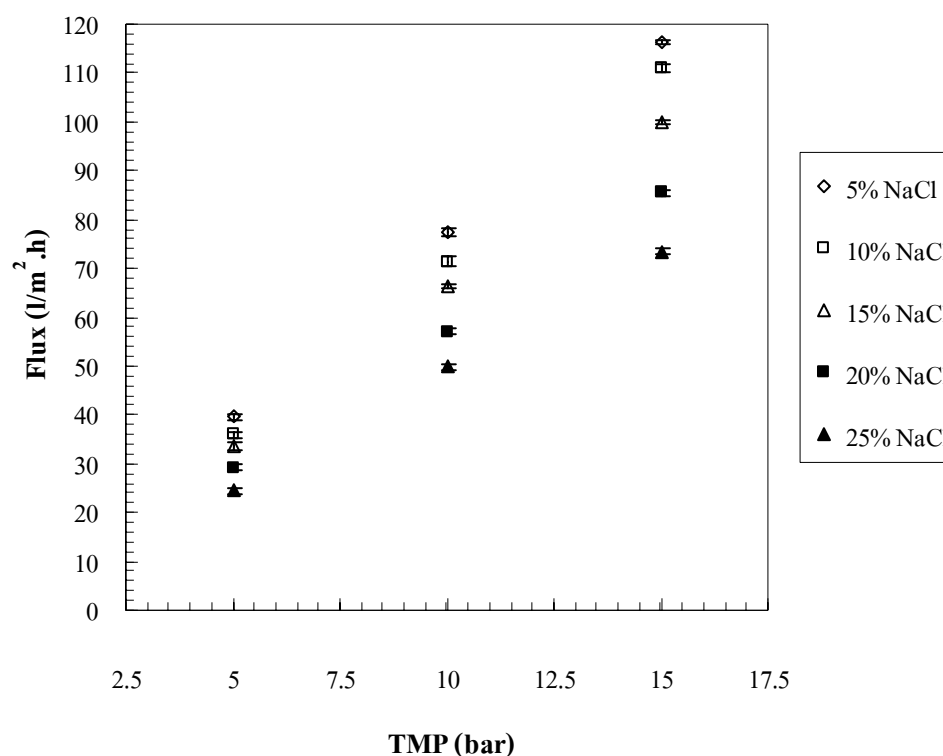
2.3 วิธีการล้างเมมเบรน

หลังจากกระบวนการกรองแต่ละครั้งทำการล้างเมมเบรนด้วยน้ำกรองที่อุณหภูมิห้องเพื่อทำการชะล้างสิ่งอุดตันออกด้วยด่าง EDTA (Ethylene Diamine Tetra Acetic acid) เข้มข้นร้อยละ 1.0 (w/v) pH 11 ที่ความดันขับ 4.0 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h อุณหภูมิ $25 \pm 4^\circ C$ นาน 30 นาที ใช้น้ำกรองในการทำความสะอาดทำความสะอาดและล้างด้วยกรดซิตริก เข้มข้นร้อยละ 1.0 (w/v) pH 2 ที่อุณหภูมิ $25 \pm 4^\circ C$ ที่ความดันขับและความเร็วตามขวางระดับเดียวกันนาน 30 นาที ใช้น้ำกรองในการทำความสะอาดและทำการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่สภาวะคงที่ จากนั้นใช้น้ำ KMS (Potassium metabisulfite) เข้มข้นร้อยละ 0.5 (w/v) วนทั้งระบบนาน 10 นาที ก่อนทำการหยุดระบบการกรองและกักไว้ในเมมเบรนเพื่อป้องกันเชื้อแบคทีเรีย และก่อนกรองทุกครั้งจะทำความสะอาด KMS โดยการใช้น้ำกรองไล่และวัดค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดให้ได้เท่ากันทุกครั้งก่อนการกรอง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. สารละลายNaCl

1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายNaClและความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันNaCl

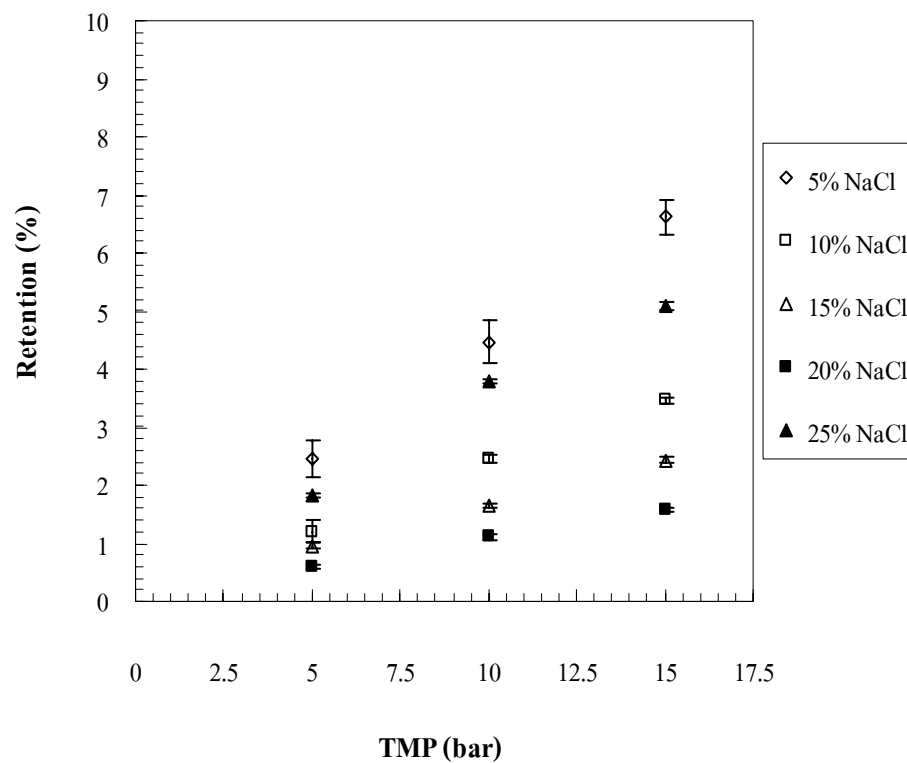


ภาพที่ 2-2 ผลของความดันขับและความเข้มข้นต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทภายใต้สภาวะความเข้มข้นของสารละลายNaClแตกต่างกัน ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 7 และ อุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-2 Effect of TMP and concentration on permeate flux under different concentration of NaCl solution at cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 2-2 แสดงผลของความดันขับและความเข้มข้นต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท ที่ความเข้มข้นของสารละลายNaClแตกต่างกัน พบว่าเมื่อความดันขับเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 15 bar ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่ความเข้มข้นของสารละลายNaClคงที่ อันเนื่องมาจากการเพิ่มความดันขับเป็นการเพิ่มให้ผลต่างของแรงดันขับสุทธิเพิ่มขึ้นและเมื่อความ

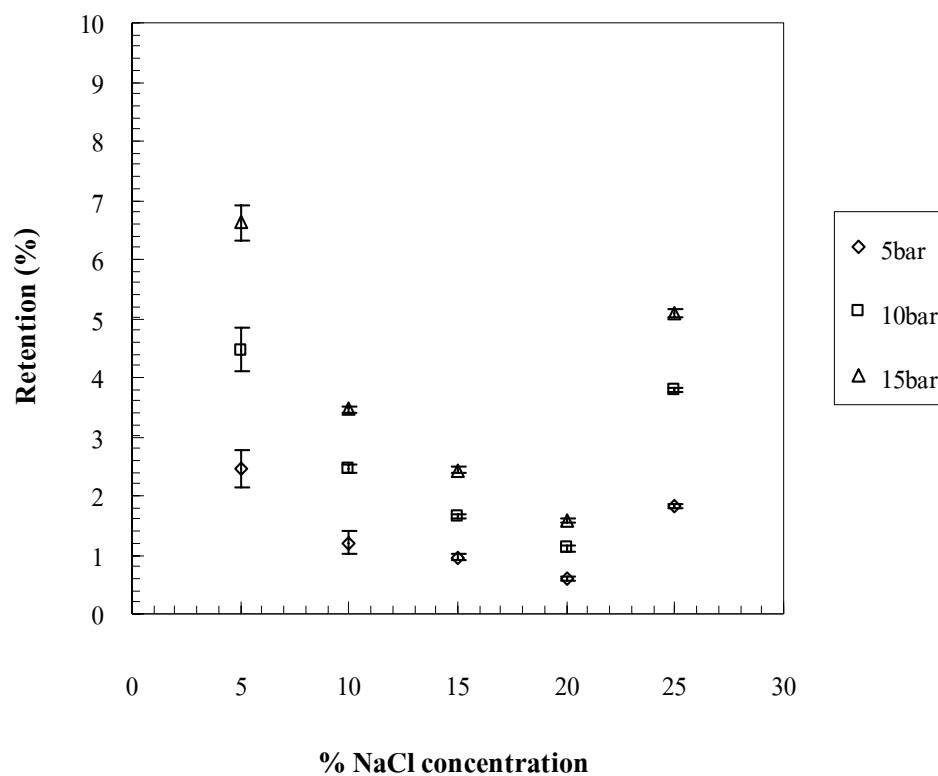
เข้มข้นของNaClเพิ่มขึ้นจากร้อยละ5 เป็นร้อยละ25 (w/w) ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่ความดันขั้บคงที่ สิ่งนี้สามารถอธิบายได้จากผลของความดันออสโมติก (osmotic pressure) คือเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นมีผลทำให้ความดันออสโมติกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลต่างของความดันขั้บสุทธิในกระบวนการลดลง แต่เมื่อความดันขั้บเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 15 bar ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่ความเข้มข้นคงที่ อันเนื่องมาจากเมื่อความดันขั้บสูงขึ้นมีผลทำให้ความดันขั้บสุทธิในกระบวนการเพิ่มขึ้น (Wang *et al*, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Hilal และคณะ 2005 ที่ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายNaCl และความดันขั้บต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทโดยใช้NaClที่ความเข้มข้น 5000-25000 ppm ที่ความดัน 2- 9 bar พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้นเมื่อความดันขั้บเพิ่มขึ้น และจะลดต่ำลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น



ภาพที่ 2-3 ผลของความดันขั้บและความเข้มข้นต่อค่าการกักกันNaCl ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของสารละลายNaClที่แตกต่างกัน ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 7 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-3 Effect of TMP and concentration on retention of NaCl under different concentration of NaCl solution at cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 2-3 แสดงผลของความดันขับและความเข้มข้นต่อค่าการกักกันNaClที่ความเข้มข้นของสารละลายNaClแตกต่างกัน พบว่าค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อความดันขับเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 15 bar อันเนื่องมาจากเมื่อความดันขับเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การส่งผ่านตัวถูกละลายโดยการพาเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 2-2 ทำให้อนุภาค NaClถูกพามาสะสมบริเวณหน้าของเมมเบรนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรด์เซชันได้มากกว่าตอนที่ใช้ความดันขับต่ำๆ ส่งผลให้เกิดการแพร่กลับและการแพร่ผ่านเมมเบรนของ NaClเพิ่มมากขึ้น แต่จากผลการทดลอง พบว่าค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้นเมื่อความดันขับเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเกิดการแพร่กลับมากกว่าเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการกักกัน NaClเพิ่มขึ้น (Gestel *et al*, 2002)



ภาพที่ 2-4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายNaClและความดันขับต่อค่าการกักกันNaCl ภายใต้สภาวะความดันขับที่แตกต่างกัน ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 7 และ อุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-4 Effect of concentration of NaCl solution and TMP on retention of NaCl under different TMP at cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 2-4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกักกันNaClกับความเข้มข้นของสารละลายNaClเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นร้อยละ5 เป็นร้อยละ25 (w/w) ที่ความดันขับแตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเข้มข้นของNaClเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นร้อยละ5 เป็นร้อยละ20 (w/w) ค่าการกักกันNaClลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายNaClเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคของNaClสะสมบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านของอนุภาคNaClโดยการแพร่ผ่านเมมเบรนได้เร็วกว่าการแพร่กลับ (back diffusion) ไปยังส่วน bulk solution อันเนื่องมาจากผลต่างของความเข้มข้น

แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายNaCl เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ25 (w/w) ค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดการแพร่กลับของอนุภาคNaClไปยังส่วน bulk solution ได้เร็วกว่าการแพร่ผ่านเมมเบรน (Vellenga and Tragardh, 1998) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Nystrom และคณะ 1995 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ สารละลายNaCl ต่อค่าการกักกันNaCl โดยใช้เมมเบรน NF 40 และ NTR-7250 ที่ความดัน 4 ถึง 12 bar อุณหภูมิ 25°C และความเร็วตามขวาง 2 m/s โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายNaClในช่วงร้อยละ 0.1-20 ปรากฏว่าค่าการกักกันNaClลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

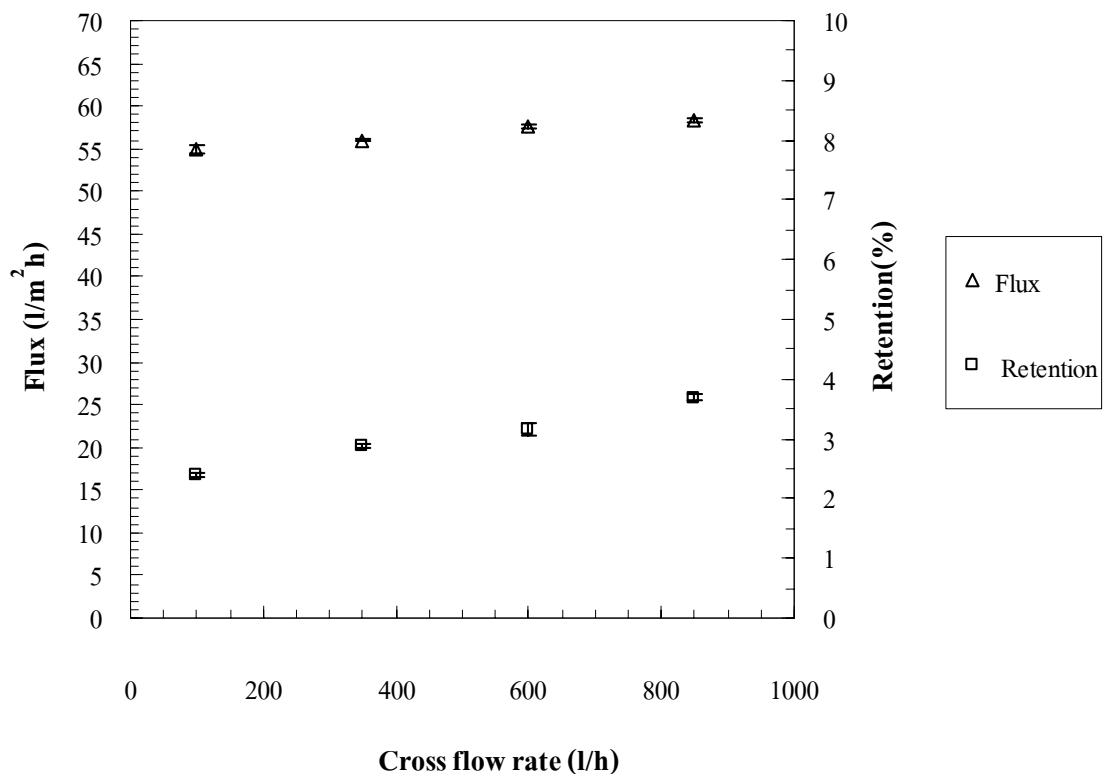
1.2 ผลของความเร็วตามขวางต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันNaCl

ภาพที่ 2-5 แสดงค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันNaCl ที่ความเร็วตามขวางแตกต่างกัน โดยใช้สารละลายNaCl ที่ความเข้มข้นร้อยละ5 (w/w) และความดันขับที่ 6 bar พบว่า เมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้นจาก 100 l/h เป็น 850 l/h ส่งผลให้ฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จาก 55.3 เป็น 58.6 l/m²h ตามลำดับ อันเนื่องมาจากเมื่อความเร็วตามขวางสูงขึ้น ส่งผลให้แรงเฉือนของรีเทนเททสูงขึ้นเป็นผลทำให้ตัวทำละลายกวาดอนุภาคของNaClออกจากผิวหน้าเมมเบรนเกิดการแพร่กลับของอนุภาคNaCl จากผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันออสโมติกของNaCl บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนลดลง ลดการยึดเกาะระหว่างเมมเบรนกับอนุภาคของNaClและยังมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น (mass transfer coefficient, k) (Nihal *et al*, 1998)

ผลของความเร็วตามขวางต่อค่าการกักกันNaClแสดงดังภาพที่ 2-5 พบว่าค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จาก 2.36 เป็น 3.63 เมื่อเพิ่มความเร็วตามขวางของสารป้อนจาก 100 l/h เป็น 850 l/h ตามลำดับ โดยสามารถอธิบายได้ว่ามีสาเหตุมาจากเมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงเฉือนของรีเทนเททบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้น ทำให้สามารถลดการสะสมของอนุภาคNaClบริเวณผิวหน้าเมมเบรนได้มากกว่าที่ความเร็วตามขวางต่ำๆ ส่งผลให้

เกิดคอนเซนเตรชันโพลารไรด์เซชันน้อยลงซึ่งเป็นผลทำให้ลดการแพร่ของNaClผ่านเมมเบรนให้น้อยลง (Koyuncu et al, 2003)

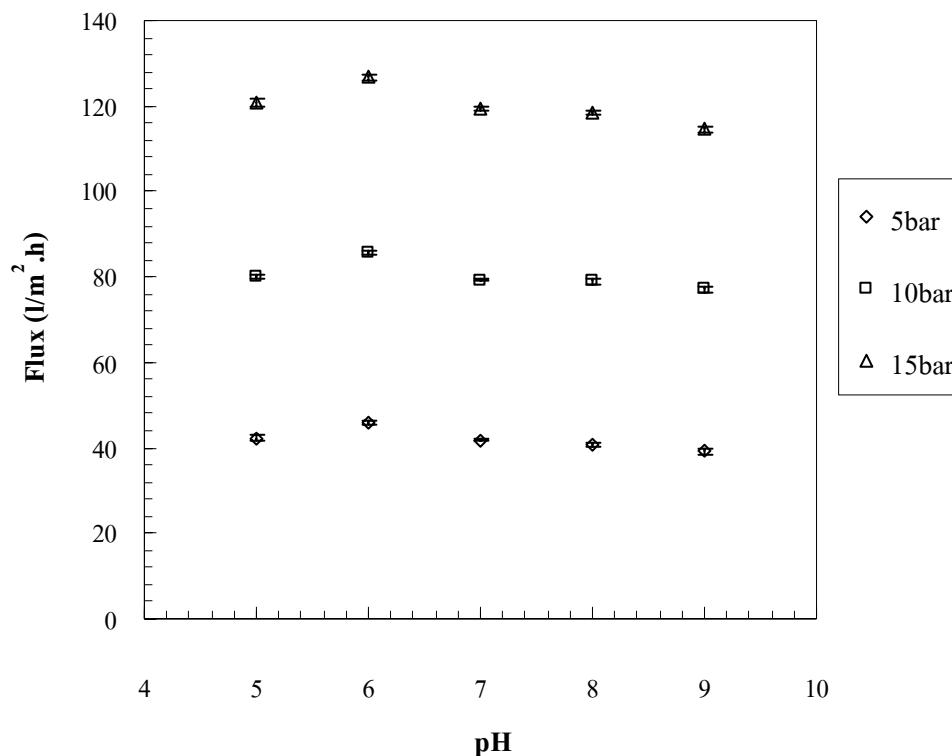
เช่นเดียวกับในรายงานของ Koyuncu และคณะ 2002 ที่ทำการศึกษาถึงผลของความเร็วดำเนินการต่อค่าการกักกันNaClและฟลักซ์ของเพอมีเอท โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaCl 1, 20 และ 80 g/l ตามลำดับ ที่ความดันขับและความเร็วดำเนินการแตกต่างกัน 8-24 bar และ 0.11-1.11 m/s พบว่าเมื่อความเร็วดำเนินการเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการลดลงของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลารไรด์เซชัน



ภาพที่ 2-5 ผลของความเร็วดำเนินการต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันNaCl ที่ความเข้มข้นของสารละลายNaClร้อยละ5 (w/w) ความดันขับ 6 bar ความเร็วดำเนินการ 500 l/h pH 7และอุณหภูมิ 28±3°C

Figure 2-5 Effect of cross flow velocity on permeate flux and retention of NaCl at concentration of 5% (w/w) NaCl solution TMP 6 bar cross flow velocity 500 l/h pH 7 and 28±3°C

1.3 ผลของ pH และความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันNaCl



ภาพที่ 2-6 ผลของ pH ของสารละลายNaCl และความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท ภายใต้สถานะความดันขับที่แตกต่างกันของสารละลายNaCl ร้อยละ5 (w/v) ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-6 Effect of pH of NaCl solution and TMP on permeate flux under different TMP of 5 % NaCl solution at cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 2-6 แสดงค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทที่ pH และความดันขับแตกต่างกันพบว่า ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่ามากที่สุดที่ pH = 6 ในทุกความดันขับ อันเนื่องมาจากที่ pH = 6 ค่าการกักกันNaClต่ำที่สุด มีผลทำให้แรงดันออสโมติกและคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันที่ pH นี้มีค่าต่ำสุด ส่งผลให้ผลต่างของความดันขับสุทธิที่ pH = 6 มีค่ามากที่สุด

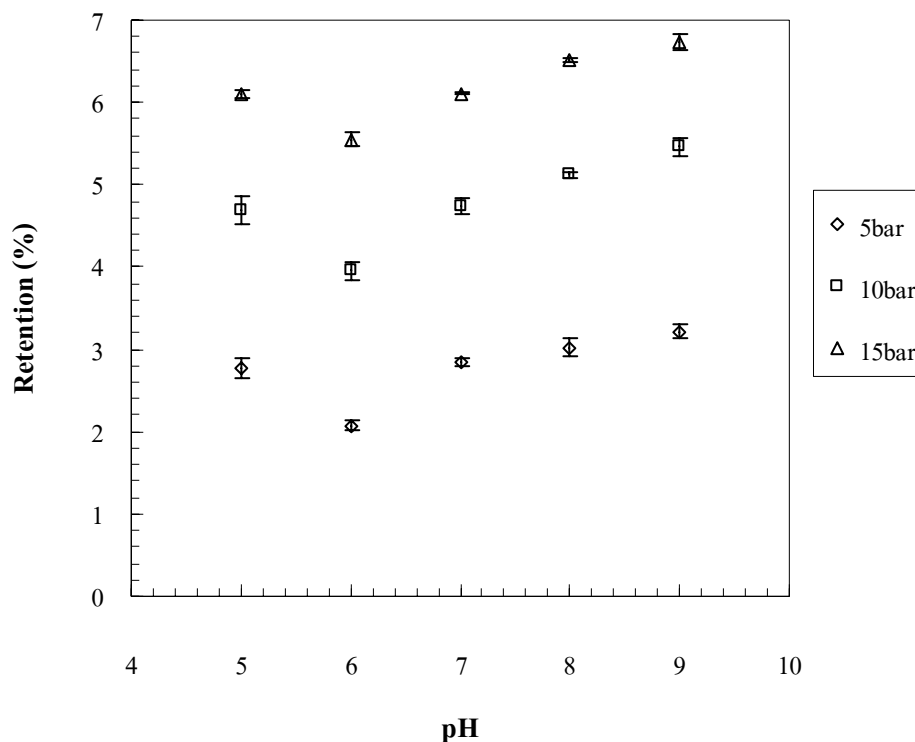
ภาพที่ 2-7 แสดงค่าการกักกันNaClที่ pH และความดันขับแตกต่างกัน ค่า pH ถูกปรับโดยการเติม HCl หรือ NaOH โดยควบคุมความเข้มข้นของสารละลายNaCl ที่ร้อยละ5 พบว่าค่าการกักกันNaCl ต่ำสุดที่ pH = 6 ที่ทุกความดันขับ แสดงว่า pH = 6 ประจุบนผิวหน้าของเมมเบรนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้ผิวหน้าของเมมเบรนมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าทำให้กลไกการคัดแยกขึ้น

อยู่กับผลของขนาดอนุภาคตัวถูกละลายกับขนาดรูพรุนของเมมเบรน (Gestel *et al*, 2002) Szoke และคณะ (2002) ได้กล่าวไว้ว่าที่ pH ใดก็ตามที่ค่าการกักกันมีค่าต่ำสุดที่ pH นั้นจะเป็นจุด pI ของเมมเบรน ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นี้มีความเป็นไปได้ว่าที่ pH = 6 เป็นจุด pI ของเมมเบรน

ที่ pH < 6 ค่าการกักกัน NaCl สามารถอธิบายได้จากผลของประจุบวกบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งจะผลัก Na^+ (co-ions) และเพื่อที่จะรักษาสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า (electroneutrality) จึงดูด Cl^- (counter-ions) ไว้ที่ผิวหน้าเมมเบรนทำให้ค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้น

ที่ pH > 6 บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนมีประจุเป็นลบเป็นสาเหตุทำให้ Cl^- (co-ions) ถูกผลักออก มีผลทำให้ค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้น (Ballet *et al*, 2004 ; Tsuru *et al*, 1998)

ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xu และ Lebrun (1999) ที่ทำการศึกษาถึงผลของ pH ของสารป้อนต่อค่าการกักกัน NaCl โดยใช้เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน (NF45, Filmtec)



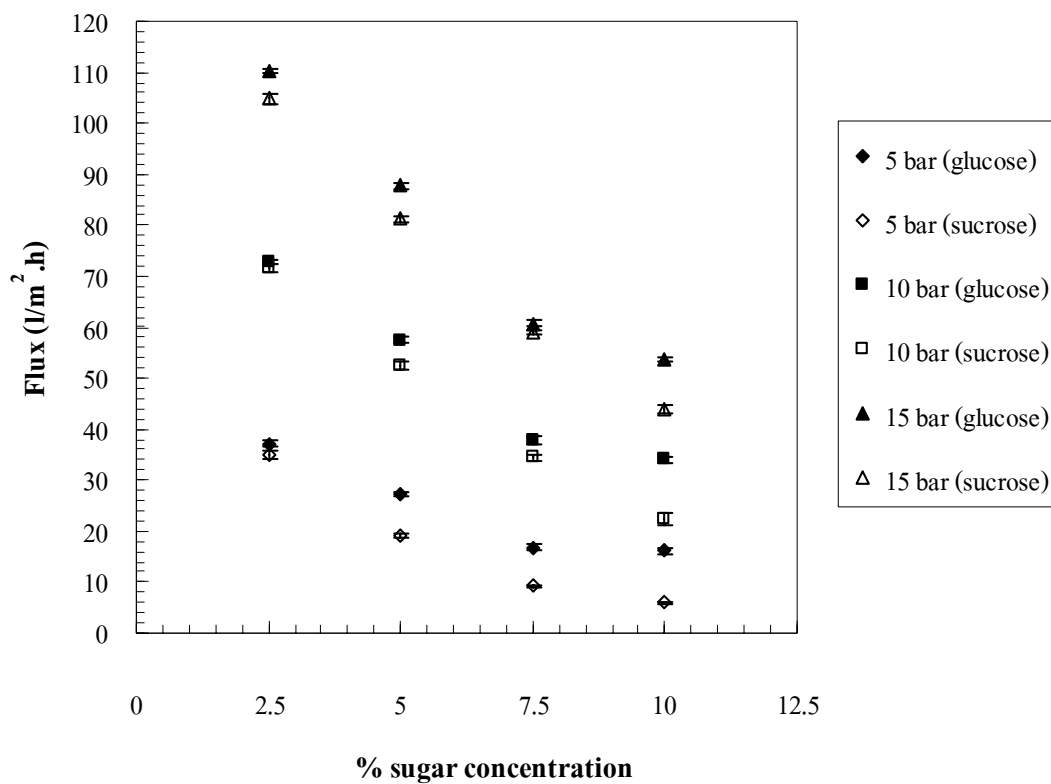
ภาพที่ 2-7 ผลของ pH ของสารละลาย NaCl และความดันขับต่อค่าการกักกัน NaCl ภายใต้สถานะความดันขับที่แตกต่างกันของสารละลาย NaCl ร้อยละ 5 (w/w) ที่ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ $28 \pm 3^\circ\text{C}$

Figure 2-7 Effect of pH of NaCl solution and TMP on retention of NaCl under different TMP of 5% NaCl (w/v) at cross flow velocity 500 l/h and $28 \pm 3^\circ\text{C}$

ในการกรองสารละลาย NaCl ที่ pH 3-10 พบว่าที่ pH = pI มีค่าการกักกัน NaCl ต่ำสุดและที่ pH > pI และ pH < pI จะมีค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้น

2. สารละลายน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครส

2.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครสและความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันของน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครส



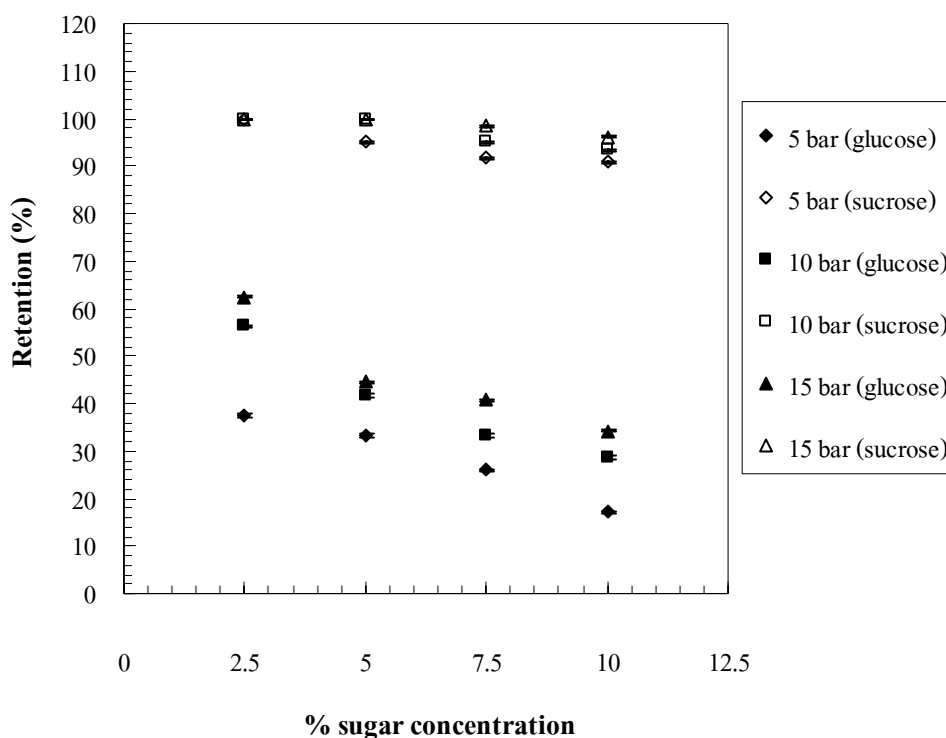
ภาพที่ 2-8 ผลของความเข้มข้นและความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของกลูโคสและซูโครส ภายใต้สภาวะ ความดันขับที่แตกต่างกัน ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 7 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-8 Effect of concentration and TMP on permeate flux of glucose or sucrose under different TMP at cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 2-8 แสดงค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสหรือซูโครสและความดันขับแตกต่างกัน พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลเพิ่มขึ้นทั้งน้ำตาลกลูโคสและซูโครส สิ่งนี้

เป็นผลมาจากความดันออสโมติกและความหนืดของน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ผลต่างของความดันขับสุทธิลดลง (Vellenga and Tragardh, 1998) และค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของน้ำตาลกลูโคสสูงกว่าน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลเท่ากัน (ร้อยละ 2.5-10) เนื่องจากค่าการกักกันของน้ำตาลซูโครสมากกว่าน้ำตาลกลูโคสเป็นผลให้ความดันออสโมติกและความหนืดมีค่าสูงกว่าทำให้ผลต่างของความดันขับสุทธิน้อยกว่า

ภาพที่ 2-9 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลและความดันขับต่อค่าการกักกันของน้ำตาลกลูโคสและซูโครส ภายใต้สภาวะความดันที่แตกต่างกัน ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสและกลูโคส ที่ใช้ในช่วงร้อยละ 2.5-10 (w/w) พบว่าค่าการกักกันของซูโครสอยู่ในช่วงร้อยละ 91-100 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในทุกความเข้มข้น เป็นผลมาจากน้ำตาลซูโครสมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรน ในขณะที่ค่าการกักกันของกลูโคสเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการส่งผ่านของตัวถูกละลายโดยการแพร่



ภาพที่ 2-9 ผลของความเข้มข้นและความดันขับต่อค่าการกักกันของกลูโคสและซูโครส ภายใต้สภาวะ ความดันขับที่แตกต่างกัน ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 7 และ อุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-9 Effect of concentration and TMP on retention of glucose or sucrose under different TMP at cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

(ความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลาย) เกิดขึ้นได้น้อยกว่าการพา (ความแตกต่างของความดันขับ) (Spiegler and Kedem, 1966) แต่เมื่อเทียบค่าการกักกันของน้ำตาลกลูโคสและซูโครส พบว่าค่าการกักกันของน้ำตาลกลูโคสน้อยกว่าของน้ำตาลซูโครสอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เป็นผลมาจากน้ำตาลกลูโคสมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าน้ำตาลซูโครส

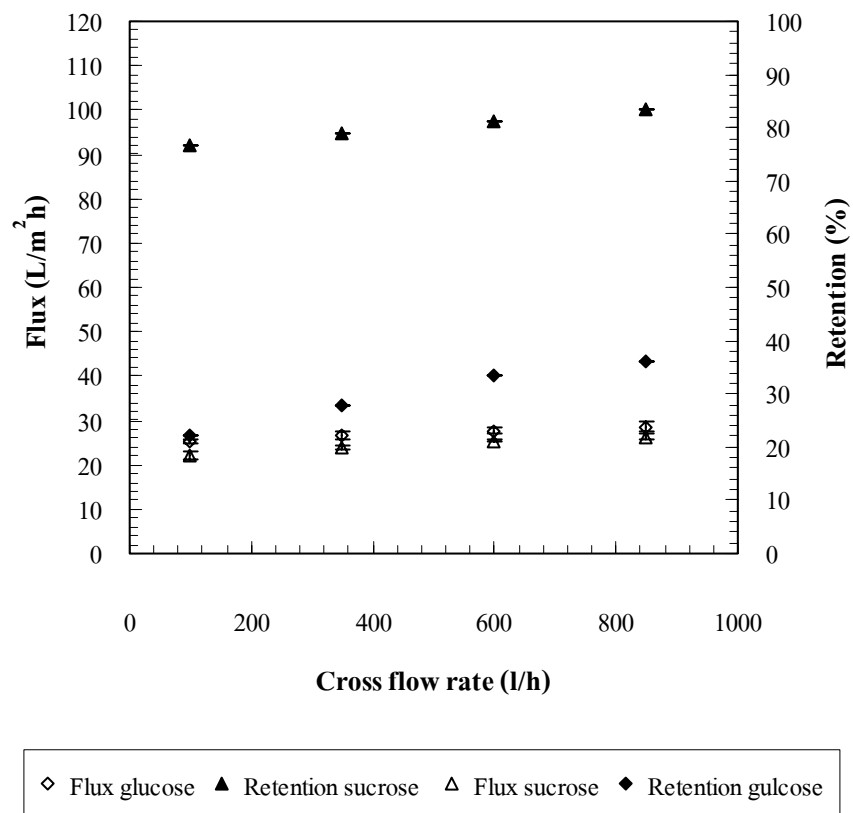
จากการทดลองหาค่าการกักกันของตัวถูกละลายที่เป็นกลางและน้ำหนักรวมของสารเพิ่มขึ้นคือ กลูโคส (180Da) และซูโครส (342 Da) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 (w/w) และความดันขับ 5 bar มีค่าการกักกันเป็นร้อยละ 37.50 และ 100 ตามลำดับ ทำให้สามารถประเมินค่า MWCO ของเมมเบรนได้ว่ามีค่าประมาณ 342 Da

ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Pontalier และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาถึงกลไกการแยกของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน โดยใช้เมมเบรนที่มีขนาด 400 Da (SK4BB90V2, Millpore) โดยการกรองสารละลายกลูโคสและแลคโตสที่มีความเข้มข้น 50 kg/m^3 ความเร็วตามขวาง 0.7 m/s ที่ความดันแตกต่างกัน พบว่าค่าการกักกันของแลคโตสเป็นร้อยละ 99 ในขณะที่กลูโคสเป็นร้อยละ 70

2.2 ผลของความเร็วมตามขวางต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันของน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครส

ภาพที่ 2-10 แสดงค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันของสารละลายน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครส พบว่าเมื่อความเร็วมตามขวางเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 850 l/h ค่าการกักกันของน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากร้อยละ 92.1 และ 22.2 เป็น 100 และ 36.1 ตามลำดับ เป็นผลมาจากเมื่อความเร็วมตามขวางเพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงเฉือนของรีเทนเททสูงขึ้นทำให้ลดการสะสมของอนุภาคของน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครสบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ส่งผลให้เกิดการแพร่กลับของอนุภาคน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครสมากขึ้นและการแพร่ของอนุภาคน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครสผ่านเมมเบรนลดลง อันเนื่องมาจากความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรนลดลง มีผลทำให้ค่าการกักกันของทั้งน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครสสูงขึ้น ซึ่งยังส่งผลต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทคือทำให้มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อันเนื่องมาจากความดันออสโมติกลดลง ส่งผลให้ความดันขับสุทธิของกระบวนการสูงขึ้น (Tsui and Cheryon, 2004)

ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Xu และคณะ (2005) ที่ทำการศึกษาผลของความเร็วมตามขวางต่อค่าการกักกันของน้ำตาล sorbitol, maltitol และ maltotriitol และค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท โดยควบคุมความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่ร้อยละ 12 (w/w) ที่ความดันขับ 0.4-1.5 MPa พบว่า เมื่อความเร็วมตามขวางเพิ่มขึ้นทำให้แรงเฉือนเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการกักกันของน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดและค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น

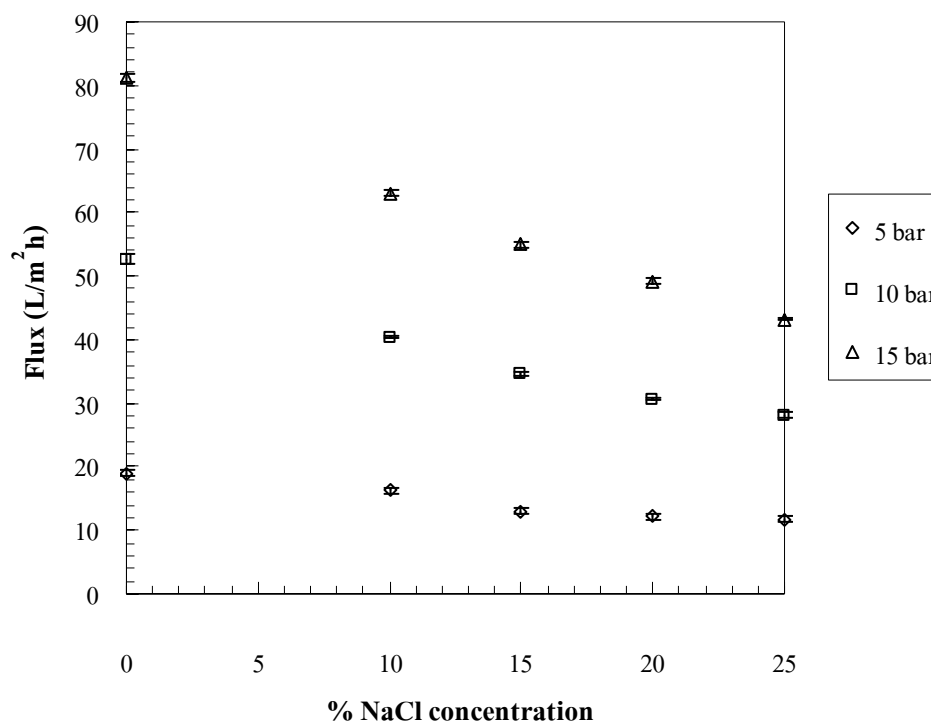


ภาพที่ 2-10 ผลของความเร็วตามขวางต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันของน้ำตาลซูโครสหรือกลูโคส ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5(w/v) ความดันขับ 6 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 7 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^\circ\text{C}$

Figure 2-10 Effect of cross flow velocity on permeate flux and retention of sucrose or glucose at concentration 5% (w/v) TMP 6 bar cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^\circ\text{C}$

3. สารละลายผสมระหว่างNaClกับน้ำตาลซูโครส

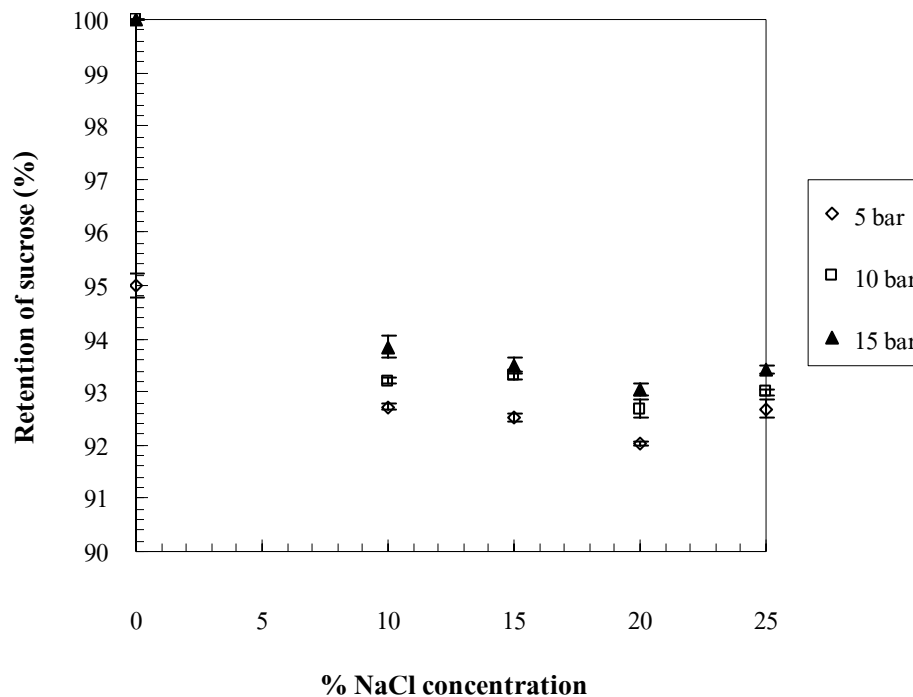
3.1 ผลของอันตรกิริยาระหว่างสารละลายNaClกับน้ำตาลซูโครสต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันNaClและซูโครส



ภาพที่ 2-11 ผลของความเข้มข้นของNaClในสารละลายผสมและความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของสารละลายผสม ภายใต้สภาวะ ความเข้มข้นของNaClที่แตกต่างกันที่ซูโครสร้อยละ 5 (w/v) ความเร็ว ตามขวาง 500 l/h pH 7 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-11 Effect of concentration of NaCl of mixture solution and TMP on permeate flux of mixture solution under different concentration of NaCl at 5% sucrose cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

ภาพที่ 2-11, 2-12 และ 2-13 แสดงค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันซูโครสและNaClของสารละลายผสม พบว่าเมื่อความเข้มข้นของNaClในสารละลายผสมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็น ร้อยละ 25 มีผลทำให้ความดันออสโมติกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อันเนื่องมาจากความดันขับสุทธิของกระบวนการลดลงแสดง ดังภาพที่ 2-11 และเมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของสารละลายผสมกับสารละลายNaClเพียงอย่างเดียว พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของสารละลายผสมมีค่าน้อยกว่าค่าฟลักซ์ของสารละลายNaClเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อันเนื่องมาจากสารละลายผสมมีความดันออสโมติกสูงกว่า



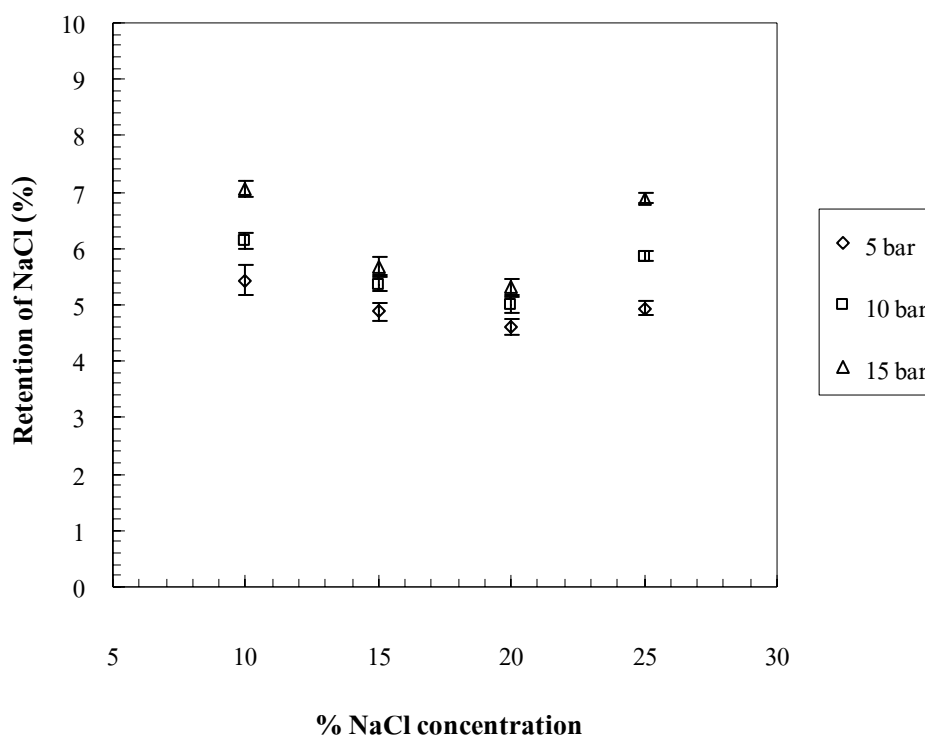
ภาพที่ 2-12 ผลของความเข้มข้นของ NaCl ในสารละลายผสมและความดันขับต่อค่าการกักกันซูโครส ภายใต้สภาวะ ความเข้มข้นของ NaCl ที่แตกต่างกันที่ซูโครสร้อยละ 5 (w/v) ความเร็ว ตามขวาง 500 l/h pH 7 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-12 Effect of concentration of NaCl of mixture solution and TMP on retention of sucrose under different concentration of NaCl at 5% sucrose cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

สารละลาย NaCl เพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้ผลต่างของแรงดันขับในกระบวนการของสารละลายผสม มีค่าน้อยกว่าแรงดันขับของสารละลาย NaCl เพียงอย่างเดียว

ภาพที่ 2-12 พบว่าค่าการกักกันของซูโครสของสารละลายผสมมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการกักกันของซูโครสเพียงอย่างเดียวอันเนื่องมาจากเมื่อเติม NaCl ลงไป มีผลทำให้ความหนืดของสารละลายผสมมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายผสมบริเวณผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ผลต่างของความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรนกับความเข้มข้นในส่วนของเพอมีเอทมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการส่งผ่านตัวถูกละลายโดยการแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการกักกันซูโครสลดลงและเมื่อเปรียบเทียบค่าการกักกันซูโครสของสารละลายผสมที่ความเข้มข้นของ NaCl เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 25 (w/v) พบว่าค่าการกักกันของซูโครสมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ภาพที่ 2-13 พบว่าค่าการกักกันของNaClมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อความเข้มข้นของNaClในสารละลายผสมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ10-20 (w/w) เป็นผลมาจากเมื่อความเข้มข้นของNaClเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านของNaClโดยการแพร่สูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นNaCl ในสารละลายผสมเพิ่มเป็นร้อยละ25 (w/w) ค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) มีผลมาจากเกิดการแพร่กลับของNaClไปยังส่วนbulk solution ได้เร็วกว่าการแพร่ผ่านเมมเบรน (Wang *et al*, 1995) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wang และ คณะ (2002) ที่ทำการศึกษาผลของค่าการกักกันNaClของสารละลายผสมระหว่างNaClกับน้ำตาลซูโครส โดยความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสคงที่ (200 g/m^3) และความเข้มข้นของNaClเป็นร้อยละ0, 0.01 และ 0.1 (w/v) พบว่าค่าการกักกันNaClลดลง เมื่อความเข้มข้นของNaClในสารละลายผสมเพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบค่าการกักกันNaClเพียงอย่างเดียวกับค่าการ



ภาพที่ 2-13 ผลของความเข้มข้นของNaClในสารละลายผสมและความดันขับต่อค่าการกักกัน NaCl ภายใต้สภาวะ ความเข้มข้นของNaClที่แตกต่างกันที่ซูโครสร้อยละ5 (w/v) ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 7 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^\circ\text{C}$

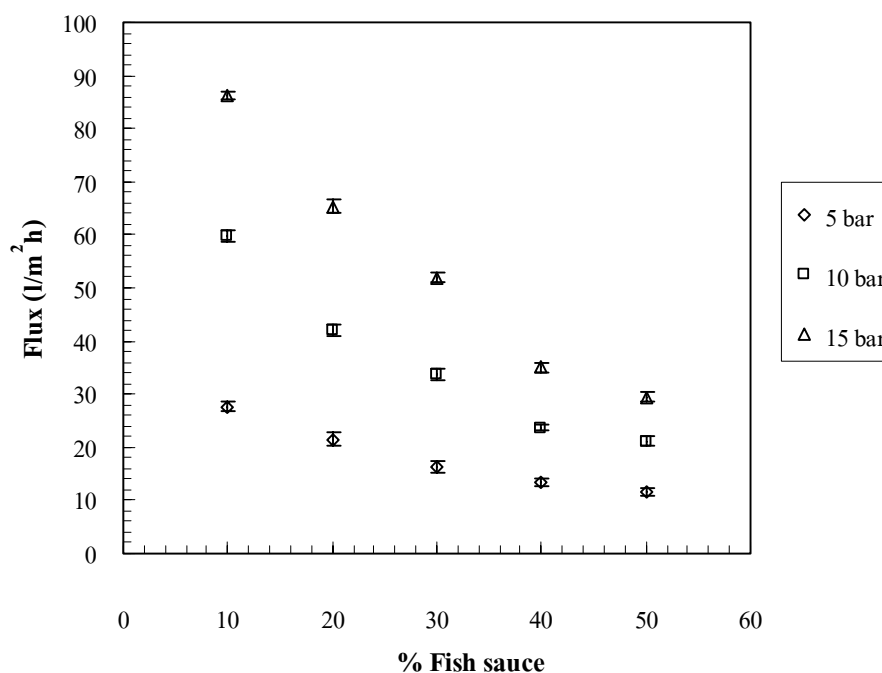
Figure 2-13 Effect of concentration of NaCl of mixture solution and TMP on retention of NaCl under different concentration of NaCl at 5% sucrose cross flow velocity 500 l/h pH 7 and $28 \pm 3^\circ\text{C}$

กักกันNaClของสารละลายผสม พบว่าค่าการกักกัน NaClของสารละลายผสมมีค่ามากกว่าค่าการกักกันของNaClเพียงอย่างเดียว (10-25% w/w) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อันเนื่องมาจากอนุภาคของน้ำตาลซูโครสมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรน ทำให้อนุภาคของน้ำตาลซูโครสไม่สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนมากขึ้น ทำให้ผลของประจุเมมเบรนมีอิทธิพลลดน้อยลง ส่งผลให้การแพร่ผ่านของตัวถูกละลายผ่านเมมเบรนได้น้อยลง (Vellenga and Tragardh, 1998)

4. น้ำปลาเจือจาง

4.1 ผลของระดับความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางและความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันโปรตีนและNaCl

น้ำปลาประกอบด้วยความเข้มข้นของNaClร้อยละ37 (w/v) pH 5.6 และโปรตีนร้อยละ12 (w/v) ซึ่งโปรตีนส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกรดอะมิโนอิสระและเปปไทด์ (Ijong and Ohta, 1996)



ภาพที่ 2-14 ผลของระดับของน้ำปลาเจือจางและความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท ภายใต้สถานะความดันขับที่แตกต่างกัน ที่ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 5.5 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-14 Effect of concentration of fish sauce and TMP on permeate flux under different TMP at cross flow velocity 500 l/h pH5.5 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

ภาพที่ 2-14 แสดงผลของระดับความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางและความดันขับต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เพอมีเอท พบว่าเมื่อความเข้มข้นของระดับน้ำปลาเจือจางเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็น ร้อยละ 50 ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทลดลงในทุกความดันขับอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เป็นผลมาจากเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นมีผลทำให้เกิดคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันและความดันออสโมติกเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ผลต่างของความดันขับสุทธิในระบบลดลง (Afonso and Borquez, 2002) ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการศึกษาความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (fouling) เมื่อกรองน้ำปลาที่มีระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2-1 พบว่าความต้านทานฟาวลิง R_{rf} และ R_{rf} ในแต่ละความเข้มข้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงของระดับน้ำปลาเจือจางร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 มีค่า R_{rf} เฉลี่ย 3.03×10^{13} , 4.83×10^{13} , 7.44×10^{13} , 11.56×10^{13} และ $16.12 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ และค่า R_{irf} เฉลี่ย 0.04×10^{13} , 0.45×10^{13} , 0.49×10^{13} , 0.51×10^{13} และ $0.52 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนเป็น กระบวนการที่ใช้ความดันและความเร็วตามขวางเป็นตัวขับเคลื่อนสารป้อน ส่งผลให้เกิดการพอกพูนภาคมาสะสมและก่อตัวเป็นชั้นเค้กที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น การเกิดความต้านทานแบบ R_{rf} ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ของเพอมีเอทและเป็นฟาวลิงที่เกิดบนผิวหน้าเมมเบรน มีการเกาะตัวระหว่างอนุภาคและเมมเบรน อย่างหลวมๆ จึงสามารถกำจัดออกได้ง่าย แต่ก็มีผลต่อการกักกันองค์ประกอบทางเคมีกายภาพได้ ในขณะที่ฟาวลิง R_{irf} เป็นปัญหาหลักในกระบวนการเมมเบรนและตัวเมมเบรนในระยะยาว เนื่องจากฟาวลิงทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์อย่างรวดเร็วและการทำความสะอาดต้องใช้สารเคมีในการกำจัด

ตารางที่ 2-1 ผลของระดับความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิง ที่ความดันขับเฉลี่ย ความเร็วตามขวาง 500 l/h อุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Table 2-1 Effect of concentration of fish sauce on membrane resistance and fouling resistance at means TMP, cross flow velocity 500 l/h, temperature $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Resistance (m^{-1}) $\times 10^{13}$	10%	20%	30%	40%	50%
R_m	4.42 ± 0.00	4.42 ± 0.00	4.42 ± 0.00	4.42 ± 0.00	4.42 ± 0.00
R_{irf}	0.04 ± 0.00^c	0.45 ± 0.00^d	0.49 ± 0.00^c	0.51 ± 0.00^b	0.52 ± 0.00^a
R_{rf}	3.03 ± 0.09^c	4.83 ± 0.08^d	7.44 ± 0.13^c	11.56 ± 0.28^b	15.12 ± 0.16^a

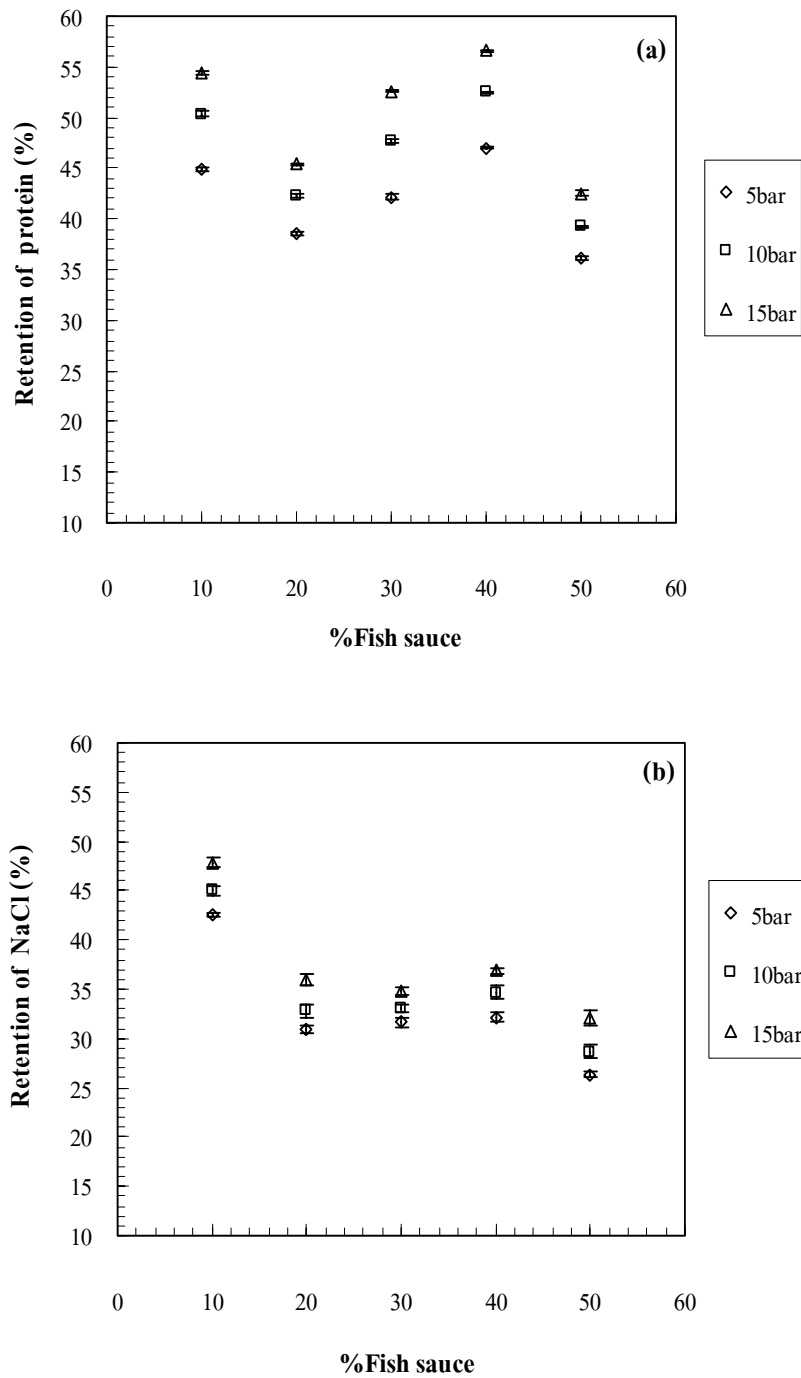
Note: ^{a-c}, Means within row with the same superscript are not significantly at $p > 0.05$

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางและความดันขับต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการกักกันโปรตีนและNaClแสดงดังภาพที่ 2-15 พบว่าค่าการกักกันของทั้งโปรตีนและNaCl มีแนวโน้มเหมือนกันคือที่ระดับของน้ำปลาเจือจางร้อยละ10-20 (v/v) จะมีค่าการกักกันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของระดับน้ำปลาเจือจางเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อนุภาคของNaClไปจับกับประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้น ส่งผลให้ความแรงของประจุของเมมเบรนลดลงทำให้เกิดการแพร่กลับของอนุภาคของโปรตีนและNaClไปยัง bulk solution น้อยลง เกิดการแพร่ผ่านของอนุภาคของโปรตีนและNaClผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าการกักกันลดลง (Afonso and Borquez, 2002; Li *et al*, 2003) ที่ความเข้มข้นของระดับน้ำปลาเจือจางร้อยละ20-40 (v/v) ค่าการกักกันของทั้งโปรตีนและNaClมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อันเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของระดับน้ำปลาเจือจางเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อนุภาคของโปรตีนและNaClสะสมบริเวณผิวหน้าเมมเบรนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการแพร่กลับไปยัง bulk solution มากกว่าการแพร่ผ่านของอนุภาคของโปรตีนและNaClผ่านเมมเบรนมีผลทำให้ค่าการกักกันโปรตีนและNaClเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระดับของน้ำปลาเจือจางเป็นร้อยละ25 (v/v) จะทำให้ค่าการกักกันโปรตีนและNaClลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เป็นเพราะเกิดการสะสมของอนุภาคของโปรตีนและNaClมากขึ้นมีผลทำให้เกิดคอนเซ็นเตรชันโพลาไรเซชันที่ผิวหน้าของเมมเบรนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการแพร่ผ่านของอนุภาคของโปรตีนและNaClผ่านเมมเบรนมากขึ้น (Groleau *et al*, 2004)

ผลของความดันขับและระดับของน้ำปลาเจือจางต่อค่าการกักกันของโปรตีนและNaCl มีผลในทำนองเดียวกันคือ เมื่อความดันขับเพิ่มขึ้น (5-15 bar) ค่าการกักกันของโปรตีนและNaClเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) มีผลมาจากเมื่อความดันขับเพิ่มขึ้นส่งผลให้การส่งผ่านของอนุภาคของโปรตีนและNaClโดยการพาสุงขึ้น ส่งผลให้การส่งผ่านของอนุภาคของโปรตีนและNaClโดยการแพร่ลดลงเนื่องจากเกิดการปั่นป่วนที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Timer และคณะ (1998) ที่ศึกษาการแยกกรดอะมิโนผสม (Glu, Lys และ Leu) ด้วยเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน (CA 960 และ NTR 7450) พบว่าเมื่อความดันขับเพิ่มขึ้นค่าการกักกันของกรดอะมิโนก็เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากกลไกการแยกโดยผลของประจุและขนาด

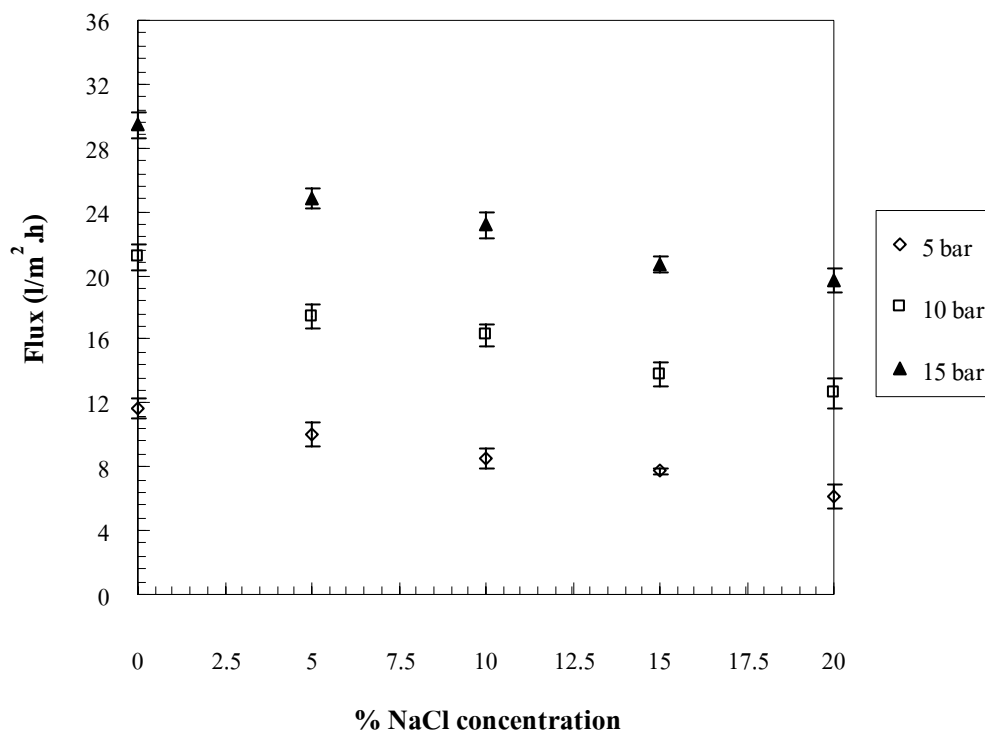
4.2 ผลของความเข้มข้นNaClที่เติมลงไปใต้น้ำปลาเจือจางและความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันโปรตีนและNaCl

ภาพที่ 2-16 แสดงผลของความเข้มข้นNaClที่เพิ่มขึ้นและความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท พบว่าเมื่อความเข้มข้นNaClเพิ่มขึ้น (ร้อยละ5-20 w/v) มีผลทำให้การสะสมของอนุภาคของโปรตีนและNaClบริเวณผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นทำให้ความดันออสโมติกและ



ภาพที่ 2-15 ผลของระดับของน้ำปลาเจือจางและความดันขับต่อค่าการกักกัน โปรตีน (a) NaCl (b) ภายใต้สภาวะ ความดันขับที่แตกต่างกัน ที่ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 5.5 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-15 Effect of concentration of fish sauce and TMP on retention of protein (a) NaCl (b) under different TMP at cross flow velocity 500 l/h pH 5.5 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 2-16 ผลของความเข้มข้นของ NaCl และความดันขับต่อฟลักซ์ของเพอมีเอท ภายใต้สภาวะความดันขับที่แตกต่างกัน ที่น้ำปลาร้อยละ 50(v/v) ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 5.5 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-16 Effect of concentration of NaCl and TMP on retention of protein (a) NaCl (b) under different TMP at 50% fish sauce cross flow velocity 500 l/h pH 5.5 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันมากขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทลดลงอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 50 v/v กับน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 50 v/v ที่เติม NaCl ลงไปอีกร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 20 w/v พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 50 v/v ที่เติม NaCl ลงไปมีค่าน้อยกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 50 v/v ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อันเนื่องมาจากสารละลายผสมมีความดันออสโมติกสูงกว่าสารละลาย NaCl เพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้ผลต่างของแรงดันขับสุทธิในกระบวนการของสารละลายผสมมีค่าน้อยกว่าแรงดันขับของสารละลาย NaCl เพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาความต้านทานของเมมเบรนและความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง แสดงดังตารางที่ 2-2 พบว่าความต้านทานฟาวลิง R_{irf} และ R_{rf} ในแต่ละความเข้มข้นของ NaCl มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงของระดับความเข้มข้น

ของNaCl ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 มีค่า R_{rf} เฉลี่ย 15.12×10^{13} , 23.54×10^{13} , 25.15×10^{13} , 28.67×10^{13} และ $30.15 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ และค่า R_{irf} เฉลี่ย 0.52×10^{13} , 0.80×10^{13} , 0.82×10^{13} , 0.89×10^{13} และ $0.95 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ

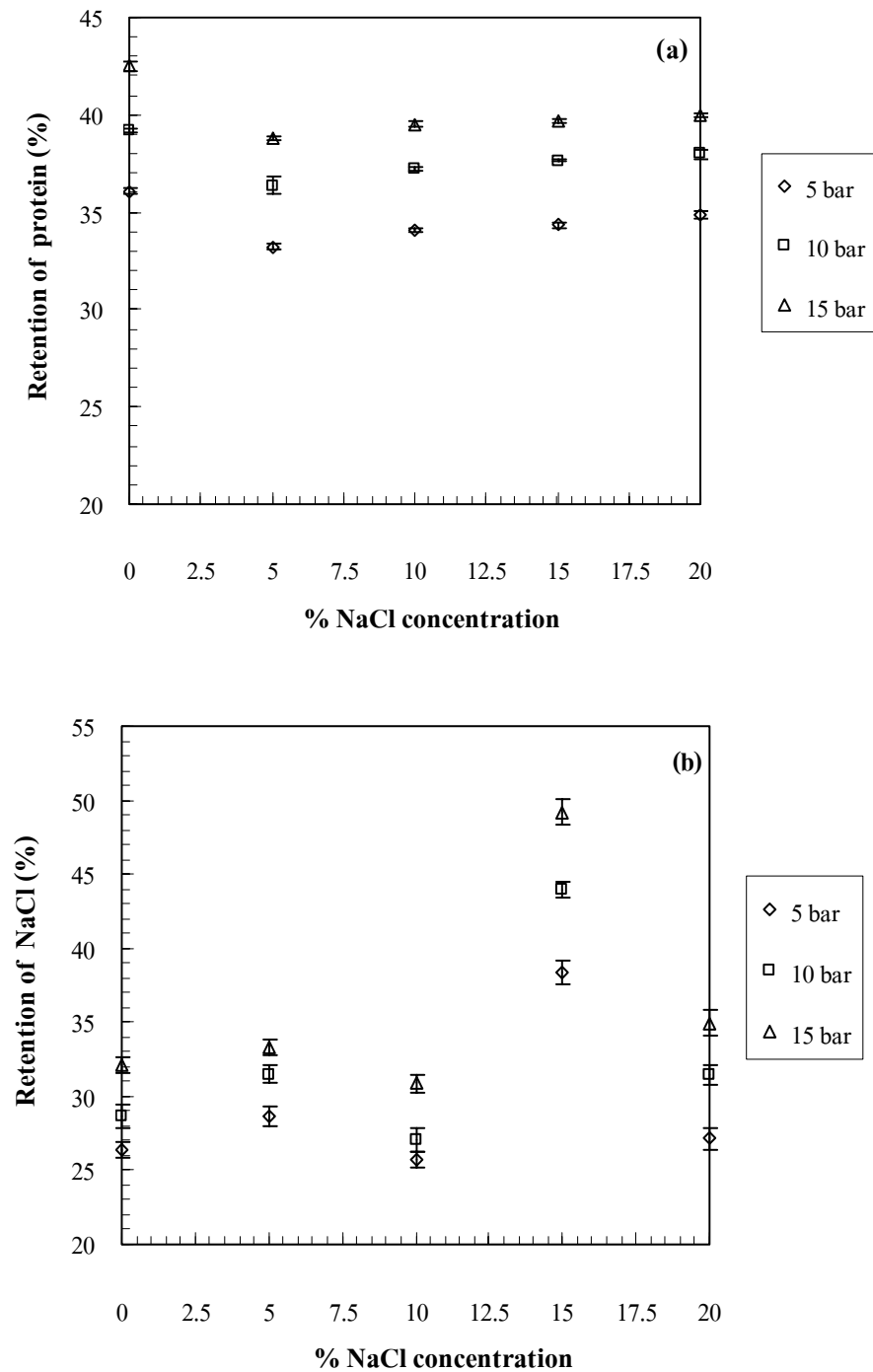
ตารางที่ 2-2 ผลของระดับความเข้มข้นของNaClต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและ
ความต้านทานฟาวลิง ที่น้ำปลาร้อยละ 50 ความดันขับเฉลี่ย ความเร็วตามขวาง
500 l/h อุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Table 2-2 Effect of concentration of NaCl on membrane resistance and fouling resistance at 50% fish sauce means TMP, cross flow velocity 500 l/h, temperature $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Resistance (m^{-1}) $\times 10^{13}$	0%	5%	10%	15%	20%
R_m	4.42 ± 0.00	4.42 ± 0.00	4.42 ± 0.00	4.42 ± 0.00	4.42 ± 0.00
R_{irf}	0.52 ± 0.00^c	0.80 ± 0.00^d	0.82 ± 0.00^c	0.89 ± 0.00^b	0.95 ± 0.00^a
R_{rf}	15.12 ± 0.16^c	23.54 ± 0.47^d	25.15 ± 0.28^c	28.67 ± 0.57^b	30.15 ± 0.06^a

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

ภาพที่ 2-17 แสดงผลของความเข้มข้นNaClที่เพิ่มขึ้นและความดันขับต่อค่าการกักกันของโปรตีนและNaCl ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางร้อยละ 50 (v/v) พบว่าค่าการกักกันโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อความเข้มข้นNaClที่เติมลงไปเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 5 - 20 w/v) อันเนื่องมาจากการเติมNaClลงไปมีผลทำให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างเมมเบรนกับโปรตีนและNaClน้อยลง เนื่องจาก Na^+ ไปปกคลุมบริเวณผิวหน้าเมมเบรนทำให้เมมเบรนมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่งผลให้กลไกการแยกโดยขนาดเข้ามามีผลมากขึ้น (Bardot *et al*, 1995) แสดงดังภาพที่ 2-17(a) และเมื่อเปรียบเทียบค่าการกักกันโปรตีนของน้ำปลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 v/v กับน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 50 v/v ที่เติมNaClลงไปอีกร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 20 w/v พบว่าค่าการกักกันโปรตีนของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 50 v/v มีค่ามากกว่าค่าการกักกันโปรตีนของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 50 v/v ที่มีการเติมNaClในทุกความเข้มข้นอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Grib และคณะ (2000) ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นNaClต่อค่าการกักกันของกรดอะมิโนด้วยเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันที่ทำมาจากอะโลมินา พบว่าเมื่อความเข้มข้นNaClเพิ่มขึ้นไม่ค่อยมีผลต่อค่าการกักกันของกรดอะมิโน ส่วนค่าการกักกันNaCl แสดงดังภาพที่ 2-17(b) พบว่าเมื่อความเข้มข้นNaClเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 5-10 w/v) ค่าการกักกันNaClลดลงอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจาก

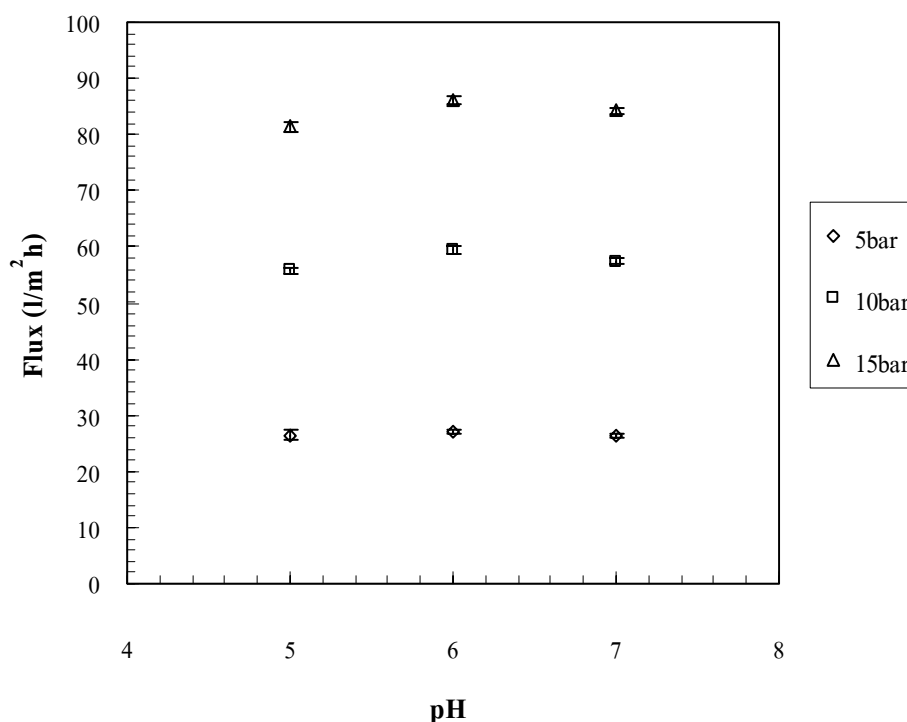


ภาพที่ 2-17 ผลของความเข้มข้นของ NaCl และความดันขับต่อค่าการกักกันโปรตีน (a) NaCl (b) ภายใต้สภาวะความดันขับที่แตกต่างกัน ที่น้ำปลาร้อยละ 50(v/v) ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 5.5 และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-17 Effect of concentration of NaCl and TMP on retention of protein (a) NaCl (b) under different TMP at 50% fish sauce cross flow velocity 500 l/h pH 5.5 and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้การแพร่ผ่านเมมเบรนของอนุภาคNaClเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของNaClเพิ่มขึ้น (ร้อยละ10-20 w/v) ค่าการกักกันNaClก็เพิ่มขึ้นอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เป็นผลมาจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการแพร่กลับของอนุภาคNaClไปยัง bulk solution ได้มากขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบค่าการกักกันNaClของน้ำปลาที่ความเข้มข้นร้อยละ50 v/v กับน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ50 v/v ที่เติมNaClลงไปอีกร้อยละ5 ถึง ร้อยละ20 w/v พบว่าค่าการกักกันNaClของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ50 v/v มีค่าน้อยกว่าค่าการกักกันของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ50 v/v ที่มีการเติมNaClในทุกความเข้มข้นอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.3 ผลของ pH และความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอเมอเทและค่าการกักกันโปรตีนและNaCl ของน้ำปลาเจือจาง



ภาพที่ 2-18 ผลของ pH และความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอเมอเท ภายใต้สภาวะความดันขับที่แตกต่างกัน ที่น้ำปลาร้อยละ 10 (v/v) ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-18 Effect of pH and TMP on permeate flux under different TMP at 10% fish sauce cross flow velocity 500 l/h and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 2-18 แสดงผลของ pH และความดันขับต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 10 v/v พบว่า ที่ pH = 6 ฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าสูงสุดในทุกความดันขับและมีค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิง R_{irf} และ R_{rf} มีค่าต่ำสุดแสดงดังตารางที่ 2-3 เป็นผลมาจากที่ pH = 6 มีค่าความดันออสโมติกต่ำสุดเมื่อเทียบกับที่ pH อื่นๆ ส่งผลให้ผลต่างของความดันขับสุทธิที่ pH นี้มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับ pH อื่นๆ

ตารางที่ 2-3 ผลของ pH ต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิง
ที่น้ำปลาร้อยละ 10 ความดันขับเฉลี่ย ความเร็วตามขวาง 500 l/h อุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

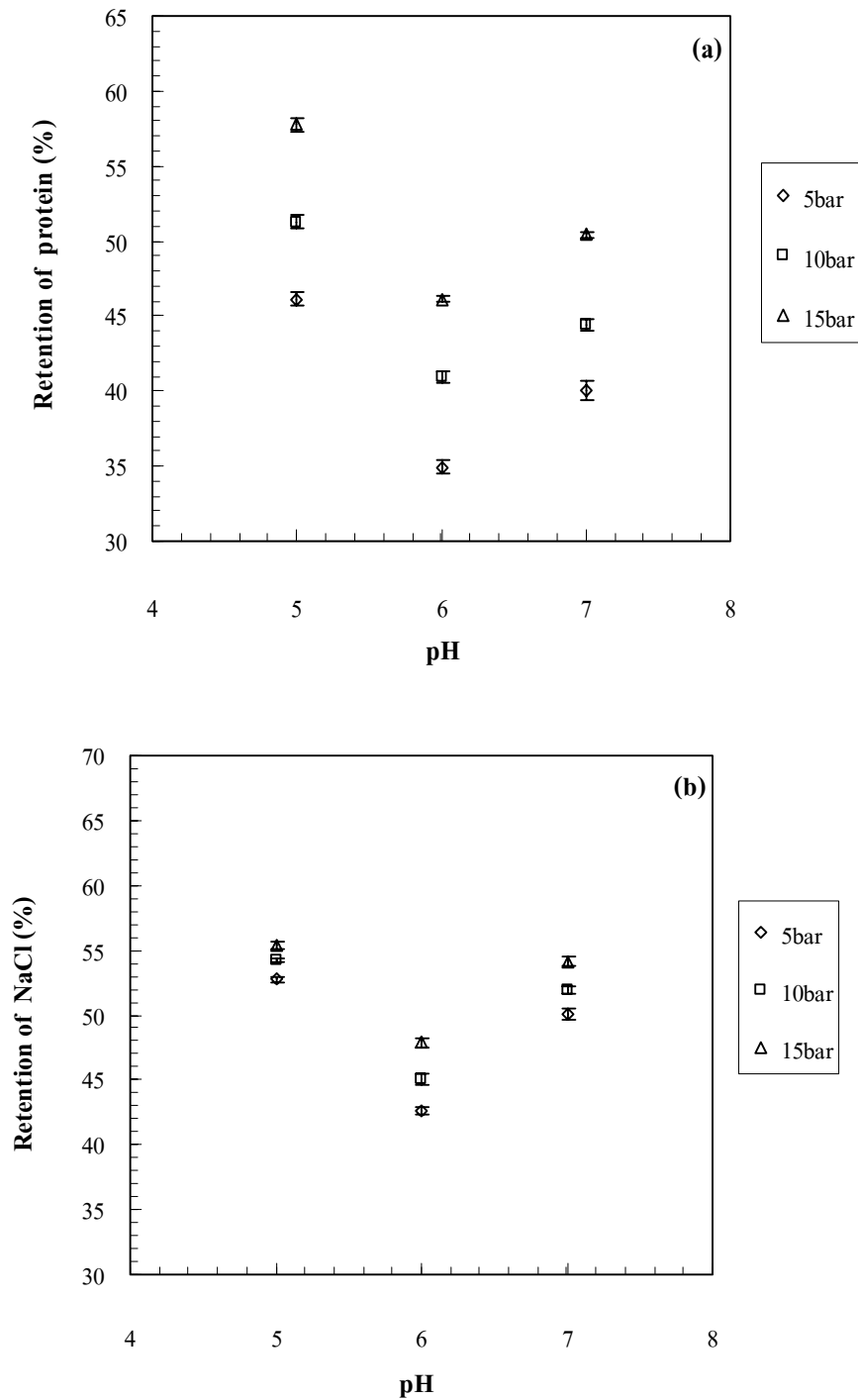
Table 2-3 Effect of pH on membrane resistance and fouling resistance at 10% fish sauce means TMP, cross flow velocity 500 l/h, temperature $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Resistance (m^{-1}) $\times 10^{13}$	pH 5	pH 6	pH 7
R_m	4.42 \pm 0.00	4.42 \pm 0.00	4.42 \pm 0.00
R_{irf}	0.14 \pm 0.00 ^a	0.04 \pm 0.00 ^c	0.12 \pm 0.00 ^b
R_{rf}	3.30 \pm 0.28 ^a	3.03 \pm 0.57 ^b	3.07 \pm 0.06 ^b

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

ภาพที่ 2-19 แสดงผลของ pH และความดันขับต่อค่าการกักกัน โปรตีนและ NaCl ของน้ำปลาเข้มข้นร้อยละ 10 v/v พบว่า ที่ pH = 6 ค่าการกักกัน โปรตีนและ NaCl มีค่าน้อยที่สุดเป็นผลมาจากที่ pH = 6 ค่า pH = pI มีผลทำให้เมมเบรนมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า กลไกการกักกันตัวถูกละลายเป็นผลของขนาดรูพรุนของเมมเบรนและขนาดของตัวถูกละลาย ส่วนที่ pH = 5 และ pH = 7 บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนมีประจุเป็นบวกและลบ ตามลำดับซึ่งส่งผลให้กลไกการกักกัน โปรตีนและ NaCl มาจากผลของประจุและขนาดส่งผลให้ค่าการกักกันเพิ่มขึ้น (Lapointe *et al*, 2003)

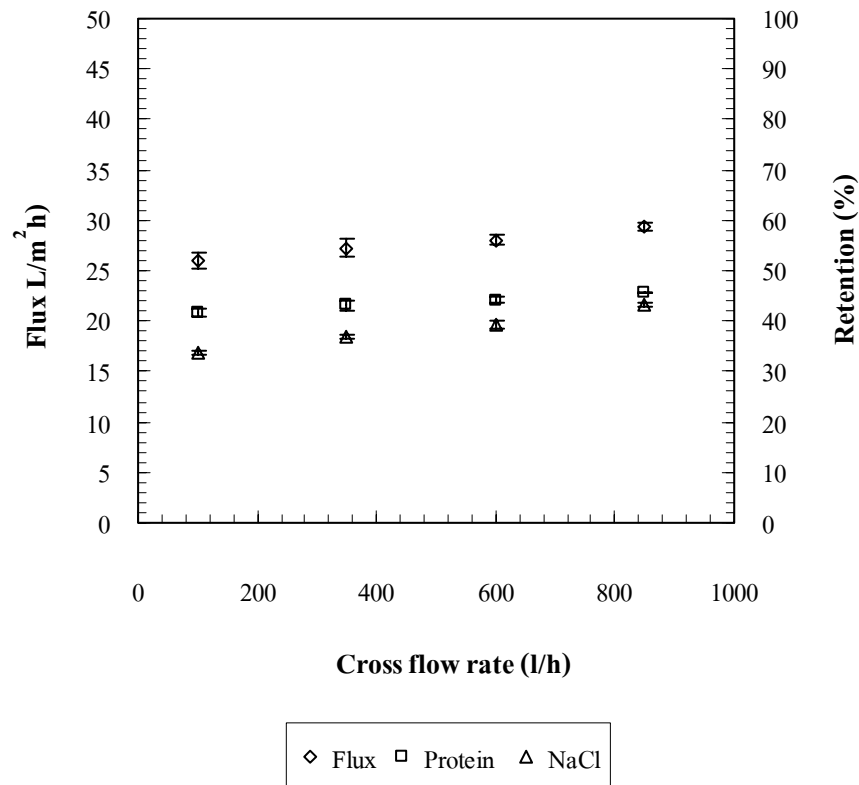
Tsuru และคณะ (1994) ทำการศึกษาผลของ pH ต่อการแยกกรดอะมิโนและเปปไทด์ด้วยเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน (UTC-20 และ 60) พบว่าที่ pH = pI กลไกการแยกจะขึ้นอยู่กับผลของขนาดเพียงอย่างเดียว แต่ที่ pH > pI และ pH < pI กลไกการแยกเป็นผลมาจากทั้งผลของประจุและขนาดของเมมเบรนและตัวถูกละลาย



ภาพที่ 2-19 ผลของ pH และความดันขับต่อค่าการกักกันโปรตีน (a)NaCl (b)ภายใต้สภาวะความดันขับที่แตกต่างกัน ที่น้ำปลาร้อยละ 10(v/v) ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 2-19 Effect of pH and TMP on retention of protein (a) NaCl (b) under different TMP at 10% fish sauce cross flow velocity 500 l/h and $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

4.4 ผลของความเร็วตามขวางต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันโปรตีนและNaClของน้ำปลาเจือจาง



ภาพที่ 2-20 ผลของความเร็วตามขวางต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกัน โปรตีนและ NaCl ที่น้ำปลาร้อยละ 10(v/v) ความดันขับ 6 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h pH 5.5และอุณหภูมิ 28±3°C

Figure 2-20 Effect of cross flow velocity on permeate flux and retention of protein and NaCl at 10% fish sauce TMP 6 bar cross flow velocity 500 l/h pH 7 and 28±3°C

จากภาพที่ 2-20 พบว่าเมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้นจาก 100 l/h เป็น 850 l/h มีผลทำให้ค่าการกักกัน โปรตีนและNaClเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องมาจากเมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงเฉือนของรีเทนเททที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถลดการสะสมของอนุภาคโปรตีนและNaClที่ผิวหน้าเมมเบรนให้น้อยลงเป็นผลให้การแพร่กลับของอนุภาคโปรตีนและNaClไปยัง bulk solution เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการกักกันโปรตีนและNaClเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 61.4 และ 33.7 เป็น 71.8 และ 43.3 ตามลำดับและความเร็วตามขวางที่เพิ่มขึ้นนี้ ยังส่งผลให้ความดันออสโมติกที่ผิวหน้าเมมเบรนลดลงทำให้ฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้นจาก 36.1 เป็น 39.1 l/m²/h

(Ismail and Hassan, 2006) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yunoki และคณะ (2002) ให้ความเห็นว่าการเพิ่มความเร็วดำเนินการในการดำเนินการกรองสามารถช่วยลดการสะสมของตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าเมมเบรน เนื่องจากการเพิ่มความเร็วดำเนินการมีผลทำให้แรงเฉือนที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาผลของความเร็วดำเนินการต่อความต้านทานเนื่องจากฟาวลิงในกระบวนการกรองน้ำปลาเจือจางด้วยเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน ที่ความเร็วดำเนินการ 100, 350, 600 และ 850 l/m²h สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-4 พบว่าที่ความเร็วดำเนินการสูงขึ้นมีผลทำให้ความต้านทาน ฟาวลิง R_{irf} และ R_{rf} ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2-4 ผลของความเร็วดำเนินการต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิงที่น้ำปลาร้อยละ 10 ความดันขับเฉลี่ย ความเร็วดำเนินการ 500 l/h อุณหภูมิ $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Table 2-4 Effect of cross flow velocity on membrane resistance and fouling resistance at 10% fish sauce means TMP, cross flow velocity 500 l/h, temperature $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Resistance (m ⁻¹) x 10 ¹³	100 l/m ² h	350 l/m ² h	600 l/m ² h	850 l/m ² h
R_m	4.42±0.00	4.42±0.00	4.42±0.00	4.42±0.00
R_{irf}	0.42±0.00 ^a	0.28±0.00 ^b	0.19 ±0.00 ^c	0.13±0.00 ^d
R_{rf}	5.30±0.18 ^a	5.20 ±0.00 ^b	5.00 ±0.00 ^c	4.85±0.00 ^d

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

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายกับตัวถูกละลายและสถานะในการดำเนินงานต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์เพอมีเอท ค่าการกักกันตัวถูกละลายและความต้านทานฟาวลิงที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สารละลาย NaCl

- เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 เป็น 20 (w/v) ค่าการกักกัน NaCl ลดลงเนื่องจากเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 (w/v) ค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการแพร่กลับได้เพิ่มขึ้น

และค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายNaClเพิ่มขึ้นร้อยละ5 เป็น 25 (w/v) เนื่องจากแรงดันออสโมติกเพิ่มขึ้น

- ค่าการกักกันNaClมีค่าต่ำสุดที่ pH = 6 ซึ่งเป็น pI เมมเบรน แต่เมื่อ pH > 6 และ pH < 6 ค่าการกักกันNaClมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผิวหน้าของเมมเบรนมีประจุและค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่ามากที่สุดที่ pH = 6 เนื่องจากแรงดันออสโมติกต่ำที่สุด

- เมื่อความเร็วตามขวางของสารป้อนเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 850 l/h มีผลทำให้ค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นและค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วตามขวางของสารป้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันออสโมติกลดลง

2. สารละลายน้ำตาลซูโครสและกลูโคส

- ค่าการกักกันของสารละลายซูโครสมีค่ามากกว่าร้อยละ90 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ถึง 10 ส่วนค่าการกักกันของสารละลายกลูโคสมีค่ามากกว่าร้อยละ18 ที่ความเข้มข้นร้อยละ2.5 ถึง 10 เนื่องจาก MWCO ของเมมเบรนมีค่าประมาณ 342 Da และค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายNaClเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันออสโมติกเพิ่มขึ้น

- เมื่อความเร็วตามขวางของสารป้อนเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 850 l/h มีผลทำให้ค่าการกักกันสารละลายน้ำตาลซูโครสและกลูโคสเนื่องจากแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนและค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วตามขวางของสารป้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันออสโมติกลดลง

3. สารละลายผสมระหว่างNaClกับน้ำตาลซูโครส

- เมื่อความเข้มข้นของสารละลายNaClเพิ่มขึ้นจากร้อยละ10เป็น 20 (w/v) ค่าการกักกันNaClมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายNaClเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ25 (w/v) ค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการแพร่กลับได้เพิ่มขึ้น ส่วนผลของความเข้มข้นของสารละลายNaClที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ10เป็น 25 (w/v) ไม่มีผลต่อค่าการกักกันซูโครสเนื่องจากเป็นผลของการคัดแยกโดยขนาด ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายNaClเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันออสโมติกเพิ่มขึ้น

4. น้ำปลาเจือจาง

- เมื่อความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางเพิ่มขึ้นจากร้อยละ10เป็น 20 (v/v) ค่าการกักกันของโปรตีนและNaClมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางเพิ่มขึ้นจากร้อยละ20เป็น30 (v/v) ค่าการกักกันของโปรตีนและNaClมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการแพร่กลับเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ50 (v/v) ค่าการกักกันของโปรตีนและNaClมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของน้ำปลาเจือจางเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันออสโมติกเพิ่มขึ้น

- เมื่อความเข้มข้นของNaClที่เติมลงในน้ำปลาเจือจางร้อยละ50 (v/v) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ5 เป็น 20 (w/v) ค่าการกักกันโปรตีนเพิ่มขึ้นเนื่องจากNaClไปบดบังประจุเมมเบรน ส่วนค่าการกักกันNaClลดลง เมื่อความเข้มข้นของNaClที่เติมลงไปเพิ่มขึ้นจากร้อยละ5 เป็น 10 (w/v) เนื่องจากเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนมากขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของNaClที่เติมลงไปเพิ่มขึ้นจากร้อยละ10 เป็น 20 (w/v) ค่าการกักกันNaClเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการแพร่กลับเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของNaClที่เติมลงไปเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันออสโมติกเพิ่มขึ้น ฟาวลิ่ง R_{if} และ R_r มีค่าเพิ่มขึ้น

- ค่าการกักกันโปรตีนและNaClของน้ำปลาเจือจางต่ำสุดที่ pH = 6 แต่เมื่อ pH > 6 และ pH < 6 ค่าการกักกันโปรตีนและNaClมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผิวหน้าของเมมเบรนมีประจุ ส่วนค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่ามากที่สุดที่ pH = 6 เนื่องจากแรงดันออสโมติกต่ำที่สุดและค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่ง R_{if} และ R_r มีค่าต่ำที่สุด

- เมื่อความเร็วตามขวางของสารป้อนเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 850 l/h มีผลทำให้ค่าการกักกันโปรตีนและNaClเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น ส่วนค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วตามขวางของสารป้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดันออสโมติกลดลงและค่าความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่ง R_{if} และ R_r มีค่าลดลง

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2000. Official Methods of Analytical Chemists. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists. Verginia.
- Afonso, M.D. and Borquez, R. 2002. Nanofiltration of wastewaters from the fish meal industry. *Desalination*. 151 : 131-138.
- Alkhatim, H.S., Alcaina, M.I., Soriano, E., Iborra, M.I., Lora, J. and Arnal, J. 1998. Treatment of whey effluents from dairy industries by nanofiltration membranes. *Desalination*. 119 : 177-184.
- Ballet, T.G., Gzara, L., Hafiane, A. and Dhahbi, M. 2004. Transport coefficients and cadmium salt rejection in nanofiltration membrane. *Desalination*. 167 : 369-376.
- Bardot, C. Gaubert, E. and Yaroshchuk, A.E. 1995. Unusual mutual influence of electrolytes during pressure-driven transport of their mixtures across charged porous membranes. *J. Membr. Sci.* 103 : 11.
- Bowen, W.R., Mohammed, A.W. and Hilal, N. 1997. Characterisation of nanofiltration membranes for predictive purposes-use of salts, uncharged solutes and atomic force microscopy. *J.Membr.Sci.* 126 : 91-105.
- Ducom, G. and Cabassud, C. 1999. Interests and limitation of nanofiltration for the removal of voltaic organic compounds in drinking water production. *Desalination*. 124 : 115-123.
- Gestel, T.V., Vandecasteele, C., Buekenhouat, A., Dotremont C., Luyten, J., Leysen, R., Bruggen, B.V. and Maes, G. 2002. Salt retention in nanofiltration with multilayer ceramic TiO₂ membranes. *J. Membr. Sci.* 209 : 379-389.
- Grib, H., Persin, M., Gavach, C., Piron, D.L., Sandeaux, J. and Mameri, N. 2000. Amino acid retention with alumina γ nanofiltration membrane. *J. Membr. Sci.* 172 : 9-17.
- Groleau, E.P., Lapointe, F.J., Gauthier, F.S. and Pouliot, Y. 2004. Effect of aggregating peptides on the fractionation of β -LG tryptic hydrolysate by nanofiltration membrane. *J. Membr. Sci.* 234 : 121-129..
- Hilal, N., Al-Zoubi, H., Mohammad, A.W. and Darwish, N.A. 2005. Nanofiltration of highly concentrated salt solutions up to sea water salinity. *Desalination*. 184 : 315-326.

- Ijong, F., G. and Ohta, Y. 1996. Physicochemical and microbiological changes associated with Bakasang processing – A traditional Indonesian fermented fish sauce. *Sci. Food Agric.* 71 : 69-74.
- Ismail, A.F. and Hassan, A.R. 2006. Formation and characterization of asymmetric nanofiltration membrane: Effect of shear rate and polymer concentration. *J. Membr. Sci.* 270 : 57-72.
- Jiratananon, R., Sungpet, A. and Luangsowan, P. 2000. Performance evaluation of nanofiltration membranes for treatment of effluents containing reactive dye and salt. *Desalination.* 130 : 177-183.
- Koyuncu, I. 2002. Reactive dye removal in dye/salt mixtures by nanofiltration membranes containing vinylsulphone dyes: Effects of feed concentration and cross flow velocity. *Desalination.* 143 : 243-253.
- Koyuncu, I. and Topacik, D. 2003. Effects of operating conditions on the salt rejection of nanofiltration membranes in reactive dye/salt mixtures. *Sep. Purif. Technol.* 33 : 283-294.
- Li, S.L., Li, C., Liu, Y.S. Wang, X.L. and Cao, Z.A. 2003. Separation of L-glutamine from fermentation broth by nanofiltration. *J. Membr. Sci.* 222 : 191-201.
- Lapointe, J.F., Gauthier, S.F., Pouliot, Y. and Bouchard, C. 2003. Effect of hydrodynamic conditions on fractionation of β -lactoglobulin tryptic peptides using nanofiltration membranes. *J. Membr. Sci.* 212 : 55-67.
- Matsubara, K., Iwasaki, K., Nakajima, M. Nabetani, H. and Nakao, S. 1996. Recovery of oligosaccharides from steamed soybean waste water in tofu processing by reverse nanofiltration membranes. *Biosci. Biotech. Biochem.* 60 : 421-428.
- Nawak, M.K., Korbutowicz, K.M. and Winnicki, T. 1996. Salt effect on the dye separation by hydrophilic membranes. *Desalination.* 120 : 221-229.
- Nihal, A., Turker, G. and Levent, Y. 1998. Effect of Operating Parameters on the Separation of Sugars by Nanofiltration. *Sep. Sci. Technol.* 33 : 1767-1785.
- Nystrom, M., Kaipia, L. and Luque, S. 1995. Fouling and retention of nanofiltration membranes. *J. Membr. Sci.* 98 : 249-262.
- Perry, M. and Linder, C. 1989. Intermediate Reverse osmosis ultrafiltration (RO UF) membrane for concentration and desalting of low molecular weight organic solutes. *Desalination.* 71 : 233-245.

- Pontalier, P.Y., Ismail, A. and Ghoul, M. 1997. Mechanisms for the selective rejection of solutes in nanofiltration membranes. *Sep.Purif.Technol.* 12 : 175-181.
- Raman, L.P., Cheryan, M. and Rajagopalan, N. 1994. Consider nanofiltration for membrane separations. *Chem.Eng. Progress.* 90 : 68-74.
- Schaep, J., Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C. and Wilms, D. 1998. Retention mechanisms in nanofiltration. in L. Pawlowski, Gonzales, M.A., Dudzinska, M.R. and Lacy, W.J. (Eds.), *XI Chemistry for Protection of the Environment, Environmental Science Research series*, Plenum Press, New York, p. 177-126.
- Schaep, J., Vandecasteele, C., Peeters, B., Luyten, J., Dotremont, C. and Roels, D. 1999. Characteristics and retention properties of a mesoporous γ - Al_2O_3 membrane for nanofiltration. *J.Membr. Sci.* 163 : 229-237.
- Schaep, J., Vandecasteele, C., Mohammad, A.W., Bowen, W.R. 1999. Analysis of the Salt Retention of Nanofiltration Membranes Using the Donnan-Stric Partitioning Pore Model. *Sep. Sci. Technol.* 34 : 3009-3030.
- Spiegler, K.S. and Kedem, O. 1966. Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis): criteria for efficient membranes. *Desalination.* 1 : 311.
- Szoke, S., Patzay, G. and Weiser, L. 2002. Characteristics of thin-film nanofiltration membranes at various pH-values. *Desalination.* 151 : 123-129.
- Timmer, J.M.K., Speelmans, M.P.J. and van der Horst, H.C. 1998. Separation of amino acids by nanofiltration and ultrafiltration membranes. *Sep. Purif. Technol.* 14 : 133-144.
- Tsui, E.M. and Cheryan, M. 2004. Characteristics of nanofiltration membranes in aqueous ethanol. *J. Membr. Sci.* 237 : 61-69.
- Tsuru, T., Shutou, T., Nakao, S.I. and Kimura, S. 1994. Peptide and amino acid separation with nanofiltration membranes. *Sep. Sci. Technol.* 29 : 971-984.
- Tsuru, T., Takezoe, H. and Asaeda, M. 1998. Ion separation by porous silica-zirconia nanofiltration membranes. *AICHE J.* 44 : 765-768.
- Vellenga, E. and Tragardh, G. 1998. Nanofiltration of combined salt and sugar solution : coupling between retention. *Desalination.* 120 : 211-20.
- Wang, X.L., Tsuru, T., Togoh, M., Nakao, S. and Kimura, S. 1995. Evaluation of pore structure and electrical properties of nanofiltration membranes. *J. Chem.Eng.Jpn.* 28 : 186- 192.

- Wang, X.L., Zhang, C. and Ouyang, P. 2002. The possibility of separating saccharides from a NaCl solution by using nanofiltration in diafiltration mode. *J.Membr. Sci.* 204 : 271-281.
- Xu, Y. and Lebrun, R.E. 1999. Comparison of nanofiltration properties of two membranes using electrolyte and non-electrolyte solute. *Desalination*. 122 : 95-106.
- Xu, Y. and Lebrun, R.E. 1999. Investigation of the solute separation by charged nanofiltration membrane : effect of pH, ionic strength and solute type. *J.Membr. Sci.* 158: 93-104.
- Xu, L., Wang, S. and Zeng, X. 2005. The maltol purification and concentration by nanofiltration. *Desalination*. 184 : 295-303.
- Yunoki, H., Nagata, K., Kokubo, K.I., Ito, A. and Watanabe, A., 2002. Effects of the mixture ratio of amino acid and sodium chloride on the rejection of nanofiltration membranes under various operating conditions. *J. Chem. Eng.Jpn.* 35 : 76-82.