การปรับปรุงคุณสมบัติชอบน้ำของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน PES ด้วย Al_2O_3 เพื่อลดการเกิดฟาวลิง

HYDROPHILIC MODIFICATION OF PES ULTRAFILTRATION MEMBRANE FOR FOULING REDUCTION

ปิ่นนภา หาญณรงค์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail : pinnapa_harnna@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำของเยื่อแผ่น Polyethersulfone (PES) ด้วย Al_2O_3 เพื่อลดการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นได้ถูกเตรียมโดยวิธีการเปลี่ยนเฟสและเพิ่มความชอบน้ำด้วย 2 วิธีคือ 1) วิธีผสม Al_2O_3 กับ PES ในขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่นโดยวิธีการเปลี่ยนเฟสและ 2) การเคลือบผิวเยื่อแผ่น PES ด้วย Al_2O_3 ผลการทดลองพบว่า เยื่อแผ่นที่เพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำทั้ง 2 วิธี มีค่าฟลักซ์ ความชอบน้ำ และความสามารถในการป้องกันการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นสูงกว่าเยื่อแผ่น PES และการเพิ่มความเข้มข้นของ Al_2O_3 ก็จะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ ความชอบน้ำ และความสามารถในการป้องกันการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกัน เยื่อแผ่นที่เพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำด้วยวิธีการเคลือบผิวเกิดฟาวลิงของโปรตีนต่ำกว่า แต่มีค่าฟลักซ์น้ำและฟลักซ์สารละลายโปรตีนต่ำกว่าเยื่อแผ่นที่เพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำด้วยวิธีการผสม

คำสำคัญ : คุณสมบัติชอบน้ำ, โพลิอีเทอร์ซัลโฟน, วิธีการเปลี่ยนเฟส, อลูมินา, อัลตราฟิลเตรชัน,

ABSTRACT

This research was purposed to improve hydrophilicity of polyethersulfone (PES) membrane with alumina (Al_2O_3) for reducing membrane fouling. The membranes were prepared by phase inversion method and increased hydrophilicity by 2 methods; 1) mixing of Al_2O_3 with PES in the step of preparing membrane by phase inversion and 2) coating of PES membrane with Al_2O_3. It was found that fluxes, hydrophilicity and antifouling properties of membranes improved hydrophilicity by both methods were higher than pure PES membrane. An increase of Al_2O_3 concentration resulted in increasing of fluxes, hydrophilicity and antifouling properties of membrane. Increased hydrophilicity of membrane by coating method resulted in membrane with lower protein fouling but lower water and protein fluxes than membrane increased hydrophilicity by mixing methods.

KEYWORDS : Hydrophilicity, Polyethersulfone (PES), Phase inversion method, alumina (Al_2O_3), Ultrafiltration

1. บทนำ

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการเยื่อแผ่นสังเคราะห์ประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการแยกในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์นม เครื่องดื่ม เป็นต้น แต่ปัญหาสำคัญที่พบในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน คือ การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, CP) และการเกิดฟาวลิง (Fouling) ซึ่งอาจเกิดมาจากการดูดซับ (adsorption) การรวมตัวเป็นกลุ่มของอนุภาคหรือการอุดตันรูพรุน (pore plugging) ของตัวถูกละลายหรืออนุภาคทั้งภายในรูพรุนและผิวหน้าเยื่อแผ่น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างต่อเนื่องขณะดำเนินการ และทำให้ต้องทำความสะอาดเยื่อแผ่นบ่อย ส่งผลให้เยื่อแผ่นมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นการลดการเกิดฟาวลิงจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องให้ความสนใจ ซึ่งทางเลือกในการลดการเกิดฟาวลิงสามารถทำได้โดย การเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสม การเพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำของเยื่อแผ่นโดยการเติมสารตัวเติมที่ชอบน้ำหรือการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่น

Guiping และคณะ (2008 : 7080–7086) ผลิตเยื่อแผ่น Polyethersulfone (PES) และเยื่อแผ่นผสม PES/TiO_2 ด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส สารละลายโพลิเมอร์ประกอบด้วย PES 15 %wt. และ TiO_2 (0, 0.3, 0.5, 0.7 %wt.) ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณ TiO_2 ทำให้คุณสมบัติชอบน้ำ และความต้านทานการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น และเยื่อแผ่น PES/TiO_2 ที่มีความเข้มข้น TiO_2 0.5 %wt. มีคุณสมบัติในการป้องกันการเกิดฟาวลิงมากกว่าที่ความเข้มข้นอื่น เนื่องจากเยื่อแผ่น PES ที่มี TiO_2 มากกว่า 0.5 %wt. จะทำให้โครงสร้างชั้นรูพรุนของเยื่อแผ่นลดลง ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติการป้องกันการเกิดฟาวลิงลดลง

Yan, Li, Xiang (2005 : 7701–7706) ได้ทำการเตรียมเยื่อแผ่นโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส (phase inversion method)จาก poly(vinylidene fluoride) (PVDF) 19 wt.% ผสมอนุภาคอลูมินา (Al_2O_3) 0-4 wt.% ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ผลการวิจัย พบว่า การเพิ่มปริมาณ Al_2O_3 ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความพรุน การกักกัน และ Molecular Weight Cut-off (MWCO) ของเยื่อแผ่น แต่จะทำให้ค่า contact angle ลดลง (ชอบน้ำมากขึ้น) เมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสม Al_2O_3 โดยค่า contact angle จะมีค่าต่ำสุด ที่ความเข้มข้นของ Al_2O_3 เท่ากับ 2 %wt ซึ่งส่งผลให้ค่าฟลักซ์น้ำมีค่าสูงที่สุด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติเยื่อแผ่นที่ผลิตจาก PES ด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟสโดยศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเยื่อแผ่นด้วยการใช้สารตัวเติมที่มีคุณสมบัติชอบน้ำคือ Al_2O_3 เปรียบเทียบกับวิธีการเคลือบผิวหน้าเยื่อแผ่น PES ด้วย Al_2O_3 เพื่อลดการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่น PES

2.วิธีการทดลอง

2.1 สารเคมี

Polyethersulfone (PES) จากบริษัท Udel รุ่น A-100, Alumina (Al_2O_3) < 10 micron ของบริษัท Aldrich, Dimethylacetamide (DMAC), Density = 0.942 g/cm^3 ของบริษัท Fluka, Polyvinylpyrrolidone (PVP) น้ำหนักโมเลกุล 100 kDa บริษัท Merck, Polyethylene glycol (PEG) น้ำหนักโมเลกุล 4, 15, 35, 100 และ 400 kDa และโปรตีน Bovine serum albumin (BSA) จากบริษัท Fluka

2.2 การเตรียมเยื่อแผ่น

2.2.1 วิธีการผสม PES/ Al_2O_3

เตรียมสารละลายโพลิเมอร์โดยนำ PES ผสมกับ Al_2O_3 ละลายใน DMAC ปริมาตร 30 ml ตามสัดส่วนในตาราง 1 (Yan, Li และ Xiang, 2005; Yang และคณะ,2007) กวนสารละลายโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง (25 ^{o}C) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วทิ้งไว้เพื่อให้ฟองสลายไปเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการคาสท์สารละลายพอลิเมอร์ลงบนแผ่นกระจกขนาด 11.8 cm x 17 cm ด้วยมีดคาสท์ที่ปรับความหนาไว้ที่ 200 μm แล้วจุ่มเยื่อแผ่นพร้อมแผ่นกระจกลงในอ่างน้ำ RO ทันที การจุ่มในอ่างแรกนี้ใช้เวลา 2 นาที จากนั้นย้ายเยื่อแผ่นไปแช่ในน้ำ RO อ่างที่สองเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เยื่อแผ่นที่เตรียมได้มีความหนาอยู่ที่ 110-120 μm เก็บเยื่อแผ่นในน้ำกลั่นเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติ

ตาราง 1 ส่วนประกอบสารละลายโพลิเมอร์สำหรับเยื่อแผ่น PES/Al_2O_3 ที่เตรียมโดยวิธีผสม

PES (%wt)	Al_2O_3 (%wt)	PVP (%wt)	DMAC (%wt)
18	0	2	80
18	2	2	78
18	4	2	76
18	6	2	74

2.2.2 วิธีการเคลือบผิวเยื่อแผ่น

ในการเคลือบ Al_2O_3 บนเยื่อแผ่น PES นั้นจะใช้สารละลายไคโตซานเป็นตัวยึดให้ Al_2O_3 ติดผิวหน้าเยื่อแผ่นโดยมีวิธีการดังนี้ เตรียมเยื่อแผ่น PES ด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส โดยใช้ความเข้มข้นของ PES 15 %wt., PVP 2%wt. และ DMAC 83 %wt. ต่อจากนั้นเตรียมสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้น 0.2 %w/v ในกรดอะซิติกเข้มข้น 2 %vol เติม Al_2O_3 ปริมาณ 0, 0.0198, 0.0408 และ 0.0628 g ในสารละลายไคโตซาน (ปริมาณเท่ากับปริมาณของ Al_2O_3 ที่อยู่ในเยื่อแผ่นที่เตรียมโดยวิธีการผสมที่ 0, 2, 4 และ 6%wt ตามลำดับ) กวนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำสารละลายผสม Al_2O_3 เคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วยการป้อนสารละลายผ่านเยื่อแผ่นโดยใช้ vacuum pump เป็นเวลา 15 นาที ต่อมานำเยื่อแผ่นที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย Al_2O_3 ไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการ neutralize ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 M เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำให้สารละลายไคโตซานมีสภาพเป็นกลาง ล้างเยื่อแผ่นด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำเยื่อแผ่นที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติ

2.3 การทดสอบคุณสมบัติเยื่อแผ่น

2.3.1 การวัดฟลักซ์น้ำ

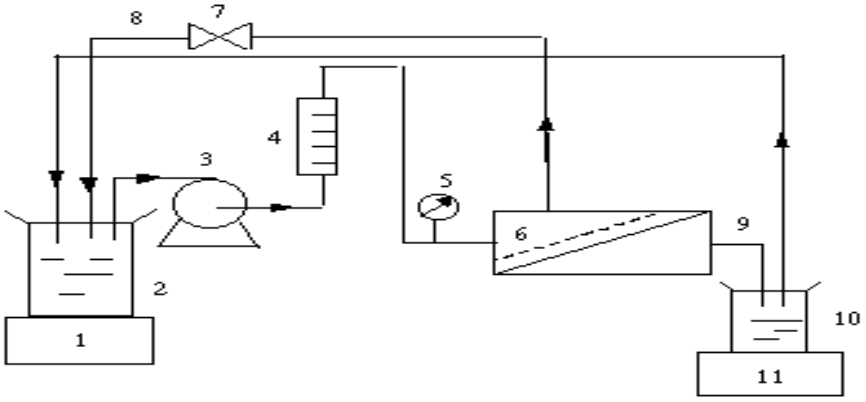
นำเยื่อแผ่นที่ผลิตได้ไปติดตั้งในชุดการทดลองอัลตราฟิลเตรชันดังภาพประกอบ 1 เติมน้ำในถังป้อนปริมาตร 2 ลิตร เดินเครื่อง แล้วปรับวาล์วให้ได้อัตราการไหลของสารป้อน 0.877 L/min และความดัน 2 bar ที่อุณหภูมิ 25 °C วัดอัตราการไหลของเพอมิเอท (โดยวัดปริมาตร/เวลา) ทุก 5 min บันทึกผล จนกระทั่งฟลักซ์เข้าสู่สภาวะคงตัว

2.3.2 หาค่า Molecular Weight Cut-off (MWCO)

เตรียมสารละลายที่จะนำมาใช้ทดสอบหาค่า MWCO ตามคู่มือการใช้คอลัมน์ Phenomenex GPC-4000 โดยใช้ Polyethylene glycol (PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4, 15 และ 35 kDa ละลายในน้ำ DI ที่ความเข้มข้นของแต่ละสาร 0.5 %w/v และขนาด 100 และ 400 kDa ที่ความเข้มข้นละ 0.25 %w/v (ความเข้มข้นของ PEG รวม 2 %w/v) ทำการหา MWCO ของเยื่อแผ่นที่เตรียมได้โดยป้อนสารละลาย PEG ผ่านเยื่อแผ่นที่บรรจุในชุดการทดลองดังภาพประกอบ 1 โดยป้อนแบบวนกลับถังป้อนทั้งรีเทนเททและเพอมิเอท เพื่อควบคุมความเข้มข้นในถังป้อนให้คงที่ (โดยใช้สภาวะการทดลองเดียวกันกับการทดลองวัดฟลักซ์น้ำ) รอจนกระทั่งค่าฟลักซ์คงที่เก็บตัวอย่างสารละลาย เพอมิเอทที่ได้ไปหาความเข้มข้นของ PEG โดยใช้ เครื่อง HPLC ยี่ห้อ Water 2414 ต่อกับคอลัมน์ Phenomenex GPC-4000 นำค่าความเข้มข้นที่ได้มาคำนวณค่าการกักกัน ตามสมการที่ (1) ซึ่งค่า MWCO เป็นค่าขนาดโมเลกุลที่สามารถกักกันได้เกิน 90 %

$$R = (1 - \frac{C_p}{C_r}) \times 100 \qquad (1)$$

R คือ ค่าการกักกัน C_p คือ ความเข้มข้นด้านเพอมิเอท และ C_r คือ ความเข้มข้นด้านรีเทนเทท



ภาพประกอบ 1 ชุดการทดลองอัลตราฟิลเตรชัน (1) เครื่องกวนสาร (2) ถังป้อน (3) ปั๊ม (4) เครื่องวัดอัตราการไหล (5) เกจวัดความดัน (6) โมดูลเยื่อแผ่นแบบ radial flow (7) วาล์วควบคุมแรงดัน (8) ท่อรีเทนเทท (9) ท่อเพอมิเอท (10) ถังเพอมิเอท

2.3.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเยื่อแผ่นที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง SEM ยี่ห้อ LEO รุ่น1455VP

2.3.4 การวัดค่ามุมสัมผัสพื้นผิว (Contact angle)

นำเยื่อแผ่นมาตรวจสอบลักษณะมุมสัมผัสพื้นผิวด้วยเครื่อง contact angle measurement ยี่ห้อ Kruss รุ่น DSA 10 MK 2

2.3.5 การทดสอบฟาวลิง

เตรียมสารละลายโปรตีน BSA 1 g/L ในสารละลาย phosphate buffer saline ติดตั้งเยื่อแผ่นในชุดการทดลองภาพประกอบ 1 ป้อนสารละลายโปรตีนแบบวนกลับ (โดยใช้สภาวะการทดลองเดียวกันกับการทดลองวัดฟลักซ์น้ำ) เป็นเวลา 150 min เก็บตัวอย่างด้านเพอมิเอทและรีเทนเททไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโปรตีนโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi โมเดล U-3000 ใช้ความยาวคลื่น 280 nm

ทำการล้างเยื่อแผ่นด้วยน้ำ DI ที่สภาวะการทดลองเดียวกับสภาวะการทดลองวัดฟลักซ์น้ำ โดยป้อนน้ำแบบไม่วนกลับถังป้อนด้วยปริมาตรน้ำล้าง 4 L และป้อนแบบวนกลับถังป้อน 30 min จากนั้นวัดฟลักซ์น้ำหลังล้างเยื่อแผ่น

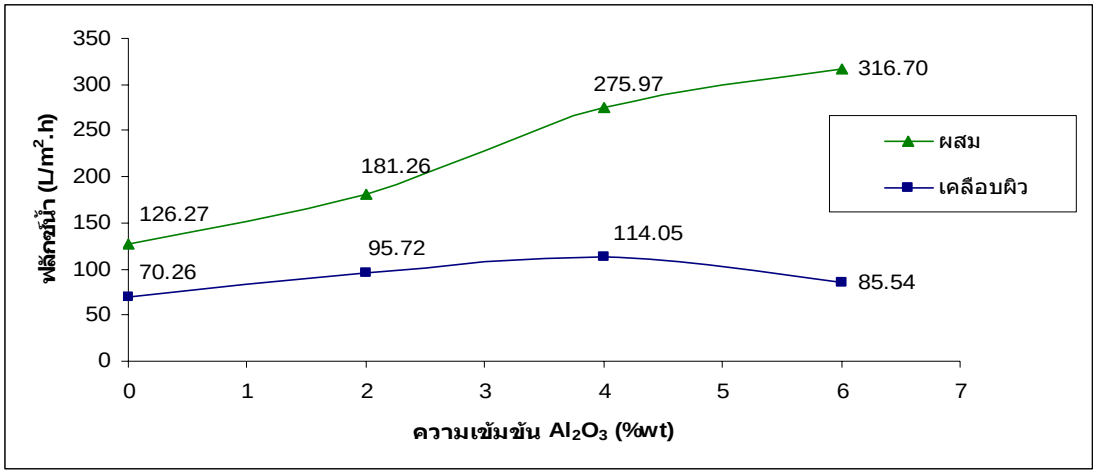
3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

3.1 ฟลักซ์น้ำ

ฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่น PES ที่ผสม Al_2O_3 มีค่าฟลักซ์สูงขึ้น เมื่อปริมาณ Al_2O_3 เพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 2 เนื่องจาก Al_2O_3 เป็นสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำจึงทำให้ PES ที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ มีคุณสมบัติชอบน้ำมากขึ้น ค่าฟลักซ์น้ำจึงเพิ่มขึ้น (Yan, Li และ Xiang, 2005 : 7701–7706 ; Li และคณะ,2009 : 4725–4732)

สำหรับวิธีการเคลือบผิวเยื่อแผ่น PES ด้วย Al_2O_3 ในสารละลายไคโตซานนั้น เยื่อแผ่น PES เริ่มต้น มีค่าฟลักซ์น้ำเท่ากับ 672.10 $L/m^2.h$ หลังจากเคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซาน พบว่า ค่าฟลักซ์น้ำมีค่าลดลงเท่ากับ 70.26 $L/m^2.h$ เนื่องจากเป็นผลของชั้นฟิล์มไคโตซานที่ไปปิดกั้นชั้นผิวของเยื่อแผ่น ทำให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลสูงขึ้น จึงทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระหว่างเยื่อแผ่นที่ปรับคุณสมบัติโดยการเคลือบผิว พบว่า เมื่อปริมาณ Al_2O_3 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก เป็นผลจากคุณสมบัติชอบน้ำของ Al_2O_3 แต่ฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นที่เคลือบผิวกลับมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Al_2O_3 เพิ่มขึ้นถึง 6 %wt อาจเนื่องจากปริมาณ Al_2O_3 ติดอยู่บนชั้นผิวหน้าหนาเกินไปส่งผลให้น้ำแพร่ผ่านได้ยากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมกับวิธีการเคลือบ พบว่าวิธีการผสม Al_2O_3 ในสารละลายโพลิเมอร์ PES จะให้ค่า ฟลักซ์น้ำที่สูงกว่าการเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย Al_2O_3 เนื่องจากการเคลือบผิวบนเยื่อแผ่นทำให้ชั้นผิวมีความหนาขึ้น ทำให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลสูงขึ้น ซึ่งต่างจากวิธีการผสมซึ่งไม่มีชั้นฟิล์มของสารไปปิดกั้นชั้นผิวของเยื่อแผ่นทำให้น้ำผ่านได้มากกว่า ดังภาพประกอบ 3



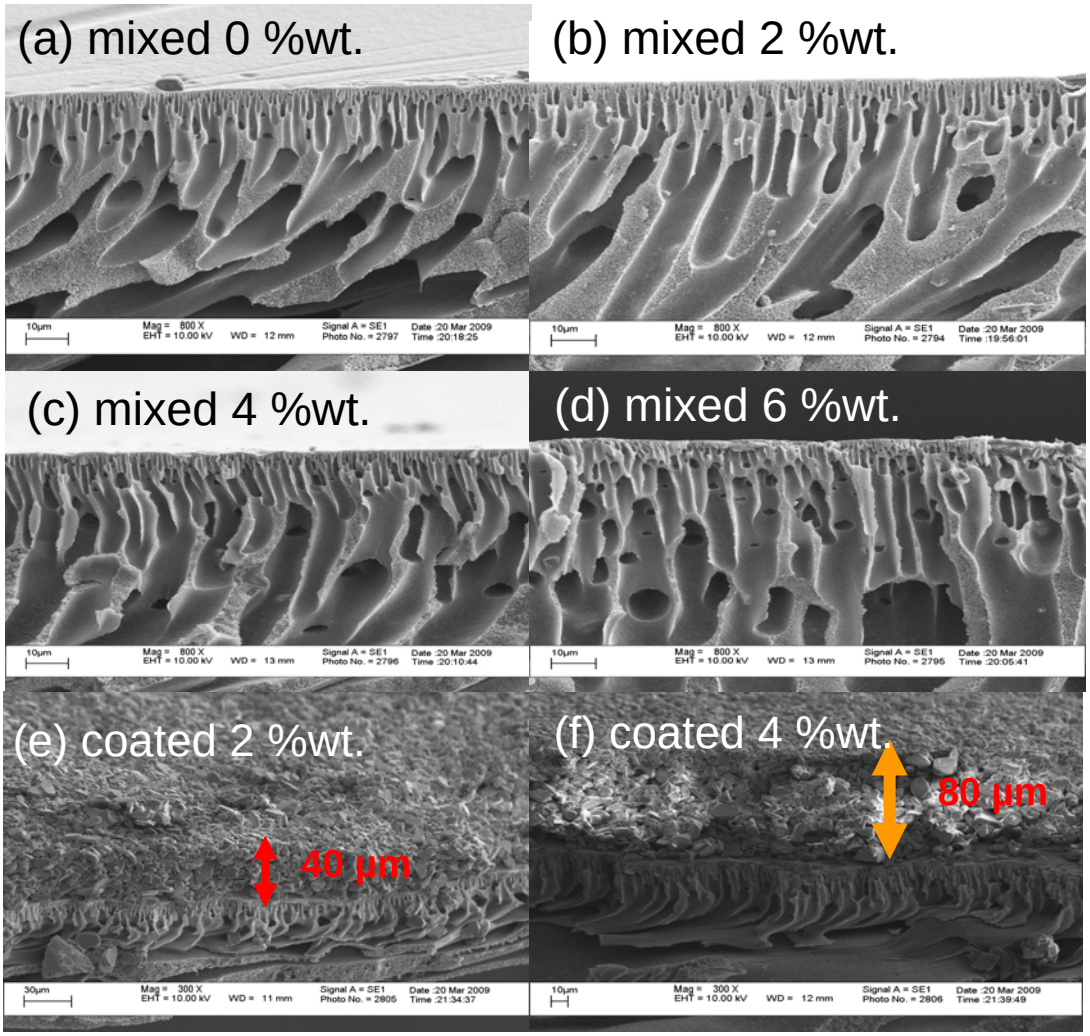
ภาพประกอบ 2 ฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นที่สภาวะคงที่เทียบกับความเข้มข้น Al_2O_3
(ค่าที่ได้ในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองวัดฟลักซ์ของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด ชนิดละ 3 แผ่น)

3.2 ค่า Molecular Weight Cut-Off (MWCO)

กรณีผสม Al_2O_3 ในขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่นด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส พบว่าเยื่อแผ่นที่มี Al_2O_3 ผสมอยู่ 0, 2, 4 และ 6 %wt มีค่า MWCO เท่ากับ 11.7, 11.6, 11.5, 11.3 kDa ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม Al_2O_3

ไม่ทำให้ MWCO เปลี่ยนแปลง เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนของเยื่อแผ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังภาพประกอบ 3(a-d) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yan, Li และ Xiang, 2005 : 7701–7706

กรณีวิธีการเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย Al_2O_3 ในสารละลายไคโตซาน เยื่อแผ่นที่นำมาใช้มี MWCO 90 kDa หลังจากเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย Al_2O_3 ผสมสารละลายไคโตซาน ที่ความเข้มข้น 0, 2, 4 และ 6 %wt พบว่าค่า MWCO มีแนวโน้มลดลงเป็น 50, 18, 13 และ 5 kDa ตามลำดับ เนื่องจากชั้นผิวที่เคลือบ Al_2O_3 มีความหนาแน่นมากขึ้น ดังภาพประกอบ 3e และ 3f จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเคลือบ Al_2O_3 ที่ 2 %wt. ชั้นฟิล์ม Al_2O_3 มีความหนา 40 μm และเมื่อทำการเคลือบที่ 6%wt. ชั้นฟิล์ม Al_2O_3 มีความหนา 80 μm แต่จากผลของฟลักซ์น้ำซึ่งเพิ่มขึ้นในช่วงแรกที่เพิ่มความเข้มข้นของ Al_2O_3 ในขณะที่ MWCO มีค่าลดลง แสดงว่าค่าความชอบน้ำของเยื่อแผ่นน่าจะมีผลต่อฟลักซ์ของน้ำสูง

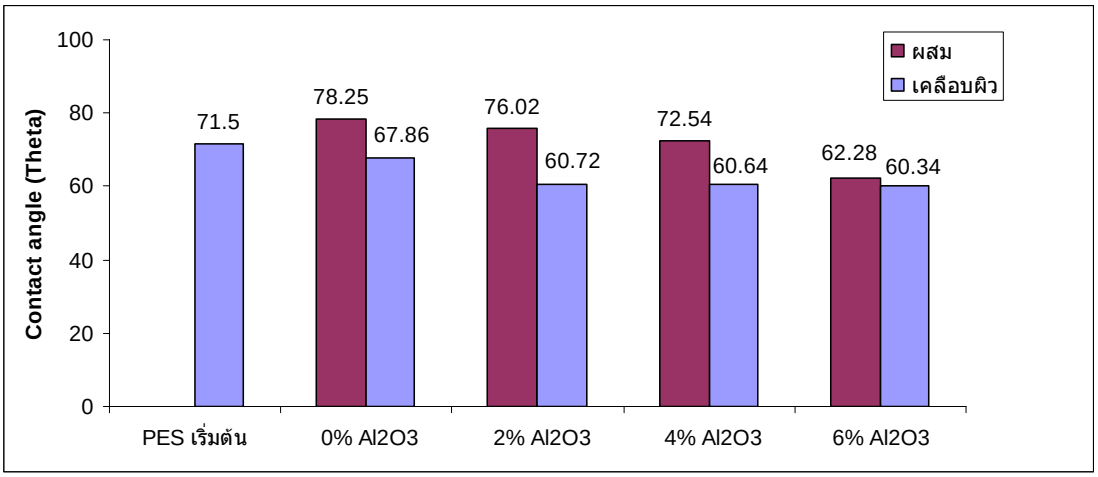


ภาพประกอบ 3 ลักษณะภาพตัดขวางของเยื่อแผ่นที่เตรียมจากการผสม Al_2O_3 ในขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่น (a-d), ลักษณะภาพตัดขวางของเยื่อแผ่นที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบผิวด้วย Al_2O_3 ในสารละลายไคโตซาน (e-f)

3.3 ค่า Contact Angle

กรณีเยื่อแผ่นที่ผสม Al_2O_3 ในขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่น พบว่าค่า contact angle มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสม Al_2O_3 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Al_2O_3 ก็ยิ่งทำให้ค่า contact angle ลดลง (ภาพประกอบ 4) ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าเยื่อแผ่นมีความชอบน้ำมากขึ้น (Yan, Li และ Xiang, 2005 : 7701–7706; Yang และคณะ, 2007 : 231 – 238)

การเคลือบผิวเยื่อแผ่น PES ด้วยสารละลายไคโตซานเพียงอย่างเดียวโดยไม่ผสม Al_2O_3 ก็ส่งผลให้ค่า contact angle ลดลง (ภาพประกอบ 4) เนื่องจากไคโตซานเป็นสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ และเมื่อเติม Al_2O_3 ในการเคลือบผิวด้วยความเข้มข้น 2 %wt จะส่งผลให้ค่า contact angle มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยไคโตซาน เพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในภาพประกอบ 4 เนื่องจาก Al_2O_3 เป็นสารที่มีความชอบน้ำเช่นเดียวกับไคโตซาน เมื่อนำ Al_2O_3 มาผสมในไคโตซานแล้วเคลือบผิวเยื่อแผ่น ก็ยิ่งทำให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ Al_2O_3 มากขึ้นไปอีก จะพบว่าค่า contact angle ค่อนข้างคงที่เพราะมีปริมาณ Al_2O_3 บนผิวเยื่อแผ่นมีมากเกินพอ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า contact angle ที่ได้จากวิธีการผสมและวิธีการเคลือบผิว จากภาพประกอบ 4 จะเห็นได้ว่าค่า contact angle ที่ได้จากวิธีการผสมมีค่าสูงกว่าวิธีการเคลือบผิว เนื่องจากวิธีการผสมนั้น Al_2O_3 กระจายตัวทั่วเยื่อแผ่นทั้งบริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุน ส่วนวิธีการเคลือบผิวนั้นทำให้เกิดชั้นฟิล์มของ Al_2O_3 บริเวณผิวด้านบนของเยื่อแผ่น จึงทำให้เยื่อแผ่นที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่า contact angle ต่ำกว่า ส่งผลให้เยื่อแผ่นที่ผ่านการเคลือบผิวมีความชอบน้ำสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ได้จากการผสม



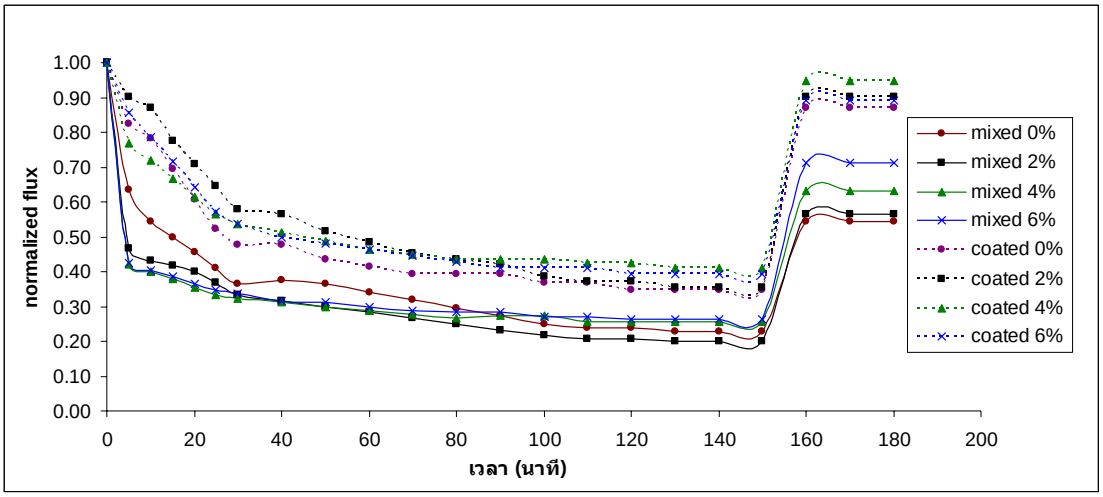
ภาพประกอบ 4 ค่า contact angle ของเยื่อแผ่น PES/Al_2O_3 ที่เตรียมโดยการผสมและการเคลือบผิว (ข้อมูลที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดค่า contact angle ของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด ชนิดละ 3 แผ่น)

3.4 ผลการทดสอบฟาวลิง

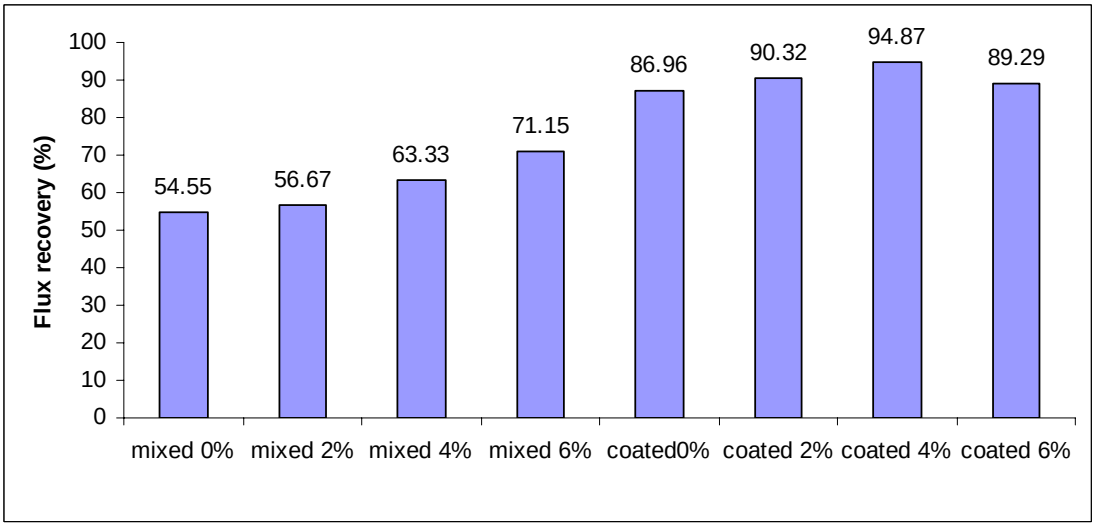
จากภาพประกอบ 5 จะเห็นได้ชัดเจนว่า เยื่อแผ่นที่ปรับคุณสมบัติโดยการเคลือบผิวมีการลดลงของฟลักซ์สารละลายโปรตีนน้อยกว่าวิธีการผสม ถึงแม้ว่าจะเคลือบด้วยไคโตซานเพียงอย่างเดียวก็ยังทำให้ค่าการลดลงของฟลักซ์สารละลายโปรตีนลดลงน้อยกว่าวิธีการผสม แสดงให้เห็นว่า วิธีการเคลือบผิว สามารถต้านทาน

การเกิดฟาวลิง ได้ดีกว่าวิธีการผสม และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของโปรตีนกับการเพิ่มความเข้มข้น Al_2O_3 จากทั้ง 2 วิธี พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้น Al_2O_3 ส่งผลให้การลดลงของฟลักซ์โปรตีนลดลง แต่ที่ความเข้มข้นของ Al_2O_3 เท่ากับ 4 และ 6 %wt ฟลักซ์มีค่าการลดลงใกล้เคียงกัน

จากภาพประกอบ 6 เมื่อวัดฟลักซ์น้ำหลังล้างเยื่อแผ่นพบว่า วิธีการเคลือบผิวให้ค่า flux recovery (FR) ของน้ำสูงกว่าวิธีการผสม ซึ่งบอกได้ว่าวิธีการเคลือบผิวมีคุณสมบัติในการนำกลับมาใช้ใหม่ของเยื่อแผ่นได้ดีกว่าวิธีการผสม เนื่องจากวิธีการเคลือบผิวมีความชอบน้ำมากกว่าวิธีการผสม (Ma และคณะ, 2007 : 71–78) และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณของ Al_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นกับค่า FR พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Al_2O_3 มากขึ้น จะส่งผลให้ค่า FR สูงขึ้น โดยวิธีการผสมที่ปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับ 6%wt และวิธีการเคลือบผิวที่ปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับ 4 %wt จะให้ค่า FR สูงสุด



ภาพประกอบ 5 ค่า normalized flux ของเยื่อแผ่นชนิดต่างๆ
(ค่าที่ได้ในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองวัดฟลักซ์ของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด ชนิดละ 3 แผ่น)



ภาพประกอบ 6 ค่า flux recovery ของเยื่อแผ่นชนิดต่างๆ
(ข้อมูลที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด ชนิดละ 3 แผ่น)

4. สรุปผลการทดลอง

การปรับคุณสมบัติเยื่อแผ่น PES ให้มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) เพื่อลดการเกิดฟาวลิงโดยใช้ Al_2O_3 โดยเปรียบเทียบวิธีในการปรับคุณสมบัติชอบน้ำ 2 วิธีคือ วิธีผสม Al_2O_3 ในขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่นด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส และการเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย Al_2O_3 ในสารละลายไคโตซาน พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Al_2O_3 ส่งผลให้ค่าฟลักซ์น้ำ คุณสมบัติชอบน้ำ และความสามารถในการต้านทานการเกิดฟาวลิง เพิ่มขึ้น และการเคลือบผิวเยื่อแผ่นด้วย Al_2O_3 ในสารละลายไคโตซาน สามารถป้องกันการเกิดฟาวลิงได้ดีกว่าการผสม Al_2O_3

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการปรับคุณสมบัติเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน PES ให้มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) เพื่อลดการเกิดฟาวลิงโดยใช้ Al_2O_3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร โดยนำไปใช้ในการแยกสารละลายโปรตีนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือเพิ่มความเข้มของสารละลายโปรตีนในอุตสาหกรรมนม เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันวิธีแก้ปัญหาจากการเกิดฟาวลิงในโรงงานอุตสาหกรรมทำโดยนำเยื่อแผ่นไปทำความสะอาด โดยต้องใช้สารเคมีเพื่อขจัดฟาวลิงที่ถูกดูดซับบนผิวเยื่อแผ่น ในกรณีที่ฟาวลิงเกาะที่ผิวและรูพรุนของเยื่อแผ่นไม่สามารถทำความสะอาดออกได้ ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนเยื่อแผ่นใหม่ ซึ่งโดยทั่วไปในโรงงานที่ต้องใช้เยื่อแผ่นในกระบวนการแยก จะมีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนเยื่อแผ่นใหม่ 30-50% และการทำความสะอาดเยื่อแผ่น 10-30% ของค่าใช้จ่ายโดยรวม (Asaketin และคณะ, 2007 : 136–146) ซึ่งการใช้ Al_2O_3 ในการเพิ่มคุณสมบัติชอบน้ำให้กับเยื่อแผ่น PES นอกจากจะช่วยลดการเกิดฟาวลิงแล้ว ยังส่งผลให้เยื่อแผ่นมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นเนื่องจากการล้างเยื่อแผ่นโดยใช้สารเคมี และยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

6. รายการอ้างอิง

Asatekin, A., Kang, S., Elimelech, M., Mayes, A.M., 2007, “Anti-fouling ultrafiltration membranes containing polyacrylonitrile-*graft*-poly(ethylene oxide) comb copolymer additives.” **Journal of Membrane Science**. 298 : 136–146.

Guiping, W., Gan, S.,Cui, L., Xu, Y., 2008, “Preparation and characterization of PES/TiO2 composite membranes.” **Applied Surface Science**. 254 : 7080 – 7086.

Li, J.F., Xu, Z.L., Yang, H., Yu, L.Y., Liu, M., 2009, “Effect of TiO_2 nanoparticles on the surface morphology and performance of microporous PES membrane,” **Applied Surface Science**. 255 : 4725-4732.

Ma, X., Su, Y., Sun. Q., Wang, Y., Jiang, Z., 2007, “Enhancing the antifouling property of polyethersulfone ultrafiltration membranes through surface adsorption-crosslinking of poly(vinyl alcohol).” **Journal of Membrane Science**. (300): 71-78.

Yang,Y., Zhang, H., Wang, P., Zheng,Q., Li, J., 2007. “The influence of nano-sized TiO_2 fillers on the morphologies and properties of PSF UF membrane.” **Journal of Membrane Science**. 288 : 231–238.

Yan, L., Li, Y.S., Xiang, C.B., 2005, “Preparation of polyvinylidene fluoride (PVDF) ultrafiltration membrane modified by nano-sized alumina (Al_2O_3) and its antifouling research.” **Polymer**. 46 : 7701–7706.