

### บทที่ 3

## ผลของรูปแบบการดำเนินการต่อการแยกNaClออกจากน้ำปลาด้วยกระบวนการ ไดอะฟิลเตรชันโดยใช้เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน

### บทนำสั้นเรื่อง

น้ำปลาเป็นเครื่องปรุงรสอาหารที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ น้ำปลามีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายอยู่ทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งไลซีนซึ่งมีอยู่สูงมากอีกทั้งยังเป็นแหล่งของวิตามินและแร่ธาตุอีกหลายชนิด เช่นเป็นแหล่งที่สำคัญของวิตามินบี 12 และแร่ธาตุ เช่น โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น (Thongthai and Sutinanalert , 1991)

แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าน้ำปลาจะมีคุณค่าทางอาหารอยู่สูง แต่เนื่องจากน้ำปลาปริมาณNaClในระดับสูง (> ร้อยละ20) จึงทำให้ไม่เหมาะสำหรับผู้บริโภคที่ป่วยเป็นโรคไตหรือความดันโลหิตสูงซึ่งต้องควบคุมปริมาณNaClที่ได้รับในแต่ละวัน (กินเค็มอ่อยปากแต่ลำบากกาย, 2005) ดังนั้นการลดหรือกำจัดNaClออกจากน้ำปลาจึงเป็นการช่วยเพิ่มกลุ่มของผู้บริโภคให้มากขึ้นทั้งในแง่ของการเพิ่มกรดอะมิโนที่จำเป็นให้แก่ร่างกายและการรักษาสุขภาพ

ในปัจจุบันวิธีการแยกNaClออกจากสารละลายโปรตีนได้แก่ การตกผลึกNaClและการกรองโดยใช้เมมเบรนในการตกผลึกNaClทำได้โดยให้ความร้อนระดับหนึ่งอย่างต่อเนื่องเพื่อระเหยตัวทำละลายออกไปจนNaClมีความเข้มข้นถึงขีดจำกัดการละลายแล้วตกผลึกออกมาวิธีการนี้ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติอันเนื่องมาจากต้องใช้เวลาและต้องใช้พื้นที่ในการเก็บมาส่วนการกรองโดยใช้เมมเบรนเป็นกระบวนการแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นสำหรับสารละลาย (Zhang *et al*, 2003) โดยกระบวนการที่เหมาะสมได้แก่ กระบวนการนาโนฟิลเตรชันซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับแยกสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กๆ เช่น NaClและน้ำออกจากสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ๆ เช่น โปรตีน โดยสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิปกติทำให้โปรตีนไม่เสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน

กระบวนการไดอะฟิลเตรชันเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่และกำจัดตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กออกให้ได้มากที่สุด กระบวนการไดอะฟิลเตรชันมีอยู่ 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 ก่อนการทำให้เข้มข้น (pre-concentration) ขั้นตอนที่ 2 ไดอะฟิลเตรชัน และขั้นตอนที่ 3 หลังการทำให้เข้มข้น (post-concentration) (Dutre and Tragardh, 1994) และขั้นตอนไดอะฟิลเตรชันยังแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ตามการเติมน้ำหรือสารละลาย

บัพเฟอร์เข้าไปในสารละลายป้อนเพื่อทดแทนเพอมีเอทที่ถูกแยกออกไป คือการเติมแบบต่อเนื่อง (continuous) หรือการเติมแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous) (Lipnizki *et al*, 2002)

กระบวนการแบบกะ สามารถคำนวณความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารได้จากการทำสมดุลมวลดังนี้ โดยกำหนดให้

$$V_0, C_0 = \text{ปริมาตรและความเข้มข้นของสารละลายป้อน}$$

$$V_R, C_R = \text{ปริมาตรและความเข้มข้นของรีเทนเทท}$$

$$V_P, C_P = \text{ปริมาตรและความเข้มข้นของเพอมีเอท}$$

$$VCR = \frac{V_0}{V_R} \quad [3.1]$$

จากการทำสมดุลมวลของปริมาตรของสารละลาย

$$V_0 = V_R + V_P \quad [3.2]$$

$$C_0 V_0 = C_R V_R + C_P V_P \quad [3.3]$$

ถ้าทำสมดุลมวล จากสมการ [3.1] และ [3.3] ได้

$$C_R = C_0 (VCR)^R \quad [3.4]$$

กระบวนการไดอะฟิลเตรชัน สามารถคำนวณความเข้มข้นของสารได้จากสมการ [3.5]

โดยกำหนดให้  $C_{S0}, C_S$  = ความเข้มข้นของสารโมเลกุลเล็กหรือใหญ่ที่เวลาเริ่มต้นและที่เวลาใดๆ

$V_D$  = ปริมาตรของน้ำที่ป้อนเพื่อทำไดอะฟิลเตรชันซึ่งเท่ากับ

ปริมาตรของเพอมีเอท (หรืออัตราการใช้)

จากการทำสมดุลมวล ความเข้มข้น  $C_S$  ที่เหลืออยู่ในถังป้อนมีความสัมพันธ์กับ  $V_D$  ดังนี้

เมื่อค่าการกักกันสาร,  $R = 0$ )

$$C_S = C_{S0} e^{\frac{-V_D}{V}} \quad [3.5]$$

เมื่อค่าการกักกันสาร,  $R \neq 0$ )

$$C_S = C_{S0} e^{\frac{-(1-R)V_D}{V_0}} \quad [3.6]$$

$$\text{Number of diavolume} = \frac{V_D}{V_0} \quad [3.7]$$

Number of diavolume คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพอมีอเทกกับปริมาตรของสารละลายป้อนเริ่มต้น

กระบวนการไดอะฟิลเตรชันที่ใช้เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน โดยทั่วไปใช้สำหรับการแยกตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กเช่น NaCl และสารอินทรีย์ออกจากสารละลายผสม (Wang *et al*, 2002)

Schwartz และคณะ (2006) ศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis) กับไดอะฟิลเตรชัน โดยสรุปไว้ดังตารางที่ 3-1 กระบวนการไดอะไลซิสเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการแยกตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กออกจากสารละลายโดยใช้เมมเบรน โดยตัวถูกละลายจะผ่านเมมเบรนไปสู่สารละลายเจือจางหรือน้ำ ซึ่งเรียกว่า ไดอะไลเซต (Dialysate) โดยมีผลต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน ในขณะที่เดียวกันก็มีการแพร่ของตัวทำละลายผ่านเมมเบรนในทิศทางตรงกันข้าม โดยการออสโมซิส ตัวถูกละลายแต่ละชนิดในสารป้อนถูกแยกออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการแพร่ กล่าวคือ อัตราการแพร่ของสารโมเลกุลเล็กเร็วกว่าสารโมเลกุลใหญ่ ในกรณีที่มีโมเลกุลมีขนาดต่างกันมากและ โมเลกุลต่างๆอาจถูกแยกจากกันด้วยกลไกการคัดแยกตามขนาด

ตารางที่ 3-1 การเปรียบเทียบกระบวนการไดอะฟิลเตรชันกับไดอะไลซิส

Table 3-1 Comparison of diafiltration and dialysis process

	ไดอะฟิลเตรชัน	ไดอะไลซิส
1. การส่งผ่านตัวถูกละลาย	การพาและการแพร่	การแพร่
2. อัตราเร็วในการส่งผ่าน	เร็ว	ช้า
3. ปริมาตรของตัวทำละลาย	น้อย	มาก

ที่มา: Schwartz และคณะ (2006)

Tanistra และ Bodzek (1998) ศึกษาการเตรียมซัลเฟตลิกนินให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นด้วยอัลตราฟิลเตรชันแบบไดอะฟิลเตรชัน การทดลองใช้ Polycrylonitrile membranes (PAN-20, PAN-21) ในการทำให้ซัลเฟตลิกนินบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งการทดลองจะทำไดอะฟิลเตรชันแบบกะและแบบต่อเนื่อง การทดลองตอนแรกเป็นการศึกษาคุณสมบัติของเยื่อแผ่น โดยทำการศึกษาค่าฟลักซ์ของเพอมีเอท เมื่อเปลี่ยนค่า TMP (0.5, 0.75 และ 1.0 MPa) และหา MWCO ของเมมเบรน จากการทดลอง พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น เมื่อค่า TMP เพิ่มขึ้นและ MWCO ของเมมเบรน PAN-20 และ PAN-21 มีค่าประมาณ 20,000 Da ในการทดลองตอนที่สองทำการหาค่า TMP ที่เหมาะสมแล้วทำการทดลองแบบไดอะฟิลเตรชันแบบกะและแบบต่อเนื่องเพื่อหาร้อยละความบริสุทธิ์ของลิกนิน (Degree of purity of lignin) จากการทดลองพบว่า TMP เท่ากับ 1.0 MPa ทั้งเมมเบรน PAN-20 และ PAN-21 ให้ความบริสุทธิ์ของลิกนินมากที่สุด เมื่อทำการทดลองแบบไดอะฟิลเตรชันแบบกะและแบบต่อเนื่องของเมมเบรน PAN-20 พบว่าความบริสุทธิ์ของลิกนินเท่ากับร้อยละ 86.09 และ 84.10 ตามลำดับ ส่วนของเมมเบรน PAN-21 ความบริสุทธิ์ของลิกนินเท่ากับร้อยละ 87.10 และ 86.30 ตามลำดับ จะเห็นว่าความบริสุทธิ์ของลิกนินทั้งหมดมีค่าสูงกว่าร้อยละ 80

Muller และคณะ (1999) ศึกษาการแยกแอลฟา-แลคตาบูมิน ( $\alpha$ -Lactalbumin,  $\alpha$ -LA) จากเคซีนในหางนมด้วยวิธีอัลตราฟิลเตรชันแบบต่างๆ คือการทำเข้มข้นแบบต่อเนื่อง (continuous concentration, CC) การทำเข้มข้นแบบกะ (discontinuous concentration, DC) ไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง (continuous diafiltration, CDF) และการทำเข้มข้นแบบต่อเนื่องแล้วตามด้วยไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง (CC-CDF) จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นและปริมาณ  $\alpha$ -LA เป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นเริ่มต้นและการส่งผ่าน (transmission) ของ  $\alpha$ -LA โดยการทดลองแบบ CC ได้ความเข้มข้น  $\alpha$ -LA มากที่สุด ส่วนความบริสุทธิ์ของ  $\alpha$ -LA และการส่งผ่านของ  $\alpha$ -LA และเบตา-แลคโตโกลบูลิน ( $\beta$ -Lactoglobulin,  $\beta$ -LA) ซึ่งจากการทดลอง พบว่าความบริสุทธิ์ที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันและผลผลิตของ  $\alpha$ -LA เป็นฟังก์ชันกับการส่งผ่านของ  $\alpha$ -LA โดยการทดลองแบบ CC-CDF มีค่าผลผลิตสูงที่สุด

Ghosh และคณะ (2000) ศึกษาการแยกเอนไซม์ไลโซไซม์จากไข่ขาวโดยใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ที่ผลิตมาจาก polysulphone (MWCO 30 kDa) ชนิดเส้นใยกลวงในการแยก โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบป้อนกลับหมด ทำการทดลองโดยนำรีเทนเททและเพอมีเอทป้อนกลับเข้าถังเพื่อทำการแยกอีกครั้ง และแบบไดอะฟิลเตรชัน ทำการทดลองโดยนำเฉพาะรีเทนเททกลับมาป้อนเข้าถังป้อนเพื่อทำการแยกอีกครั้งและมีการเติมสารละลายบัฟเฟอร์แทนเพอมีเอทจากการทดลอง พบว่าแบบป้อนกลับหมด เมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและปริมาณเอนไซม์ไลโซไซม์ เพิ่มขึ้นมาก แต่ความเร็วตามขวางไม่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเอนไซม์ไลโซไซม์และ TMP ก็ไม่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเอนไซม์ไลโซไซม์เช่นกัน แต่เมื่อทำการ

ทดลองแบบไดอะฟิลเตรชัน พบว่าเอนไซม์ไลโซไซม์ มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 80-90 ซึ่งดีกว่าแบบป้อนกลับหมด

Simon และคณะ (2002) ศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนและการแยก NaCl ออกจากเจลาตินของหนังปลาทูน่าด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันแบบไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง ในการทดลองใช้  $Al_2O_3$  (MWCO 10 kDa) ชนิดท่อ การทดลองขั้นแรกเป็นการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของอัลตราฟิลเตรชัน โดยทำการทดลองที่ pH 2-8.8 TMP 60-400 kPa ความเร็วตามขวาง 1.4-4.7 m/s และอุณหภูมิ 21-55 °C จากผลการทดลอง พบว่าค่า pH ตั้งแต่ 4 ขึ้นไปค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าต่ำ แต่เมื่อลด pH ให้ต่ำกว่า 4 พบว่า ค่าความต้านทานของเมมเบรนที่ใช้แล้วมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของเมมเบรนใหม่ ผลของ TMP คือ เมื่อ TMP เพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและอัตราการกักกัน มีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่ในที่สุด ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น ร้อยละ 2 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 1 °C และผลของการเลือกผ่านของเมมเบรนคือ เมื่อความเข้มข้นของ เจลาตินเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าลดลง แต่ความเข้มข้นของเจลาตินไม่มีผลต่ออัตราการกักกัน ต่อมาทำการศึกษาประสิทธิภาพในการแยก NaCl โดยทำการทดลองไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องจากผลการทดลองพบว่าสามารถแยก NaCl ได้ในอัตราเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 185 g/h.m<sup>2</sup> และมีการสูญเสียโปรตีนเพียงเล็กน้อย

Lipnizki และคณะ (2002) ศึกษาข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่อง (DDF) แบบต่อเนื่อง (CDF) และแบบไหลสวนทางกัน โดยการทดลองเป็นการทำให้โปรตีนมีความเข้มข้นสูงขึ้นในการทดลองใช้เมมเบรน DSS GR 61 (MWCO 20 kDa ซึ่งสามารถกักกัน NaCl ได้ทั้งหมด) และแบบ DSS แผ่นและกรอบ การทดลองทำการกรองเบื้องต้น (pre-filtration) 3 ขั้นตอนก่อน แล้วจึงทำไดอะฟิลเตรชันอีก 2-10 ขั้นตอน จากผลการทดลอง พบว่ากระบวนการทั้ง 3 แบบให้ประสิทธิภาพในการแยกใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบที่ไดอะฟิลเตรชัน 4 ขั้นตอนเท่าๆกัน พบว่าแบบไหลสวนทางกันต้องการพื้นที่ของเมมเบรนมากกว่าแบบต่อเนื่อง ร้อยละ 40 และมากกว่าแบบไม่ต่อเนื่องร้อยละ 115 และต้องการปริมาตรของสารละลายที่เดิมในกระบวนการน้อยกว่าแบบต่อเนื่องร้อยละ 140 และน้อยกว่าแบบไม่ต่อเนื่องร้อยละ 74 เนื่องจากแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องใช้พื้นที่ของเมมเบรนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบไหลสวนทางกัน ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการลงทุนจึงน้อยกว่า

Schwartz (2006) ได้รายงานเปรียบเทียบการกรองโดยใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันด้วยเทคนิคไดอะฟิลเตรชัน โดยเปรียบเทียบรูปแบบการเติมสารละลายในกระบวนการระหว่างการเติมสารละลายแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องต่อการแยก NaCl ในสารละลาย NaCl โดยโมเลกุล NaCl มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน สำหรับการเติมสารละลายแบบไม่ต่อเนื่องนั้นทำการทดลองโดยเริ่มจากนำสารละลายเริ่มต้นเติมสารละลายบัฟเฟอร์ 1 เท่า แล้วกรองลดปริมาตรลง

เหลือเท่ากับปริมาตรสารละลายเริ่มต้น ถือว่าเป็น 1 ปริมาตรไดอะฟิลเตรชัน จากนั้นเติมสารละลายบัฟเฟอร์และทำแบบเดิมไปเรื่อยๆ สำหรับการทำให้แบบต่อเนื่องนั้นทำโดยควบคุมปริมาตรสารละลายให้คงที่ตลอดเวลาโดยการเติมสารละลายบัฟเฟอร์ลงไปเท่ากับอัตราการไหลของเพอมีเอท ผลแสดงดังตารางที่ 3-2 พบว่า การทำไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องให้ผลร้อยละการแยกโมเลกุลขนาดเล็กได้ดีกว่าการทำแบบไม่ต่อเนื่อง โดยสามารถแยกโมเลกุลขนาดเล็กได้มากกว่าร้อยละ 99 โดยใช้ปริมาตรในการทำไดอะฟิลเตรชันเท่ากับ 5 ปริมาตร แต่การทำแบบไม่ต่อเนื่องนั้นจะแยกโมเลกุลขนาดเล็กได้มากกว่า ร้อยละ 99 ต้องใช้ปริมาตรในการทำไดอะฟิลเตรชันมากกว่า 7 ปริมาตร

ตารางที่ 3-2 การเปรียบเทียบร้อยละความเข้มข้นของ NaCl ในเพอมีเอทของกระบวนการไดอะฟิลเตรชัน  
Table 3-2 Comparison of NaCl concentration (%) in permeate of diafiltration process

Diafiltration volumes	Continuous	Discontinuous
1	63.2	50.0
2	86.5	75.0
3	95.0	87.5
4	98.2	93.8
5	99.3	96.9
6	99.8	98.4
7	99.9	99.2

ที่มา : Schwartz (2006)

การสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า กระบวนการไดอะฟิลเตรชันนั้นสามารถแยกสารที่มีโมเลกุลเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสารโมเลกุลใหญ่ผ่านออกมาในเพอมีเอทเพียงเล็กน้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องและลำดับขั้นของการบวนการไดอะฟิลเตรชันและการทำให้เข้มข้นเพื่อแยก NaCl ออกจากโปรตีนและเพิ่มความเข้มข้นโปรตีน โดยควบคุมสภาวะต่างๆของการทดลอง

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบถึงผลของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกัน โปรตีนและNaClของน้ำปลาเจือจาง
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบถึงผลของลำดับชั้นของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันและการทำให้เข้มข้นต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกัน โปรตีนและNaClของน้ำปลาเจือจาง

## 1. วัสดุ อุปกรณ์

1.1 น้ำปลา ตราปลาหมึก

1.2 สารเคมี

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการหาปริมาณ โปรตีนและNaClเป็นสารเคมีระดับคุณภาพวิเคราะห์ (Analytical grade) และสารละลายสำหรับล้างเมมเบรนเป็นสารเคมีระดับคุณภาพทางการค้า (Commercial grade) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก

1.3 อุปกรณ์ย่อยโปรตีน ประกอบด้วยเตาย่อย และเครื่องคักจับ ไอกรด (ยี่ห้อ Gerhard รุ่น TT)

1.4 อุปกรณ์ซูดกลั่นโปรตีน (ยี่ห้อ Gerhard รุ่น VAP 20)

1.5 ขวดพลาสติกขนาด 60 มล.

1.6 เครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระจกตวง ปิเปต และขวดรูปชมพู่

1.7 เครื่องวัดพีเอช (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PB-20)

1.8 เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP2100s)

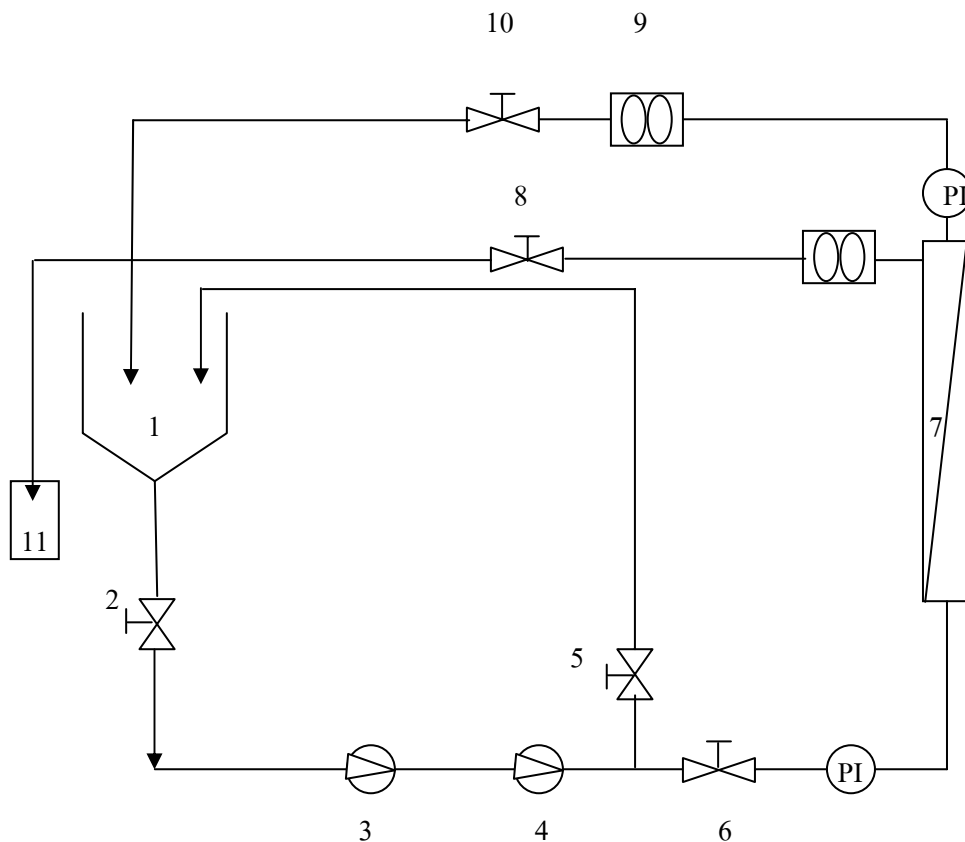
1.9 เครื่องชั่งไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP210s)

1.10 เครื่องสเปกโตร โดมิเตอร์ (ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-2000)

1.11 ระบบเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง

ระบบเมมเบรนระดับโรงงานทดลอง (pilot plant scale) มีรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 2-1 โดยมีถังป้อนขนาด 50 ลิตร การป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบจะใช้ปั๊มสารป้อน สามารถปรับอัตราการไหลของสารป้อนและความดันโดยการปรับวาล์วของรีเทนเททและปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (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 ( $\text{m}^2$ ) สามารถกักกัน  $\text{MgSO}_4$  ที่ความเข้มข้น 2000 mg/l ได้ร้อยละ 98



(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 3-1 ระบบนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง

Figure 3-1 Nanofiltration pilot plant scale system

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางด้านเคมีและกายภาพของน้ำปลา

2.2 ศึกษาเปรียบเทียบผลของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันโปรตีน NaCl

#### 2.2.1 กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง

นำน้ำปลา ปริมาตร 20 ลิตร มากรองผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง โดยควบคุมความดันขั้วที่ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$  และเติมน้ำเข้าในถังป้อนอย่างต่อเนื่องโดยมีอัตราการเติมน้ำเข้าเท่ากับอัตราการไหลออกของเพอมีเอท



จนกระทั่งปริมาตรเพอมีเอทที่ออกมาเท่ากับ 40 ลิตร ( $V_D/V_0=2$ ) จึงหยุดการทดลองโดยควบคุมอัตราการเติมน้ำเข้าให้เข้ากับอัตราการไหลออกของเพอมีเอท โดยทำการวัดค่าฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 ลิตรและเก็บตัวอย่างในส่วนของเพอมีเอทและรีเทนเททมาวิเคราะห์หาค่าการกักกัน โปรตีน และ NaCl ทุกๆ 8 ลิตร

### 2.2.2 กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่อง

นำน้ำปลาเจือจางร้อยละ 50 (v/v) ปริมาตร 40 ลิตร มากรองผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง โดยควบคุมความดันขั้วที่ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28\pm 3^\circ\text{C}$  จนกระทั่งปริมาตรเพอมีเอทที่ออกมาเท่ากับ 40 ลิตร ( $V_D/V_0=2$ ) จึงหยุดการทดลอง โดยจะทำการเติมน้ำเข้าไป 20 ลิตรเมื่อปริมาตรเพอมีเอทออกมาเท่ากับ 20 ลิตร โดยทำการวัดค่าฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 ลิตรและเก็บตัวอย่างในส่วนของเพอมีเอทและรีเทนเททมาวิเคราะห์หาค่าการกักกัน โปรตีน และ NaCl ทุกๆ 7, 14, 20, 27, 34 และ 40 ลิตรตามลำดับ

2.3 ศึกษาเปรียบเทียบผลของลำดับขั้นตอนในการทำไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง และการทำให้เข้มข้นต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันโปรตีน NaCl

#### 2.3.1 การทำไดอะฟิลเตรชัน ( $V_D/V_0=1.5$ ) ก่อนทำให้เข้มข้น ( $VCR=2$ )

-นำน้ำปลาเจือจางร้อยละ 50 (v/v) ปริมาตร 40 ลิตร มากรองผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง โดยควบคุมความดันขั้วที่ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28\pm 3^\circ\text{C}$  จนกระทั่งปริมาตรเพอมีเอทที่ออกมาเท่ากับ 60 ลิตร ( $V_D/V_0=1.5$ ) จึงหยุดการทดลอง โดยทำการวัดค่าฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 ลิตรและเก็บตัวอย่างในส่วนของเพอมีเอทและรีเทนเททมาวิเคราะห์หาค่าการกักกัน โปรตีน และ NaCl ทุกๆ 15 ลิตร

-นำรีเทนเททที่เหลือ 40 ลิตรมาทดลองกรองด้วยระบบเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง โดยควบคุมความดันขั้วที่ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28\pm 3^\circ\text{C}$  ทำการกรองจนกระทั่งปริมาตรในรีเทนเททเหลือ 20 ลิตร ( $VCR=2$ ) จึงหยุดการทดลอง โดยทำการวัดค่าฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 ลิตรและเก็บตัวอย่างในส่วนของเพอมีเอทและรีเทนเททมาวิเคราะห์หาค่าการกักกัน โปรตีน และ NaCl ทุกๆ 7, 14 และ 20 ลิตร ตามลำดับ

#### 2.3.2 การทำให้เข้มข้น ( $VCR=2$ ) ก่อนทำไดอะฟิลเตรชัน ( $V_D/V_0=1.5$ )

-นำน้ำปลาเจือจางร้อยละ 50 (v/v) ปริมาตร 40 ลิตร มากรองผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง โดยควบคุมความดันขั้วที่ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28\pm 3^\circ\text{C}$  ทำการกรองจนกระทั่งปริมาตรในรีเทนเททเหลือ 20 ลิตร ( $VCR=2$ ) จึงหยุด

การทดลองโดยทำการวัดค่าฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 ลิตรและเก็บตัวอย่างในส่วนของเพอมีเอท และรีเทนเททมาวิเคราะห์หาค่าการกักกันโปรตีนและNaClทุกๆ 7, 14 และ 20 ลิตร ตามลำดับ

- นำรีเทนเททที่เหลือ 20 ลิตรมาทดลองกรองด้วยระบบเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน ระดับโรงงานทดลอง โดยควบคุมความดันขั้วที่ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$  จนกระทั่งปริมาตรเพอมีเอทที่ออกมาเท่ากับ 60 ลิตร ( $V_D/V_0=1.5$ ) จึงหยุดการทดลอง โดยทำการวัดค่าฟลักซ์ของเพอมีเอททุกๆ 1 ลิตรและเก็บตัวอย่างในส่วนของเพอมีเอทและรีเทนเททมาวิเคราะห์หาค่าการกักกันโปรตีนและNaClทุกๆ 15 ลิตร

#### 2.4 ศึกษาคุณสมบัติทางด้านเคมีและกายภาพของน้ำปลาเจือจางหลังจากแยกNaCl ออกและทำให้เข้มข้นขึ้น

- นำน้ำปลาเจือจางร้อยละ 50 (v/v) ปริมาตร 40 ลิตร มากรองด้วยระบบเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง โดยควบคุมความดันขั้วที่ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$  จนกระทั่งปริมาตรเพอมีเอทที่ออกมาเท่ากับ 60 ลิตร ( $V_D/V_0=1.5$ ) จึงหยุดการทดลอง

- นำรีเทนเททที่เหลือ 40 ลิตรมาทดลองกรองด้วยระบบเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชันระดับโรงงานทดลอง โดยควบคุมความดันขั้วที่ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$  ทำการกรองจนกระทั่งปริมาตรในรีเทนเททเหลือ 20 ลิตร ( $VCR=2$ ) จึงหยุดการทดลองนำ ส่วนของรีเทนเททที่เหลือมา ศึกษาคุณสมบัติทางด้านเคมี และกายภาพ ของน้ำปลา

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

##### 1. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

- พีเอช โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PB-20)
- ปริมาณNaCl (A.O.A.C, 2000)
- ปริมาณอัล โมเนียไน โตรเจน (มอก.2526)
- ปริมาณฟอรั่มลดีไฮด์ไน โตรเจน (มอก.2526)
- ปริมาณไนโตรเจนจากกรดอะมิโน (มอก.2526)

##### 2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

- วัดค่าสี โดยใช้ Hunter Lab (Lopetcharat and Park, 2002)
- วัดความหนืด โดยใช้ U-tube viscometers (Lopetcharat and Park, 2002)

### 3. การวิเคราะห์ฟาวลิง

การวิเคราะห์ความต้านทานของกระบวนการเมมเบรน สามารถแยกความต้านทานการไหลของเพอมีเอทเป็นความต้านทานของเมมเบรน ( $R_m$ ) ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง ( $R_{ff}$ ) และความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลาริเซชัน ( $R_p$ )

ดังนั้นความต้านทานรวม ( $R_t$ ) ในสมการที่ [3.8] ประกอบด้วย

$$R_t = R_m + R_{rf} + R_{irf} \quad [3.8]$$

ซึ่งความต้านทานแต่ละตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

1.) ความต้านทานรวม ( $R_t$ ) สามารถคำนวณได้จากการเขียนกราฟระหว่างฟลักซ์ของสารละลายกับ TMP ที่ใช้ในการวัดค่าฟลักซ์ดังกล่าว คำนวณความชันของกราฟแล้วเปรียบเทียบกับสมการที่ [3.9]

$$R_t = \frac{TMP}{\mu_p J} \quad [3.9]$$

$$R_t = \frac{1}{\mu_p slope} \quad [3.10]$$

โดยกำหนดให้	$TMP$	=	ความดันขับที่ให้กับระบบ (Pa)
	$J$	=	ฟลักซ์ของสารละลาย ( $m^3/m^2 \cdot s$ )
	$\mu_p$	=	ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)

2.) ความต้านทานเมมเบรน ( $R_m$ ) สามารถคำนวณได้จากการเขียนกราฟระหว่างฟลักซ์ของน้ำกรองกับ TMP ที่ใช้ในการวัดค่าฟลักซ์ดังกล่าว คำนวณความชันของกราฟแล้วเปรียบเทียบกับสมการที่ [3.11]

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_w J_w} \quad [3.11]$$

$$R_m = \frac{1}{\mu_w slope} \quad [3.12]$$

โดยกำหนดให้	$TMP$	=	ความดันขับที่ให้กับระบบ (Pa)
	$J_w$	=	ฟลักซ์ของน้ำกรองก่อนการใช้งาน ( $m^3/m^2.s$ )
	$\mu_w$	=	ความหนืดของน้ำกรอง (Pa.s)

หลังจากการใช้งานแล้วจะทำการล้างเมมเบรนด้วยน้ำกรองเพื่อกำจัดชั้นคอนเซ้นเตรชัน โพลารไรเซชัน ดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นโพลารไรซ์จึงถูกกำจัดออกไป ค่าความต้านทานที่เหลืออยู่คือ ความต้านทานเมมเบรน ( $R_m$ ) และความต้านทานของฟาวลิงที่ไม่สามารถผันกลับได้ ( $R_{irf}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเขียนกราฟระหว่างฟลักซ์ของน้ำกรองหลังจากการล้างเมมเบรน กับ  $TMP$  ที่ใช้ในการวัดค่าฟลักซ์ดังกล่าว คำนวณความชันของกราฟแล้วเปรียบเทียบกับสมการที่ [3.13]

$$R_m + R_{irf} = \frac{TMP}{\mu_w J'_w} \quad [3.13]$$

$$R_m + R_{irf} = \frac{1}{\mu_w slope} \quad [3.14]$$

โดยกำหนดให้	$TMP$	=	ความดันขับที่ให้กับระบบ (Pa)
	$J'_w$	=	ฟลักซ์ของน้ำกรองหลังจากการล้างเมมเบรน ( $m^3/m^2.s$ )
	$\mu_w$	=	ความหนืดของน้ำกรอง (Pa.s)

3.) ความต้านทานของชั้นโพลารไรซ์ ( $R_{ir}$ ) สามารถคำนวณ โดยการแทนค่าของสมการที่ [3.10] และ [3.14] ลงในสมการที่ [3.8]

4.) ความต้านทานของฟาวลิง ( $R_{irf}$ ) สามารถคำนวณ โดยการแทนค่าของ  $R_m$  จากสมการ [3.12] ลงในสมการ [3.15] จะได้ดังนี้

$$R_{irf} = \frac{TMP}{(\mu_w J'_w) - R_m} \quad [3.15]$$

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

## 2.5 วิธีการล้างเมมเบรน

หลังจากกระบวนการกรองแต่ละครั้งทำการล้างเมมเบรนด้วยน้ำกรองที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทำการชะล้างสิ่งอุดตันออกด้วยค่า EDTA (ethylenedimine tetraacetic acid) เข้มข้นร้อยละ 1.0 (w/v) pH 11 ที่ความดันขับ 4.0 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h อุณหภูมิ  $25 \pm 4^{\circ}\text{C}$  นาน 30 นาที ใช้น้ำกรองในการทำความสะอาด ทำความสะอาดและล้างด้วยกรดซิตริก เข้มข้นร้อยละ 1.0 (w/v) pH 2 ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 4^{\circ}\text{C}$  ที่ความดันขับและความเร็วตามขวางระดับเดียวกันนาน 30 นาที ใช้น้ำกรองในการทำความสะอาด ทำความสะอาดและทำการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่สถานะคงที่ จากนั้นใช้ KMS (potassium metabisulfate) เข้มข้นร้อยละ 0.5 (w/v) วนทั้งระบบนาน 10 นาที ก่อนทำการหยุดระบบการกรองและกักไว้ในเมมเบรนเพื่อป้องกันเชื้อแบคทีเรียและก่อนกรองทุกครั้งจะทำความสะอาด KMS โดยการใช้น้ำกรองไล่และวัดค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดให้ได้เท่ากับทุกครั้งก่อนทำการกรอง

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 1. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำปลา

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำปลาที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3-3 ผลการวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้ Hunter lab ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) ซึ่งในทางทฤษฎี กำหนดว่าค่า  $L^*$  มีค่าใกล้ 100 แสดงว่าในตัวอย่างมีเจดสีขาว แต่ถ้าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าตัวอย่างมีเจดสีดำ ค่า  $a^*$  มีค่าเป็นบวก แสดงว่าในตัวอย่างมีเจดสีแดง แต่ถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่ามีเจดสีเขียว และเมื่อค่า  $b^*$  มีค่าเป็นบวก แสดงว่าในตัวอย่างมีเจดสีเหลือง แต่ถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่ามีเจดสีน้ำเงิน จากตารางที่ 3-3 พบว่า ค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ของน้ำปลา 59.12, 27.41 และ 91.09 ตามลำดับ แสดงว่าน้ำปลามีสีค่อนข้างเหลืองเข้มใส (น้ำตาล) ซึ่งสอดคล้องกับค่าสีของน้ำปลาที่ผลิตมาจาก Pacific Whiting 58.24, 20.17 และ 71.80 ตามลำดับ (Lopetcharat and Park, 2002) และจากค่าสีนี้พบว่า ค่า  $b^*$  ของน้ำปลาที่ผลิตมาจากปลา Pacific Whiting มีค่าน้อยกว่าสีของน้ำปลาตราปลาหมึก อันเนื่องมาจากระยะเวลาที่ใช้ในการหมักแตกต่างกันคือ น้ำปลาที่ผลิตจากปลา Pacific Whiting ใช้เวลาในการหมัก 2 เดือน ซึ่งน้อยกว่าระยะเวลาในการหมักน้ำปลาตราปลาหมึก (6-12 เดือน) ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไมลาดยังเกิดขึ้นได้น้อยส่งผลให้ ค่า  $b^*$  มีค่าต่ำ (Lopetcharat *et al*, 2001)

จากตารางที่ 3-3 พบว่าค่า pH ปริมาณ NaCl ในโตรเจนทั้งหมดและไนโตรเจนจากกรดอะมิโน มีค่าเป็น 5.6, 37 (g/l), 20 (g/l) และ 12 (g/l) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้นี้เมื่อนำมาเทียบกับคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำปลาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พบว่าน้ำปลาตราปลาหมึกมีค่าตรงตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของน้ำปลาชั้นที่ 1 (แสดงดังตารางที่ 3-4)

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำปลาตราปลาหมึก

Table 3-3 The physical and chemical properties of fish sauce of squid band

Properties	Mean (standard deviation)
Color L*	59.14 ± 0.40
a*	27.45 ± 0.90
b*	90.02 ± 0.11
Viscosity (mPa.s) at 25°C	2.16 ± 0.00
pH	5.6 ± 0.20
NaCl content (g/l)	37.0 ± 0.25
Total nitrogen (g-N/l)	20.00 ± 0.05
Formaldehyde nitrogen (g/l)	14.04 ± 0.14
Ammonia nitrogen (g/l)	1.43 ± 0.02
Amino nitrogen (g/l)	12.61 ± 0.16

Note L\* (0 = black and 100 = white)

a\* (from -80 to zero = green, from zero to +100 = red)

b\* (from -100 to zero = blue, from zero to +70 = yellow)

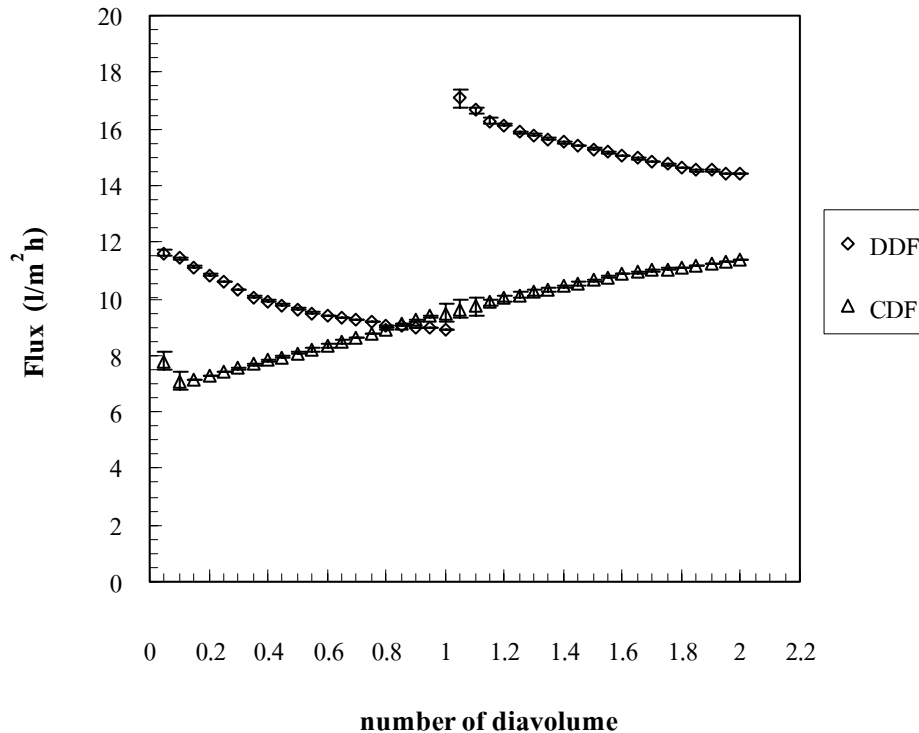
ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำปลาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย

Table 3-4 The physical and chemical properties of fish sauce of The Thai Industrial Standard

Properties	Top grade
pH	5-6
NaCl content (g/l)	≥ 23
Total nitrogen (g-N/l)	≥ 20
Amino nitrogen (g/l)	≥ 10

ที่มา : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (2526)

## 2. ผลของรูปแบบกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันโปรตีนและNaCl



ภาพที่ 3-2 การเปรียบเทียบรูปแบบไดอะฟิลเตรชันต่อค่าฟลักซ์เพอมีเอท ความดัน 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 3-2 Comparison of diafiltration on permeate flux TMP 10 bar cross flow velocity 500 l/h and Temp.  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 3-2 แสดงค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง พบว่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเฉลี่ยของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่าแบบไม่ต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 9.4 และ 12.6 l/m<sup>2</sup>.h ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ทั้งหมดของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่ามากกว่าแบบไม่ต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 147.23 และ 113.58 นาที ตามลำดับซึ่งเป็นมาจากกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีความเข้มข้นของสารป้อนเริ่มต้นและค่าความต้านทานของชั้นโพลารไรซ์และความต้านทานของฟาว์ลิงสูงกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่อง แสดงดังตารางที่ 3-5 ส่งผลให้แรงดันขับสุทธิในระบบของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่อง

ตารางที่ 3-5 ผลของรูปแบบกระบวนการไดอะฟิลเตรชันต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิง ที่ความดันขับ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h อุณหภูมิ  $28\pm 3^{\circ}\text{C}$

Table 3-5 Effect of diafiltration process on membrane resistance and fouling resistance at TMP 10 bar, cross flow velocity 500 l/h, temperature  $28\pm 3^{\circ}\text{C}$

Resistance ( $\text{m}^{-1}$ ) $\times 10^{13}$	CDF	DDF
$R_m$	$4.42\pm 0.00$	$4.42\pm 0.00$
$R_{irf}$	$0.33\pm 0.00^a$	$0.23\pm 0.00^b$
$R_{rf}$	$29.45\pm 0.18^a$	$16.35\pm 0.09^b$

Note: <sup>a-d</sup>, Means within row with the same superscript are not significantly at  $p>0.05$

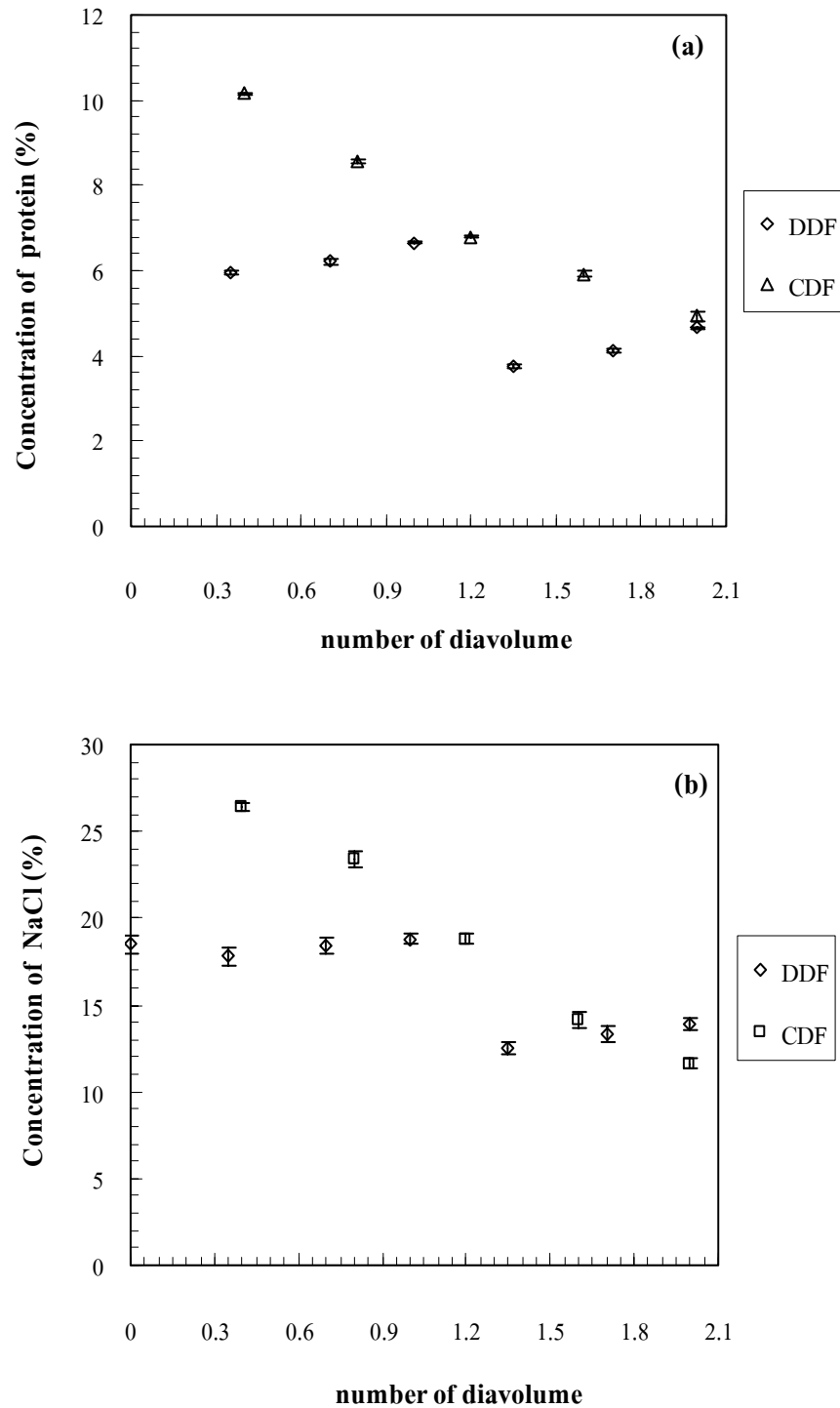
เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Number of diavolume ( $V_D/V_0$ ) สูงขึ้นคือจาก 7.8 เป็น 11.4  $\text{l/m}^2\text{h}$  ตามลำดับ เมื่อ Number of diavolume เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 2 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Goulas และคณะ (2002) ที่ศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของ โอลิโกแซคคาไรด์ด้วยกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องโดยใช้เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน (NF-CA-50) โดยควบคุมอุณหภูมิที่  $25\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  และความดันขับ 13.8 bar พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อ Number of diavolume มีค่ามากขึ้นเป็นผลมาจากการเติมน้ำอย่างต่อเนื่องจะช่วยพออนุภาคขนาดเล็กออกไปจากเมมเบรนและช่วยลดการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันของสารป้อนส่งผลให้แรงดันออสโมติกลดลง ส่วนค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่อง มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ Number of diavolume สูงขึ้นคือจาก 11.6 เป็น 8.9  $\text{l/m}^2\text{h}$  ตามลำดับ เมื่อ Number of diavolume เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 1 ตามลำดับ เป็นผลมาจากเมื่อ Number of diavolume สูงขึ้นส่งผลความเข้มข้นของสารป้อนสูงขึ้นมีผลทำให้ความดันออสโมติกของสารป้อนสูงขึ้น ทำให้แรงดันขับสุทธิในระบบลดลง แต่เมื่อเติมน้ำลงไปจนถึงป้อน ฟลักซ์ของเพอมีเอทก็เพิ่มขึ้นอีกครั้งคือจาก 8.9 เป็น 17.1  $\text{l/m}^2\text{h}$  ตามลำดับ อันเนื่องมาจากความดันออสโมติกของสารป้อนลดลงส่งผลให้แรงดันขับสุทธิในระบบสูงขึ้น หลังจากนั้นฟลักซ์ของเพอมีเอทค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องอีกครั้งคือจาก 17.1 เป็น 14.4  $\text{l/m}^2\text{h}$  ตามลำดับ เมื่อ Number of diavolume เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 ตามลำดับ Foley และ Garcia (2000) ได้อธิบายถึงผลของการเติมน้ำหรือสารละลายบัฟเฟอร์ต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันว่า เมื่อเติมน้ำลงไปจนถึงป้อนจะช่วยทำให้ลดความเข้มข้นของอนุภาคตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนส่งผลให้แรงดันออสโมติกของสารป้อนลดลงมีผลทำให้ค่าความดันขับสุทธิสูงขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์ของเพอมีเอทสูงขึ้น



Vikbjerg และคณะ (2005) ทำการศึกษาถึงการเพิ่มความบริสุทธิ์ของฟอสโฟลิปิด (PLs) โดยการกำจัดกรดไขมันอิสระ (FFAs) ด้วยกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (GR 70 PE) พบว่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าลดต่ำลงเป็นผลมาจากเมื่อความเข้มข้นของฟอสโฟลิปิดเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดคอนเซ็นเตรชันโพลาริเซชันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเดิมตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น (เฮกเซน) ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทกลับเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง อันเนื่องมาจากตัวทำละลายที่เดิมลงไปจะไปเพิ่มความสามารถในการละลายได้ของฟอสโฟลิปิดที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน ส่งผลให้ลดการเกิดคอนเซ็นเตรชันโพลาริเซชัน ทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 3-3 แสดงร้อยละความเข้มข้นของโปรตีน (a) และ NaCl (b) ในสารป้อนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง พบว่าร้อยละความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนในสารป้อนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่ามากกว่า กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 4.94 และ 4.11 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีการแพร่ของโปรตีนโดยการพาน้อยกว่า กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องโดยพิจารณาได้จากค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเฉลี่ยของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องมีค่ามากกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง ส่วนร้อยละความเข้มข้นสุดท้ายของ NaCl ในสารป้อนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 11.61 และ 13.95 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีการเติมน้ำอย่างต่อเนื่องซึ่งจะช่วยพาอนุภาค NaCl ออกจากเมมเบรน อย่างต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาร้อยละความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl ในสารป้อนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องพบว่ามีค่าน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือจากร้อยละ 10.16 เป็น 4.94 และ 26.43 เป็น 11.61 ตามลำดับ (แสดงดังภาพที่ 3-3) เมื่อ Number of diavolume เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 2 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของกรดอะมิโนและ NaCl ในสารป้อน (นิธิยา และ วิบูลย์, 2537) จึงทำให้อนุภาคของกรดอะมิโนและ NaCl บางส่วนหลุดออกไปในส่วนของเพอมีเอทและยังมีสาเหตุมาจากการแพร่ผ่านเมมเบรนของสารป้อนโดยการพาของน้ำที่เดิมลงไป สารป้อนอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ร้อยละความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl ในสารป้อนลดลง ส่วนร้อยละความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl ในสารป้อนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องมีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อ Number of diavolume เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 1 และ 1.35 เป็น 2 ตามลำดับ (แสดงดังภาพที่ 3-3) เป็นผลมาจากกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องเป็นกระบวนการที่มีการเติมน้ำเป็นช่วงๆ ทำให้เมื่อ Number of diavolume เพิ่มขึ้นส่งผลให้การแพร่ผ่านเมมเบรนโดยการพาเกิดขึ้นได้น้อยลง ส่งผลให้ร้อยละความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl ในสารป้อนเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3-3 การเปรียบเทียบรูปแบบไดอะฟิลเตรชันต่อค่าร้อยละความเข้มข้นโปรตีน (a)

NaCl (b) ที่ความดัน 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

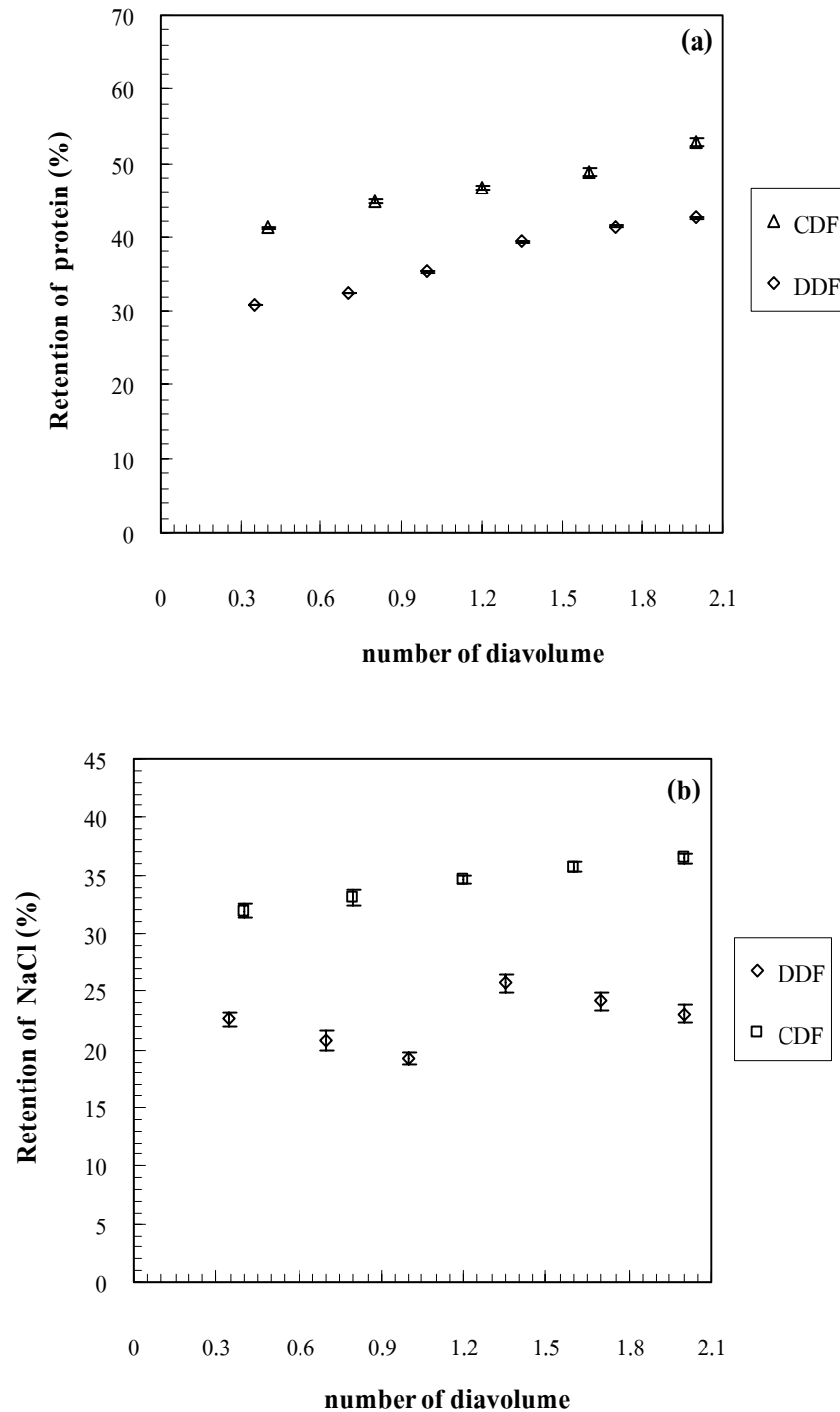
Figure 3-3 Comparison of diafiltration on concentration of protein (%) (a) NaCl (b) at TMP

10 bar cross flow velocity 500 l/h and Temp.  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

ภาพที่ 3-4 แสดงค่าการกักกันโปรตีน (a) และ NaCl (b) ของกระบวนการของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่ามากกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่อง อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือร้อยละ 46.88, 34.35, 37.00 และ 22.60 ตามลำดับ เป็นผลมาจากกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีการแพร่ผ่าน โดยการพาน้อยกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งพิจารณาได้จากค่าฟลักซ์ของเพอเมอเทเบิลของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องมีค่ามากกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาค่าการกักกันโปรตีนของทั้งกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อ Number of diavolume มีค่ามากขึ้นจากร้อยละ 41.21 เป็น 52.84 และ 30.88 เป็น 42.56 ตามลำดับ (แสดงดังภาพที่ 3-4 a) เป็นผลมาจากในช่วงแรกน้ำที่เติมลงไปในสารป้อนจะทำหน้าที่เป็นตัวพออนุภาคของโปรตีนซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกรดอะมิโน (Ijong and Ohta, 1996) ซึ่งมีขนาดของโมเลกุลเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนออกไปหมด ส่งผลให้ในสารป้อนเหลือเพียงโปรตีนที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนทำให้การแพร่ผ่านเมมเบรนเกิดขึ้นได้น้อยลง ทำให้ค่าการกักกันโปรตีนเพิ่มขึ้น จากภาพที่ 3-4(b) พบว่าค่าการกักกัน NaCl ของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องมีค่าลดลงจากร้อยละ 22.64 เป็น 19.26 และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเติมน้ำลงในถังป้อนจากนั้นก็ลดลงอีกครั้งจากร้อยละ 25.69 เป็น 23.08 ตามลำดับ สาเหตุเกิดจากการเติมน้ำของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่องเป็นแบบการเติมน้ำเป็นครั้งคราว ทำให้ความเข้มข้นของ NaCl ในรีเทนเททเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแพร่ผ่านเมมเบรนของ NaCl เพิ่มขึ้นซึ่งสูงกว่าการแพร่กลับส่งผลให้ค่าการกักกัน NaCl ลดลง แต่เมื่อมีการเติมน้ำลงไปจะทำให้ความเข้มข้นของ NaCl ใน รีเทนเททลดลง ทำให้การแพร่ผ่านเมมเบรนของ NaCl ลดลง ทำให้ค่าการกักกัน NaCl สูงขึ้น ส่วนค่าการกักกัน NaCl ของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) จากร้อยละ 31.95 และ 36.45 ตามลำดับ เป็นผลมาจากเมื่อความเข้มข้นของ NaCl ในถังป้อนลดลงทำให้อิทธิพลของประจุของเมมเบรนเข้ามามีบทบาทต่อการกักกัน NaCl มากขึ้น (Schaep *et al*, 1999) เป็นสาเหตุทำให้ Cl<sup>-</sup> (co-ions) ถูกผลักออก มีผลทำให้ค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้น (Ballet *et al*, 2004 ; Tsuru *et al*, 1998 )

เมื่อนำความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl สุดท้ายจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.6 (สำหรับกระบวนการไดอะฟิลเตรชัน) โดยสมมุติค่าการกักกันโปรตีนและ NaCl ของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 46.88, 34.35, 37.00 และ 22.60 ตามลำดับ ผลแสดงดังตารางที่ 3-6



ภาพที่ 3-4 การเปรียบเทียบรูปแบบไดอะฟิลเตรชันต่อค่าการกักกันโปรตีน (a) NaCl (b) ที่ความดัน 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 3-4 Comparison of diafiltration on retention of protein (a) NaCl (b) at TMP 10 bar cross flow velocity 500 l/h and Temp.  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 3-6 ความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนและNaClจากการทดลองและการคำนวณ

Table 3-6 Final concentration of protein and NaCl from experimental and calculation

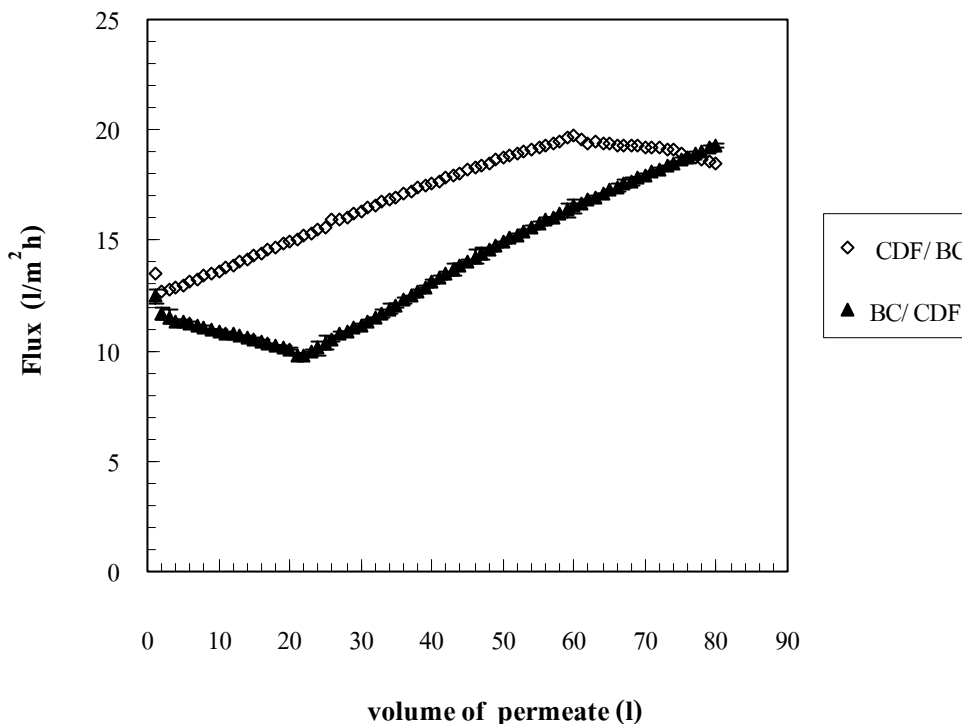
Concentration (%w/v)	Calculation of concentration		Final concentration	
	CDF	DDF	CDF	DDF
Protein	4.15	3.40	4.94	4.65
NaCl	9.95	7.87	11.61	13.95

จากตารางที่ 3-6 พบว่าความเข้มข้นของโปรตีนและNaClที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) อันเนื่องมาจากการคำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนและNaClของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ทำได้โดยการนำค่าการกักกันเฉลี่ยของโปรตีนและNaClของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องมาแทนค่าลงในสมการที่ 3-6 ส่งผลให้ความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนและNaClที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นสุดท้ายที่ได้จากการทดลอง

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าร้อยละความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่ามากกว่าแบบไม่ต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 4.94 และ 4.65 ตามลำดับ และร้อยละความเข้มข้นสุดท้ายของNaClของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่าแบบไม่ต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 11.61 และ 13.95 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีความสามารถในการแยกNaClออกจากน้ำปลาและยังสามารถกักกันโปรตีนได้ดีกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่อง แต่ค่าร้อยละความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนยังต่ำอยู่ จึงทำให้ต้องมีการทำให้เข้มข้นขึ้นส่งผลให้ต้องศึกษาผลของลำดับขั้นตอนในการทำไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องและการทำเข้มข้น

### 3. ผลของลำดับขั้นตอนในการทำไดอะฟิลเตรชันและการทำให้เข้มข้นต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันโปรตีนและNaCl

ภาพที่ 3-5 แสดงค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทจากการทดลองด้วยกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง (CDF) โดยมีการเติมน้ำในอัตราส่วนที่เท่ากับเพอมีเอทที่ไหลออก ปริมาตรของน้ำที่เติมเท่ากับ 1.5 เท่าของปริมาตรสารละลายเริ่มต้น ( $V_D/V_0=1.5$ ) หลังจากนั้นนำรีเทนเททที่เหลือมาทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (batch concentration, BC) จนกระทั่งปริมาตร



ภาพที่ 3-5 ผลของปริมาตรของเพอมีเอตต่อฟลักซ์ของเพอมีเอต ที่น้ำปลาร้อยละ 50 (v/v) ความดัน 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 3-5 Effect of volume of permeate on permeate flux at 50% fish sauce TMP 10 bar cross flow velocity 500 l/h, and Temp.  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

สารละลายสุดท้ายเป็น 1 ใน 2 ของปริมาตรของสารละลายเริ่มต้น ( $\text{VCR} = 2$ ) เปรียบเทียบกับการทำให้เข้มข้นด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันก่อน ( $\text{VCR} = 2$ ) กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอมีเอตเฉลี่ยและเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการดำเนินการของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้น มีค่าฟลักซ์ของเพอมีเอตสูงกว่าและใช้เวลาในการดำเนินการทั้งหมดน้อยกว่าการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 17.0 และ 13.8  $\text{l/m}^2\text{h}$ , 139.54 และ 172.36 นาที ตามลำดับ เนื่องมาจากการทำให้เข้มข้นก่อนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องจะทำให้ปริมาตรในถังป้อนลดลงครึ่งหนึ่งของปริมาตรเริ่มต้นส่งผลให้ความเข้มข้นของสารป้อนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้นและเป็นผลมาจากการทำให้เข้มข้นก่อนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าความต้านทานของชั้นโพลาไรซ์และความต้านทานของฟาวลิ่งสูงกว่าการทำให้เข้มข้นหลังกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง แสดงดังตารางที่ 3-7 ส่งผลให้แรงดันขับสุทธิในระบบของ

ตารางที่ 3-7 ผลของรูปแบบการดำเนินการต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิง ที่น้ำปลาร้อยละ 50 (v/v) ความดันขับ 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h อุณหภูมิ 28±°C

Table 3-7 Effect of operation process on membrane resistance and fouling resistance at 50% (v/v) fish sauce, TMP 10 bar, cross flow velocity 500 l/h, temperature 28±°C

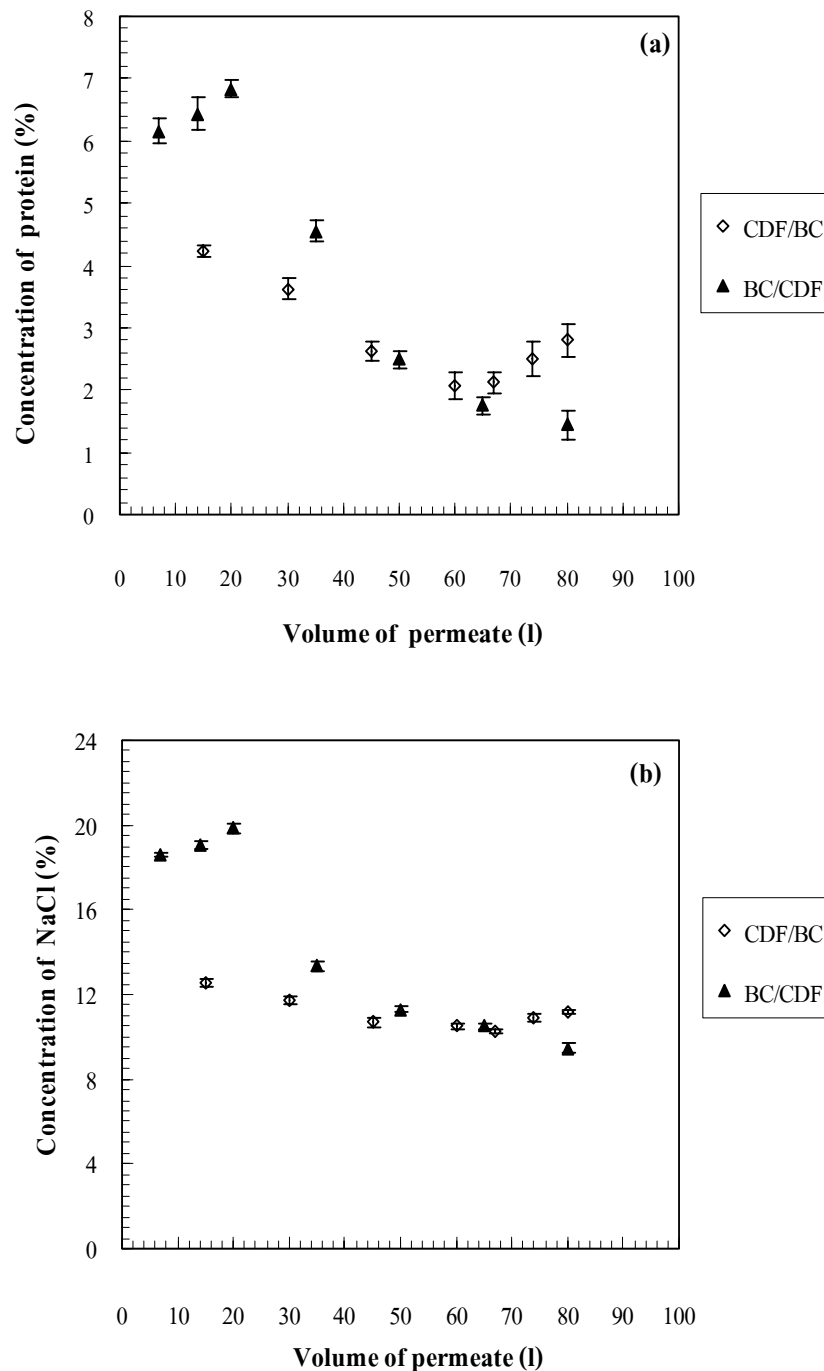
Resistance (m <sup>-1</sup> ) x 10 <sup>13</sup>	CDF/batch concentration	batch concentration/CDF
R <sub>m</sub>	4.42±0.00	4.42±0.00
R <sub>irf</sub>	0.15±0.00 <sup>b</sup>	0.24±0.00 <sup>a</sup>
R <sub>rf</sub>	1.96±0.18 <sup>b</sup>	8.68±0.36 <sup>a</sup>

Note: <sup>a-d</sup>, Means within row with the same superscript are not significantly at p>0.05

การทำให้เข้มข้นก่อนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่าการทำให้เข้มข้นหลังกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทของการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้น

เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเฉพาะในขั้นตอนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องพบว่า ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ในขั้นตอนการทำให้เข้มข้นขึ้น ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีแนวโน้มลดลงทั้งในกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นและการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีการเติมน้ำเข้าไปทดแทนเพอมีเอทที่ออกไปอย่างต่อเนื่องมีผลทำให้ NaCl ถูกพาออกไปได้อย่างต่อเนื่องซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นในรีเทนเททลดลง ทำให้ลดการเกิดคอนเซ็นเตรชันโพลาไรซ์เซชัน มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทสูงขึ้น ส่วนในขั้นตอนการทำให้เข้มข้นขึ้น พบว่าเพอมีเอทถูกนำออกไปมากขึ้นมีผลทำให้ความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดคอนเซ็นเตรชันโพลาไรซ์เซชันและฟาวลิงเพิ่มขึ้น เมื่อไม่มีการเพิ่มความดันขับจะทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทลดลง (Morison and She, 2003)

Limayem และคณะ (2004) ทำการศึกษาถึงการเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับคอลลอยด์ที่มีขนาดโมเลกุลประมาณ 10-1000 นาโนเมตร (Nanoparticles) โดยกระบวนการไดอะฟิลเตรชันซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการทำให้เข้มข้นและกระบวนการไดอะฟิลเตรชัน โดยใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.2 μm (Sartorius) โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C และความดันขับ 2 bar พบว่าในขั้นตอนการทำให้เข้มข้น ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทลดลงและในขั้นตอนการไดอะฟิลเตรชันค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากผลการลดลงของการเกิดคอนเซ็นเตรชันโพลาไรซ์เซชัน



ภาพที่ 3-6 ผลของปริมาตรของเพอมีเอตต่อค่าร้อยละความเข้มข้นของโปรตีน (a)NaCl (b) ที่น้ำปลาร้อยละ50(v/v) ความดัน 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

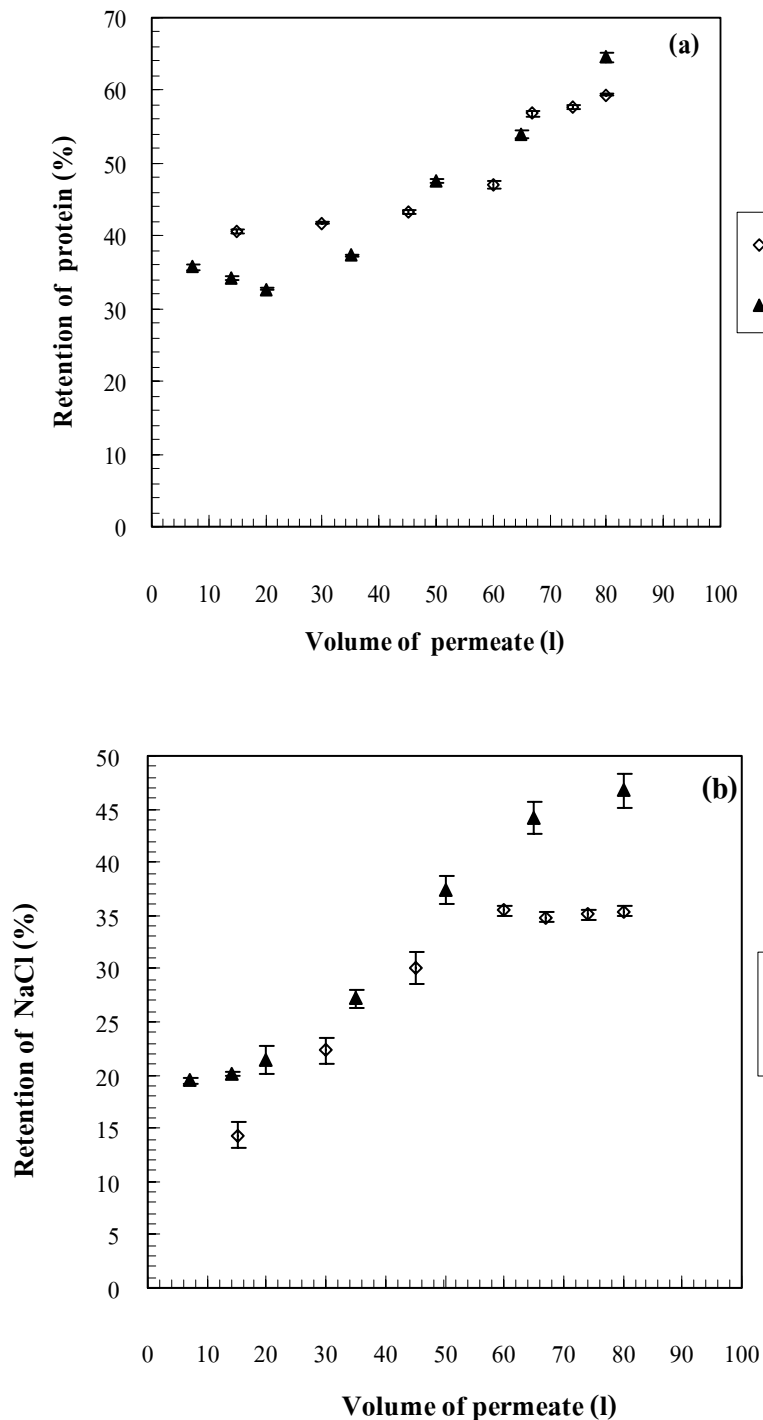
Figure 3-6 Effect of volume of permeate on concentration of protein (%) (a) NaCl (b) at 50% fish sauce TMP 10 bar, cross flow velocity 500 l/h and Temp.  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$



จากภาพที่ 3-6 แสดงร้อยละความเข้มข้นของโปรตีน (a) และ NaCl (b) ในสารป้อนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นและการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง พบว่าร้อยละความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนและ NaCl ในสารป้อนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นมีค่ามากกว่าการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 2.80, 11.20 และ 1.44, 9.48 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากการทำให้เข้มข้นก่อนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมีการแพร่ของอนุภาคโปรตีนและ NaCl ผ่านเยื่อมากกว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้น

เมื่อพิจารณาร้อยละความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl ในสารป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ในขั้นตอนการทำให้เข้มข้นทั้งก่อนและหลัง (แสดงดังภาพที่ 3-6) อันเนื่องมาจากการเมื่อปริมาตรในถังป้อนลดลงทำให้อัตราส่วนของความเข้มข้นในถังป้อนเพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl ในสารป้อนในขั้นตอนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องทั้งก่อนและหลังมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อปริมาตรของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น (แสดงดังภาพที่ 3-6) เป็นผลมาจากกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการที่มีการเติมน้ำลงในถังป้อนเท่ากับอัตราการไหลออกของเพอมีเอท อย่างต่อเนื่องซึ่งน้ำที่เติมลงไปนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวพาอนุภาคของโปรตีนและ NaCl ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเยื่อแพร่ผ่านเยื่อออกไปเรื่อยๆ ส่งผลให้ความเข้มข้นของโปรตีนและ NaCl ในถังป้อนลดลง

ภาพที่ 3-7 แสดงค่าการกักกันโปรตีน (a) และ NaCl (b) ของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นกับการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง พบว่าค่าการกักกันโปรตีนเฉลี่ยของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นมีค่ามากกว่า การทำให้เข้มข้น/ไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 49.50 และ 43.72 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากการทำให้เข้มข้นขึ้นก่อนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องเป็นสาเหตุให้โปรตีนแพร่ผ่านเยื่อมากกว่าการทำให้เข้มข้นขึ้นหลังกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง ส่วนค่าการกักกัน NaCl เฉลี่ยของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นมีค่าน้อยกว่าการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 29.76 และ 30.91 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากการทำไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องก่อนการทำให้เข้มข้นขึ้น น้ำที่เติมลงไป ในขั้นตอนการทำไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องจะเป็นตัวพาอนุภาคของ NaCl ให้แพร่ผ่านเยื่อได้มากกว่าการทำไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องหลังการทำให้เข้มข้นขึ้น เมื่อพิจารณาค่าการกักกันโปรตีนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นพบว่าค่าการกักกันโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือจากร้อยละ 40.58 เป็น



ภาพที่ 3-7 ผลของปริมาตรของเพอมีเอตต่อค่าการกักกัน โปรตีน (a) NaCl (b) ที่น้ำปลาร้อยละ 50(v/v) ความดันชั้นดပ် 10 bar ความเร็วตามขวาง 500 l/h และอุณหภูมิ  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Figure 3-7 Effect of volume of permeate on retention of protein (a) NaCl (b) at 50% fish sauce TMP 10 bar cross flow velocity 500 l/h and Temp.  $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$

47.03 ตามลำดับ ในขั้นตอนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องเป็นผลมาจากน้ำที่เติมลงไปอย่างต่อเนื่องของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องเป็นตัวพออนุภาคของโปรตีนที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนผ่านเมมเบรนไปยังส่วนเพอมีเอท ส่งผลให้เหลือเพียงโปรตีนที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนทำให้ค่าการกักกันโปรตีนสูงขึ้น ส่วนในขั้นตอนการทำให้เข้มข้นพบว่าค่าการกักกันโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือจากร้อยละ 47.03 เป็น 59.38 ตามลำดับ เป็นผลมาจากเมื่อปริมาตรในถังป้อนลดลงส่งผลให้เกิดคอนเซนเตรชันโพลารไรด์เซชันและฟาวลิ่งสูงขึ้น ทำให้โปรตีนแพร่ผ่านเมมเบรนได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าการกักกันโปรตีนเพิ่มขึ้น (บุชิตา, 2546) แสดงดังภาพที่ 3-7 (a) ส่วนค่าการกักกันโปรตีนของการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง พบว่าค่าการกักกันโปรตีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือจากร้อยละ 35.72 เป็น 32.69 ตามลำดับในขั้นตอนการทำให้เข้มข้น อันเนื่องมาจากเมื่อปริมาตรในถังป้อนลดลงทำให้ความเข้มข้นของโปรตีนในถังป้อนสูงขึ้นส่งผลให้การแพร่ผ่านเมมเบรนของโปรตีนที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนเพิ่มขึ้น ส่วนในขั้นตอนไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง พบว่าค่าการกักกันโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือจากร้อยละ 32.69 เป็น 64.55 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากน้ำที่เติมลงไปอย่างต่อเนื่องของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องเป็นตัวพออนุภาคของโปรตีนที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนผ่านเมมเบรนไปยังส่วนเพอมีเอท ส่งผลให้เหลือเพียงโปรตีนที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนและการทำให้เข้มข้นก่อนนั้นยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดคอนเซนเตรชันโพลารไรด์เซชันและฟาวลิ่งสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการกักกันโปรตีนสูงขึ้น

ส่วนค่าการกักกัน NaCl ของทั้งกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นกับการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 3-7 (b) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) จากร้อยละ 14.35 เป็น 35.38 และ 19.47 เป็น 46.79 ตามลำดับ จากภาพที่ 3-7 (b) พบว่าค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้นในขั้นตอนการทำให้เข้มข้นขึ้นทั้งก่อนและหลัง อันเนื่องมาจากเมื่อปริมาตรในถังป้อนลดลงเป็นผลทำให้ NaCl แพร่ผ่านเมมเบรนไปยังส่วนเพอมีเอทได้มากขึ้นแต่ในขณะเดียวกันความเข้มข้นของ NaCl ในถังป้อนก็เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สัดส่วนระหว่างความเข้มข้นในเพอมีเอทกับรีเทนเททมีค่าน้อยลงส่งผลให้ค่าการกักกันของ NaCl เพิ่มขึ้น ส่วนในขั้นตอนกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องทั้งก่อนและหลังมีค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากน้ำที่เติมลงไปอย่างต่อเนื่องของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องเป็นตัวพออนุภาคของ NaCl ออกจากเมมเบรนทำให้ค่าความเข้มข้นของ NaCl ในถังป้อนลดลงส่งผลให้อธิพลของประจุของเมมเบรนเข้ามาจับกับค่าการกักกัน NaCl มากขึ้น (Schaep *et al*, 1999) เป็นสาเหตุทำให้  $Cl^-$  (co-ions) ถูกผลักออก มีผลทำให้ค่าการกักกัน NaCl เพิ่มขึ้น (Ballet *et al*, 2004 ; Tsuru *et al*, 1998 )

เมื่อนำความเข้มข้นของโปรตีนและNaClในรีเทนเททท์ที่เหลือสุดท้ายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทดลองมาเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.4 (สำหรับทำให้เข้มข้น, BC) ต่อด้วยสมการที่ 3.6 (สำหรับกระบวนการไดอะฟิลเตรชัน, CDF) และการคำนวณ CDF (สมการที่ 3.6) ต่อด้วยการคำนวณ BC (สมการที่ 3.4) โดยสมมุติค่าการกักกันโปรตีนและNaClของลำดับขั้นตอนการทำ CDF/BC และ BC/CDF มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 43.14/57.98, 25.55/35.10 , 34.19/50.87 และ 20.31/38.90 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3-8

ตารางที่3-8 ความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนและNaClจากการทดลองและการคำนวณ

Table 3-8 Final concentration of protein and NaCl from experimental and calculation

Concentration (%w/v)	Calculation of concentration		Final concentration	
	CDF/BC	BC/CDF	CDF/BC	BC/CDF
Protein	3.83	3.64	2.80	1.44
NaCl	7.73	8.52	11.11	9.48

จากตารางที่ 3-8 พบว่าความเข้มข้นของNaClที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) อันเนื่องมาจากการคำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนและNaClของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นและการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องทำได้โดยการนำค่าการกักกันเฉลี่ยของโปรตีนและNaClของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นและการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องมาแทนค่าลงในสมการที่ 3-6 ส่งผลให้ความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนและNaClที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าความเข้มข้นสุดท้ายที่ได้จากการทดลอง

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าร้อยละความเข้มข้นสุดท้ายของโปรตีนของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นมีค่ามากกว่าการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือ 2.80 และ 1.44 ตามลำดับ ซึ่งประมาณสองเท่า ซึ่งจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง/การทำให้เข้มข้นมีความสามารถในการแยกNaClออกจากน้ำปลาและยังสามารถกักกันโปรตีนได้ดีกว่าการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง

#### 4. คุณสมบัติของน้ำปลาที่ได้จากกระบวนการไดอะฟิลเตรชันและทำให้เข้มข้นขึ้นเปรียบเทียบกับน้ำปลาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย

ตารางที่ 3-9 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำปลาที่ได้จากกระบวนการไดอะฟิลเตรชันและทำให้เข้มข้นขึ้นและน้ำปลาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย

Table 3-9 Properties of physical and chemical of fish sauce after separation NaCl and fish sauce of The Thai Industrial Standard

Properties	Fish sauce after CDF/BC	Top grade
Viscosity (mPa.s) at 25°C	0.89 ± 0.00	≥ 2.0
pH	5.63 ± 0.04	5.0-6.0
NaCl content (g/l)	10.19 ± 0.14	≥ 23
Total nitrogen (g-N/l)	4.62 ± 0.20	≥ 20
Amino nitrogen (g/l)	3.35 ± 0.25	≥ 10

จากตารางที่ 3-9 พบว่าปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดและไนโตรเจนจากกรดอะมิโนของน้ำปลาหลังจากแยก NaCl ออกโดยกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง (CDF) และทำให้เข้มข้นขึ้น (BC) มีค่าต่ำกว่าน้ำปลาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย ( $p < 0.05$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากเมมเบรนที่ใช้ในการแยก NaCl ออกจากน้ำปลาและทำให้เข้มข้นขึ้นมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่กว่าขนาดของโปรตีนในน้ำปลา ซึ่งโปรตีนในน้ำปลาส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกรดอะมิโน (Park *et al*, 2001) ซึ่งกรดอะมิโนส่วนใหญ่จะมีขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 200 Da ทำให้เมมเบรนไม่สามารถกักกันโปรตีนไว้ได้ทั้งหมด ส่วนค่าความหนืดของน้ำปลาหลังจากเอา NaCl ออกและทำให้เข้มข้นขึ้นมีค่าน้อยกว่าน้ำปลาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย 0.89 และ 1.12 mPa.s ตามลำดับ เป็นผลมาจากน้ำปลาหลังจากแยก NaCl ออกและทำให้เข้มข้นขึ้นมีอนุภาคของตัวถูกละลายอยู่น้อยกว่าน้ำปลาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 200 Da หรือมีค่าการกักกัน NaCl สูงๆ ดังตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 คุณสมบัติบางประการของเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันและบริษัทผู้ผลิต

Table 3-10 Some properties of nanofiltration membranes and manufacturer

Membrane	Manufacturer	MWCO or %NaCl retention (%concentration)
NF-40	Film Tec	180 Da
NF-45	Film Tec	200 Da
NF-270	Film Tec	200 Da
XP-45	Film Tec	75 (0.2)
SC-L100	Toray	75 (0.2)
UTC-20	Toray	180 Da
UTC-60	Toray	85 (0.1)
TFC-SR1	Koch	88 (0.1)
TFC-SR2	Koch	95 (0.1)

ที่มา : Tsui และ Cheryan (2004) ; Raman และคณะ (1994)

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกNaClออกจากน้ำปลาด้วยกระบวนการไดอะฟิลเตรชันเมมเบรน โดยทำการศึกษาถึงผลของรูปแบบกระบวนการไดอะฟิลเตรชันและลำดับชั้นของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันและการทำให้เข้มข้นต่อค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทและค่าการกักกันโปรตีนและNaCl จากผลการทดลองและวิจารณ์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องให้โปรตีนเข้มข้นสูงกว่าแบบไม่ต่อเนื่อง แต่ค่าการกักกันNaClและค่าฟลักซ์เฉลี่ยของเพอมีเอทของกระบวนการไดอะฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องต่ำกว่าแบบไม่ต่อเนื่อง

2. ลำดับชั้นของกระบวนการไดอะฟิลเตรชัน/การทำให้เข้มข้นให้โปรตีนและNaCl และฟลักซ์ของเพอมีเอทสูงกว่าการทำให้เข้มข้น/กระบวนการไดอะฟิลเตรชัน

3. น้ำปลาหลังจากแยกNaClออกและทำให้เข้มข้นขึ้นมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและอะมิโนไนโตรเจนต่ำกว่าน้ำปลาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

4. จากความรู้ที่ได้จากการทดลอง พบว่าถ้าต้องการแยกNaClออกและเพิ่มความเข้มข้นโปรตีนให้สูงขึ้นทำได้โดยใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 200 Da และใช้กระบวนการไดอะฟิลเตรชันก่อนการทำให้เข้มข้นขึ้นแบบกะ

## เอกสารอ้างอิง

- กินเค็มหรือขปากแต่ลำบากร่างกาย (ออนไลน์). 2005. สืบค้นจาก : <http://www.thaihealth.info/nutrition18.asp> (14 พฤศจิกายน 2548)
- นิธิยา รัตนปนนท์ และ วิบูลย์ รัตนปนนท์, 2537. โภชนศาสตร์เบื้องต้น โอเคียนสโตร์ กทม. หน้า 118-119.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2526. น้ำปลาพื้นเมือง. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- บุษิตา ตันจะโนคม, 2546. การเพิ่มความเข้มข้นโปรตีนและการลดปริมาณเกลือในน้ำนึ่งปลาโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไดอะฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- AOAC. 2000. Official Methods of Analytical Chemists. 17<sup>th</sup>ed. The Association of Official Analytical Chemists. Verginia.
- Ballet, T.G., Gzara, L., Hafiane, A. and Dhahbi, M. 2004. Transport coefficients and cadmium salt rejection in nanofiltration membrane. Desalination. 167 : 369-376.
- Dutre, B. and Tragardh, G. 1994. Macrosolute-microsolute separation by ultrafiltration: A review of diafiltration processes and applications. Desalination. 95 : 227-267.
- Foley, G. and Garcia, J. 2000. Ultrafiltration flux theory based on viscosity and osmotic effects: application to diafiltration optimization. J. Membr. Sci. 176 : 55-61.
- Ghosh, R., Sudarshana, S. and Cui, Z. 2000. Lysozyme separation by hollow-fiber ultrafiltration. J. Biochem. 6 : 19-24.
- 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.
- Limayem, I., Charcosset, C. and Fessi, H. 2004. Purification of nanoparticle suspensions by a concentration/diafiltration process. Sep. Purif. Technol. 38 : 1-9.
- Lipnizki, F., Boelsmand, J. and Madsen, R.F. 2002. Concepts of industrial-scale diafiltration systems. Desalination. 144 : 179-184.
- Lopetcharat, K., Choi, Y.J., Park, J.W. and Daeschel, M.A. 2001. Fish sauce products and manufacturing ; a review. Food Reviews International. 17 : 65-68.

- Lopetcharat, K. and Pank, J.W. 2002. Characteristics of fish sauce made from pacific whiting and surimi by products during fermentation stage. *Food Che. Toxi.* 67 : 511-516.
- Morison, K.R. and She, X. 2003. Optimisation and graphical representation of multi-stage membrane plants. *J. Membr. Sci.* 211 : 59-70.
- Muller, A., Daufin, G. and Cjaufer, B. 1999. Ultrafiltration mode of operation for the separation of  $\alpha$ -lactalbumin from acid casein whey. *J. Membr. Sci.* 153 : 9-21.
- Park, J.N., Fukumotor, F. Fujita, E., Tanaka, T., Washio, T., Otsuka, S., Shmizu, T., Watanabe, K. and Abe, H. 2001. Chemical composition of fish sauces produced in southeast and East Asian countries. *J. Food Comp. Anal.* 14:113-125.
- Raman, L.P., Cheryan, M. and Rajagopalan, N. 1994. Consider nanofiltration for membrane separations. *Chem. Eng. Progress.* 90 : 68-74.
- Schaep, J., Vandecasteele, C., Mohammad, A.W. and Bowen, W.R. 1999. Analysis of the salt retention of nanofiltration membranes using the Donnan-Steric Partitioning Pore Model. *Sep. Sci. Technol.* 34 : 3009-3030.
- Schwartz, L. 2006. Diafiltration : A Fast, Efficient Method for Desalting, or Buffer Exchange of Biological Samples PN 33289. (ออนไลน์) สืบค้นจาก : <http://www.pall.com> (1 เมษายน 2549)
- Schwartz, L. 2006. Desalting and buffer exchange by dialysis, gel filtration or diafiltration. *Life sciences* PN 33290. (ออนไลน์) สืบค้นจาก : <http://www.pall.com> (1 เมษายน 2549)
- Simon, A., Vandanjon, L., Levesque, G. and Bourseau, P. 2002. Concentration and desalination Of fish gelatin by ultrafiltration and continuous diafiltration processes. *Desalination.* 144 : 313-318.
- Tanistra, I. and Bodzek, M. 1998. Preparation of high-purity sulphate lignin from spent black liquor using ultrafiltration and diafiltration processes. *Desalination.* 115 : 111-120.
- Thongthai, C. and Suntinalert, P. 1991. Halophiles in Thai fish sauce (NamPla). *In F. Rodriguez-Valera (ed.), General and Applied Aspects of Halophilic Microorganism, Plenum Press, New York, pp. 381-388.*
- Tsui, E.M. and Cheryan, M. 2004. Characteristics of nanofiltration membranes in aqueous ethanol. *J. Membr. Sci.* 237 : 61-69.
- Tsuru, T., Takezoe, H. and Asaeda, M. 1998. Ion separation by porous silica-zirconia nanofiltration membranes. *AICHE J.* 44 : 765-768.



- Vikbjerg, A.F., Jonsson, G., Mu, H. and Xu, X. 2006. Application of ultrafiltration membranes for purification of structured phospholipids produced by lipase-catalyzed acidolysis. *Sep. Purif. Technol.* 50 : 184-194.
- 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.
- Zhang, G., Liu, Z., Zhao, L. Li, H., Zhou, Q., He, F., Xu, Z. and Wang, H. 2003. Recovery of glutamic acid from ultrafiltration concentrate using diafiltration with isoelectric supernatants. *Desalination.* 154 : 17-26.