

การปรับสภาพเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนอัลตราฟิลเตรชัน ด้วย Brij-58 เพื่อลดการเกิดเฟวว์ลิงเนื่องจากสารลดฟอง

พรทิพย์ เหลืองรุจิวงศ์¹ รัตนา จิระรัตนานนท์² และ ดุษฎี อุตภาพ³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนด้วยสารปรับสภาพผิวชนิดไม่มีประจุ Brij-58 ที่มีต่อการลดการเกิดเฟวว์ลิงเนื่องจากสารลดฟอง 2 ชนิดคือ Disfoam CE-120R และ silicone oil โดยการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่น 2 วิธี คือวิธีสถิต (static) โดยการแช่เยื่อแผ่นในสารปรับสภาพผิวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวิธีไดนามิก (dynamic) โดยการป้อนสารปรับสภาพผิวให้ไหลผ่านเยื่อแผ่นที่ความดันต่างๆ กัน 4 ค่า เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ผลการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นพบว่าฟลักซ์ของสารลดฟองที่ผ่านเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวมีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว โดยการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นด้วยวิธีไดนามิก จะให้ค่าฟลักซ์สูงกว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสถิต ส่วนการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิกที่ความดันต่างๆ พบว่าที่ความดัน 68.94 kPa จะให้ค่าฟลักซ์ของสารลดฟองสูงสุด เมื่อพิจารณาความต้านทานต่างๆ พบว่าความต้านทานหลักที่ทำให้ฟลักซ์ของสารลดฟองมีค่าลดลงคือ ความต้านทานเนื่องจากการเกิดเฟวว์ลิง และการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นทำให้ความต้านทานต่างๆ ลดลง 15-45 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ

คำสำคัญ : อัลตราฟิลเตรชัน / โพลีซัลโฟน / การปรับสภาพผิวเยื่อแผ่น / เฟวว์ลิง / สารปรับสภาพผิว / สารลดฟอง

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

³ รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

Pretreatment of Polysulfone Ultrafiltration Membrane by Brij-58 for Reduction of Antifoam Fouling

Porntip Luangrujiwong¹ Ratana Jiraratananon² and Dudsadee Uttapap³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

The objective of this work was to study the pretreatment of polysulfone ultrafiltration membrane by nonionic surfactant, Brij-58 for reduction of membrane fouling by two types of antifoams, Disfoam CE-120R, and silicone oil. Two treatment methods were employed, i.e., the static method, in which the membrane was soaked in the pretreatment solution for 24 hours, and the dynamic method, in which the solution was recirculated through the membrane at 4 different pressures for 2 hours.

The permeation flux of antifoam solutions through the pretreated membrane was higher than that of the non-pretreatment membrane and pretreatment by dynamic method gave higher flux than that of the static method. Comparison of pretreatment by dynamic method at different pressures showed that the permeation flux was highest for the membrane pretreated at 68.94 kPa. Fouling resistance was the major resistance which reduced the permeation flux and pretreatment was able to decrease flow resistances of approximately 15-45 %.

Keywords : Ultrafiltration / Polysulfone / Membrane Pretreatment / Fouling /
Surfactant / Antifoam

¹ Graduate Student, Department of Chemical Engineering.

² Associate Professor, Department of Chemical Engineering.

³ Associate Professor, Biotechnology Program.

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำกระบวนการเยื่อแผ่นชนิดอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration process) มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย รวมทั้งใช้สำหรับการแยกโปรตีนหรือเอนไซม์ออกจากเซลล์ในกระบวนการหมัก โดยปกติกระบวนการหมักจะมีฟองเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจจะล้นออกมาจนถึงหมักทำให้สูญเสียผลิตภัณฑ์และอาจเกิดการปนเปื้อนจากภายนอกได้ จึงต้องมีการเติมสารลดฟอง (antifoam) ถึงแม้ว่าการเติมสารลดฟองจะช่วยลดปัญหาการล้นของฟองได้ แต่พบว่าสารลดฟองเป็นสาเหตุให้เยื่อแผ่นเกิดเฟวว์ลิง (fouling) ทำให้ฟลักซ์ลดลง ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของกระบวนการเยื่อแผ่น

ในอุตสาหกรรมนิยมใช้เยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันที่ผลิตจากโพลีซัลโฟน ทั้งนี้เพราะมีสมบัติที่ทนต่อความร้อน สารเคมี และมีความคงทนต่อแรงทางกลได้ดี แต่เนื่องจากเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนเป็นเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำ จึงเกิดการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากการเกิดเฟวว์ลิงรวดเร็วกว่าเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำ (เช่น เยื่อแผ่นเซลลูโลสอะซิเตต) ทั้งนี้เนื่องจากเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำจะเกิดแรงกระทำไฮโดรโฟบิก (hydrophobic-hydrophobic interaction) กับตัวถูกละลาย เช่น สารลดฟอง ได้มากกว่าเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำ

การควบคุมหรือลดการเกิดเฟวว์ลิงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งสามารถทำได้โดยเลือกภาวะการทำงานที่เหมาะสม หรืออาจใช้วิธีปรับสภาพสารป้อนก่อนเข้าระบบ และ/หรือ ปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นด้วยสารปรับสภาพผิว (surfactant) ที่มีสมบัติเหมาะสม

Kroner และคณะ [1] นำเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันมาใช้แยกโปรตีนที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *Brevibacterium* sp. ในน้ำแช่ข้าวโพด โดยมีการเติมสารลดฟองลงในอาหารเลี้ยงเชื้อด้วย ผลการศึกษาพบว่าสารลดฟองทำให้ฟลักซ์ลดลงและค่าการกักกันโปรตีนสูงขึ้น ซึ่งอธิบายว่าสารลดฟองอาจทำให้ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นลดลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อฟลักซ์และค่าการกักกันสาร ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วและความดันในการป้อนสารลดฟอง หรือลดความเข้มข้นของสารลดฟอง จะทำให้ฟลักซ์สูงขึ้นและค่าการกักกันสารลดลง

Jonsson [2] ได้ศึกษาผลของสารปรับสภาพผิวที่มีต่อเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้สารปรับสภาพผิว 3 กลุ่ม คือ ชนิดไม่มีประจุ ชนิดประจุบวก และชนิดประจุลบ เป็นสารป้อนผ่านเยื่อแผ่นที่มีชนิดและขนาดรูพรุนต่างกัน และพบว่าฟลักซ์ของสารปรับสภาพผิวเมื่อผ่านเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำจะลดลงมากกว่าเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำ โดยฟลักซ์ของเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำจะค่อนข้างคงที่ ส่วนการลดลงของฟลักซ์ของเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำขึ้นกับชนิดและขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการกักกันสารของสารปรับสภาพผิวชนิดไม่มีประจุจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นต่ำกว่าจุด CMC (critical micelle concentration) ซึ่งต่างจากสารปรับสภาพผิวชนิดมีประจุที่มีค่าการกักกันสารสูงแม้ที่ความเข้มข้นต่ำ สามารถอธิบายด้วยกลไกการเกิดเฟวว์ลิงในรูพรุนและการจัดตัวของไมเซลล์ของสารปรับสภาพผิว กล่าวคือสารปรับสภาพผิว

ชนิดมีประจุจะถูกดูดซับในรูพรุนของเยื่อแผ่นโดยเกิดเป็นชั้นดูดซับที่ค่อนข้างแน่น ทำให้ความสามารถในการกักกันสารสูง ส่วนสารปรับสภาพผิวชนิดไม่มีประจุ (ซึ่งโครงสร้างมีขนาดของส่วนที่ชอบน้ำใกล้เคียงกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำ) เมื่อถูกดูดซับในรูพรุนของเยื่อแผ่น จะเกิดเป็นชั้นดูดซับที่ไม่ค่อยแน่น ความสามารถในการกักกันสารจึงต่ำ

Yamagiwa, Kobayashi และ Ohkawa [3] ทำการทดลองโดยนำเยื่อแผ่นโพลีโอลิฟินและเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนมาใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของสารลดฟอง Disfoam CE-120R ซึ่งเป็นสารปรับสภาพผิวชนิดไม่มีประจุและไม่ชอบน้ำ (hydrophobic nonionic surfactant) พบว่าเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำเกิดฟาว์ลิงน้อยกว่าเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำ โดยอธิบายว่าเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำ จะเกิดแรงกระทำไฮโดรโฟบิกและดูดซับสารลดฟองได้ดีกว่าเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อฟลักซ์ของเยื่อแผ่นทั้งสองชนิด พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้นของสารปรับสภาพผิว และลดความเร็วของสารป้อน จะทำให้ฟลักซ์ของเยื่อแผ่นลดลง โดยฟลักซ์ของเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนจะลดลงมากกว่าเยื่อแผ่นโพลีโอลิฟิน

Yamagiwa, Kobayashi และ Onodera [4] ทำการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนด้วยสารปรับสภาพผิว 15 ชนิด โดยแช่เยื่อแผ่นในสารปรับสภาพผิวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างเยื่อแผ่นด้วยน้ำสะอาดแล้วจึงนำไปใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของสารลดฟอง Disfoam CE-120R จากการทดลองพบว่าฟลักซ์ของสารลดฟองที่ผ่านเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยสารปรับสภาพผิวชนิดไม่มีประจุมีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยแอลกอฮอล์ โดยเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วย Brij-58 จะให้ค่าฟลักซ์สูงสุด และลดการเกิดฟาว์ลิงเนื่องจากสารลดฟองได้มากที่สุด

ประสิทธิภาพของสารปรับสภาพผิวขึ้นกับค่า Hydrophilic Lipophilic Balance (HLB value) และโครงสร้างทางโมเลกุลของสาร ซึ่งจากการทดลองของ Yamagiwa [4] พบว่าสารปรับสภาพผิวที่มีประสิทธิภาพหรือมีความสามารถในการเพิ่มสมบัติการชอบน้ำของเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนได้มากที่สุดคือ Brij-58 ซึ่งเป็นสารปรับสภาพผิวที่มีค่า HLB = 16 และมีหมู่แอลคิลสายตรง (straight alkyl chain) เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

Kim, Fane และ Fell [5] ศึกษาการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันที่ผลิตจากโพลีซัลโฟนด้วยสารปรับสภาพผิวและโพลิเมอร์ 3 ชนิดคือ methylcellulose (MC ที่มีมวลโมเลกุลสูงและต่ำ) polyvinyl alcohol (PVA) และ polyvinylpyrrolidone (PVP) การปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นมี 2 วิธี คือวิธีสแตติก โดยการจุ่มเยื่อแผ่นในสารละลายโพลิเมอร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวิธีไดนามิกโดยการป้อนสารละลายโพลิเมอร์ผ่านเยื่อแผ่นที่ความดันคงที่ 100 กิโลปาสกาล เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำเยื่อแผ่นดังกล่าวมาวัดค่าฟลักซ์ของสารละลาย BSA ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร พบว่าเมื่อปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย N100 จะให้อัตราส่วนระหว่างค่าฟลักซ์ของสารที่ผ่านเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวกับค่าฟลักซ์ของสารที่ผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวที่สูงกว่าการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นด้วยโพลิเมอร์ชนิดอื่น และเมื่อเปรียบเทียบวิธีการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติกกับวิธีไดนามิก พบว่าเมื่อปรับสภาพผิวด้วย N 100 และ HMC ด้วยวิธีสแตติก

จะให้ค่าอัตราส่วนฟลักซ์ดังกล่าวสูงกว่าวิธีไดนามิกในช่วงแรกเท่านั้น เมื่อเวลาผ่านไปพบว่า ค่าอัตราส่วนฟลักซ์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติกมีแนวโน้มลดลง ซึ่งต่างจากการปรับสภาพผิวด้วยวิธี ไดนามิกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนการปรับสภาพผิวด้วยสารปรับสภาพผิวชนิดอื่น (PVP และ PVA) ให้ผลไม่ต่างกันมากนัก

จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าสารลดฟองเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดเฟว์ลิงในเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนเนื่องจากเกิดแรงกระทำไฮโดรโฟบิกระหว่างเยื่อแผ่นกับสารลดฟอง [3] การปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นด้วยสารปรับสภาพผิวชนิดไม่มีประจุ Brij-58 จะทำให้สารลดฟองผ่านเยื่อแผ่นได้มาก ฟลักซ์มีค่าสูงและลดการเกิดเฟว์ลิง ทั้งนี้เพราะเมื่อทำการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสารปรับสภาพผิวจะจับกับเยื่อแผ่นและหันส่วนที่ชอบน้ำออกมา ทำให้เยื่อแผ่นมีความชอบน้ำมากขึ้น [4] [6] โดยวิธีการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิกจะใช้เวลาในการปรับน้อยกว่าและได้ผลดีกว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก และยังสามารถปรับตัวแปรระหว่างทำการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นได้ เช่น เวลา ความดัน และความเร็ว ซึ่งคาดว่าจะมีผลต่อการสะสมของสารปรับสภาพผิวในเยื่อแผ่น

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของวิธีการปรับสภาพผิวที่มีผลต่อฟลักซ์ ค่าการกักกันสารและความต้านทานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของสารลดฟอง เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นเพื่อลดการเกิดเฟว์ลิง และเพื่อให้เข้าใจกลไกการปรับสภาพผิวที่ทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นและลดการเกิดเฟว์ลิงได้ดียิ่งขึ้น

2. ทฤษฎี

ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ฟลักซ์จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบ โดยแสดงถึงปริมาตรของเพอมีเอตที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา สามารถแสดงในรูปของความต้านทานต่อการซึมผ่านด้วยสมการของ Hagen-Poiseuille [7] ดังนี้

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu_v * R_t} \quad (1)$$

เมื่อ J_v = ฟลักซ์ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น ($m^3/m^2 \cdot s$)

ΔP = ผลต่างของความดันที่ให้กับสารละลาย (Pa)

μ_v = ความหนืดของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น (Pa·s)

R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหลผ่าน (m^{-1})

ความต้านทานรวมต่อการไหลในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน อธิบายโดยใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (resistance-in-series model)

$$R_t = R_m + R_f + R_p \quad (2)$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น

R_f = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดเฟวรัลิ่ง เป็นการสะสมและอุดตันของสารที่ผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่น ซึ่งไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำสะอาด

R_p = ความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน เป็นการสะสมและอุดตันของสารที่สามารถล้างออกด้วยน้ำสะอาด

ซึ่งความต้านทานต่างๆ ข้างต้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. ความต้านทานของเยื่อแผ่น คำนวณได้จากฟลักซ์ของน้ำสะอาด

$$R_m = \Delta P / \mu_w J_w \quad (3)$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (m^{-1})

ΔP = ความดันที่ให้กับระบบ (Pa)

μ_w = ความหนืดของน้ำสะอาด (Pa·s) ที่ 25°C มีค่า 8.9793×10^{-4} Pa·s

J_w = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดก่อนการใช้งาน ($m^3/m^2 \cdot s$)

2. เมื่อล้างเยื่อแผ่นที่ผ่านการใช้งานด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดชั้นโพลาไรซ์ แล้ววัดฟลักซ์ของน้ำสะอาดความต้านทานที่คำนวณได้คือความต้านทานของเยื่อแผ่นรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดเฟวรัลิ่ง ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$R_m + R_f = \Delta P / \mu_w J_w' \quad (4)$$

เมื่อ $R_m + R_f$ = ความต้านทานของเยื่อแผ่นรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดเฟวรัลิ่งของสารป้อน (m^{-1})

J_w' = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผ่านเยื่อแผ่นและล้างด้วยน้ำสะอาดแล้ว ($m^3/m^2 \cdot s$)

ดังนั้นความต้านทานเนื่องจากการเกิดเฟวรัลิ่งคำนวณได้จาก

$$R_f = (R_m + R_f) - R_m \quad (5)$$

และคำนวณความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันจาก

$$R_p = R_t - (R_m + R_f) \quad (6)$$

ค่าการกักกันสาร (Rejection, R) เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการกักสารของเยื่อแผ่น มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R = [1 - (C_p / C_b)] * 100 \quad (7)$$

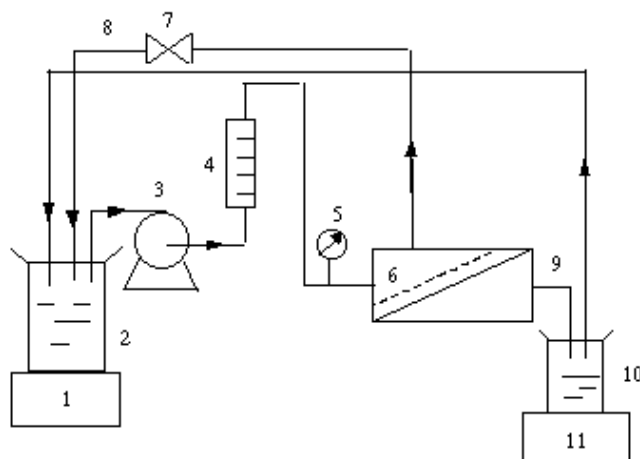
เมื่อ C_p = ความเข้มข้นของสารละลายในเพอมีเอต

C_b = ความเข้มข้นของสารละลายใน bulk

3. การดำเนินงานวิจัย

1. อุปกรณ์และสารเคมี

ระบบอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ออกแบบและสร้างขึ้นที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเยื่อแผ่นภาควิชาวิศวกรรมเคมี มีลักษณะคล้ายอุปกรณ์แบบ thin channel (Minitan) ของบริษัทมิลลิพอร์ (Millipore) จำกัด ซึ่งใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์แบบแผ่นที่มีพื้นที่การกรอง 60 cm² ซึ่งแผนผังการจัดอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 1



- | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1. เครื่องคนสาร | 5. เกจวัดความดัน | 9. ท่อเพอมีเอต |
| 2. ถังป้อน | 6. หน่วยของเยื่อแผ่น | 10. บีกเกอร์ |
| 3. ปั๊ม | 7. วาล์วควบคุมความดัน | 11. เครื่องชั่ง |
| 4. เครื่องวัดอัตราการไหล | 8. ท่อรีเทนเนต | |

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ระบบอัลตราฟิลเตรชัน

สารเคมีที่ใช้ได้แก่ สารปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นชนิด nonionic surfactant คือ Brij-58 มีค่า HLB = 16 และน้ำหนักโมเลกุล = 1124 จากบริษัท Sigma Chemical จำกัด และสารลดฟองมี 2 ชนิดคือ สารลดฟอง Disfoam CE-120R เป็นสารลดฟองชนิด hydrophobic nonionic surfactant มีค่า HLB = 4 และน้ำหนักโมเลกุล = 2000 จากบริษัท Nippon Oils & Fats จำกัด และสารลดฟองชนิด silicone oil เป็นสารประกอบประเภท polydimethylsiloxane อยู่ในรูปอิมัลชัน ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ในน้ำ จากบริษัท Fluka จำกัด ในการทดลองตลอดจนการเตรียมสารละลายใช้น้ำสะอาดที่ได้จากการบำบัดด้วยออสโมซิสผันทกลับและผ่านเครื่องทำน้ำปราศจากอออน Barnstead รุ่น E-pure ตามลำดับ

ทุกๆ การทดลองทำที่ภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันของสารป้อน 34.47 kPa อัตราการไหลของสารป้อน 400 ml/min สารละลายในถังป้อนมีการกวนตลอดเวลา และสารละลายทั้งด้านรีเทนเนตและเพอมีเอตจะถูกป้อนกลับเข้าสู่ถังป้อน เพื่อควบคุมความเข้มข้นในถังป้อนให้คงที่

2. วิธีการทดลอง

วัดฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ภาวะคงที่ สำหรับเยื่อแผ่นก่อนการใช้งาน (J_w) จากนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานของเยื่อแผ่น (R_m) โดยค่าที่ได้จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณหาค่าความต้านทานต่างๆ ต่อไป

ในการทดลองแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลองตามเยื่อแผ่นที่ใช้คือ เยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว และเยื่อแผ่นที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย Brij-58 ความเข้มข้น 1.00 g/l การปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นมี 2 วิธีคือ การปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก โดยการแช่เยื่อแผ่นในสารปรับสภาพผิวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก โดยการป้อนสารปรับสภาพผิวผ่านเยื่อแผ่นแบบวนสารละลายกลับที่ความดันต่างๆ กัน 4 ค่า คือที่ 20.68, 34.47, 48.26 และ 68.94 kPa โดยที่แต่ละความดันใช้เวลา 2 ชั่วโมง หลังการปรับสภาพผิวแล้ว กำจัดสารปรับสภาพผิวส่วนเกินด้วยการล้างทิ้งด้วยน้ำสะอาด 5 l ที่ภาวะคงที่ จากนั้นนำเยื่อแผ่นมาวัดฟลักซ์ของสารป้อน โดยสารป้อนที่ใช้มี 3 ชนิดคือ น้ำสะอาด สารลดฟอง Disfoam CE-120R ความเข้มข้น 0.50 g/l และสารลดฟอง silicone oil ความเข้มข้น 0.10 g/l

การวัดฟลักซ์ของสารป้อนผ่านเยื่อแผ่นที่ภาวะต่างๆ โดยเติมสารป้อนปริมาตร 2 l ลงในถังป้อนปรับภาวะการทำงานให้คงที่ ที่ความดันของสารป้อน 34.47 kPa อัตราการไหลของสารป้อน 400 ml/min วัดอัตราการไหลของเพอมีเอต ทุกๆ 10 นาที และเก็บสารละลายด้านป้อนและด้านเพอมีเอตทุกๆ 30 นาที (เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นและคำนวณค่าการกักกันสาร ด้วยวิธี COD แบบ closed reflux) เป็นเวลา 120 นาทีหรือจนฟลักซ์ (J_v) เข้าสู่ภาวะคงที่ แล้วปล่อยสารละลายออกจากระบบและถังป้อน จากค่า J_v ที่วัดได้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานรวมของเยื่อแผ่นหลังผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (R_p) ได้ หลังจากนั้นล้างเยื่อแผ่นด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดชั้นโพลาริซ์ออกจากผิวเยื่อแผ่นแล้ววัดฟลักซ์น้ำสะอาดหลังจากล้างชั้นโพลาริซ์ออกจากเยื่อแผ่น (J_w') คำนวณหาค่าผลรวมของความต้านทานของเยื่อแผ่นกับความต้านทานที่เกิดจากเฟวว์ลิง ($R_m + R_f$) ได้ และคำนวณค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นโพลาริซ์ (R_p) และความต้านทานที่เกิดจากเฟวว์ลิง (R_f) จากสมการ (4), (5) และ (6)

หลังทำการทดลองทุกครั้ง จะต้องทำความสะอาดเยื่อแผ่นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ และน้ำสะอาด จนฟลักซ์น้ำหลังจากล้างเยื่อแผ่นมีค่าใกล้เคียงกับฟลักซ์น้ำของเยื่อแผ่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

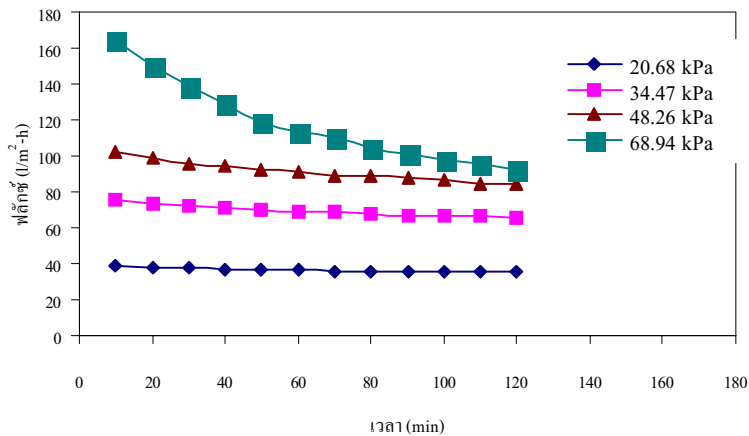
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ฟลักซ์ของน้ำสะอาดและความต้านทานของเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว

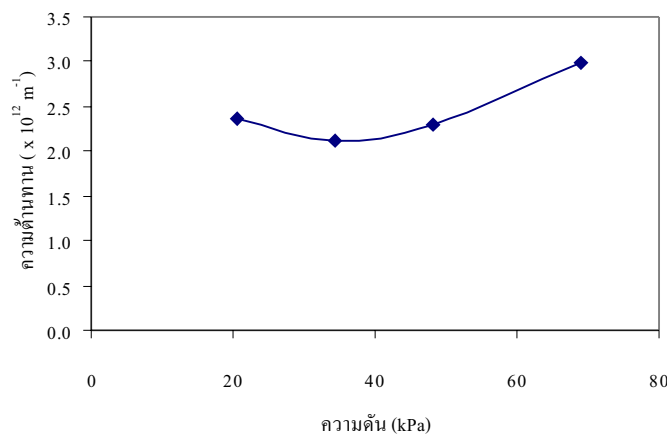
วัดฟลักซ์ของน้ำสะอาด ที่ความดัน 34.47 kPa ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผ่านเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟน (J_w) ที่เวลา 120 นาที มีค่า 119.11, 115.11 และ 110.96 l/m²-h และคำนวณค่าความต้านทานของเยื่อแผ่น (R_m) ได้ R_m มีค่าประมาณ 1.160×10^{12} , 1.201×10^{12} และ 1.245×10^{12} m⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งความต้านทานของเยื่อแผ่นเฉลี่ยมีค่า 1.202×10^{12} m⁻¹ (ซึ่งค่านี้จะใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานต่างๆ ต่อไป)

2. ฟลักซ์ของสารปรับสภาพผิวและความต้านทานรวมของการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิกที่ความดันต่างๆ

ขณะปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นด้วยสารปรับสภาพผิว Brij-58 ด้วยวิธีไดนามิกที่ความดันต่างๆ ได้มีการวัดฟลักซ์ของสารปรับสภาพผิวเทียบกับเวลาเพื่อเป็นข้อมูลประกอบ (ผลแสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3) ซึ่งพบว่าฟลักซ์ของสารปรับสภาพผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการปรับสภาพผิวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อเพิ่มความดันซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนของระบบ สารปรับสภาพผิวจะผ่านเยื่อแผ่นได้มากขึ้น ทำให้ฟลักซ์มีค่าสูงขึ้น และเมื่อคำนวณความต้านทานรวมของการปรับสภาพผิวที่ความดันต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มความดัน จะทำให้สารปรับสภาพผิวผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นได้มากขึ้น หรือจำนวนรอบในการกวนสารปรับสภาพผิวผ่านเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น เกิดการดูดซับที่ผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่นมากขึ้น โอกาสที่สารปรับสภาพผิวจะถูกดูดซับบนผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่นมีมากขึ้น หรือเยื่อแผ่นดูดซับสารปรับสภาพผิวได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เยื่อแผ่นมีความต้านทานรวมสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ความต้านทานที่คำนวณได้ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความดันมีลักษณะลดลงแล้วจึงเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3) โดยในช่วงความดัน 20.68-34.47 kPa ความต้านทานรวมมีค่าลดลง ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าที่ความดัน 20.68 kPa สารปรับสภาพผิวจะไหลผ่านเยื่อแผ่นได้ช้าหรือจำนวนรอบที่ผ่านเยื่อแผ่นน้อยกว่าที่ความดัน 34.47 kPa จึงมีเวลาสัมผัสกับเยื่อแผ่นนานขึ้นหรือสารปรับสภาพผิวมีโอกาสสัมผัสกับเยื่อแผ่นและเกิดการสะสมได้มากขึ้น ที่ความดัน 20.68 kPa จึงมีความต้านทานรวมสูงกว่าที่ความดัน 34.47 kPa และที่ความดันสูงขึ้นไปอีก (48.26, 68.94 kPa) ความต้านทานรวมกลับมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่แต่ละความดัน ใช้เวลาในการบ่อนสารปรับสภาพผิวเท่ากัน (คือ 2 ชั่วโมง) จึงอธิบายได้ว่าการเพิ่มความดันทำให้ฟลักซ์สูงขึ้นมาก ซึ่งหมายถึงจำนวนรอบและการสะสมของสารปรับสภาพผิวที่เพิ่มขึ้น



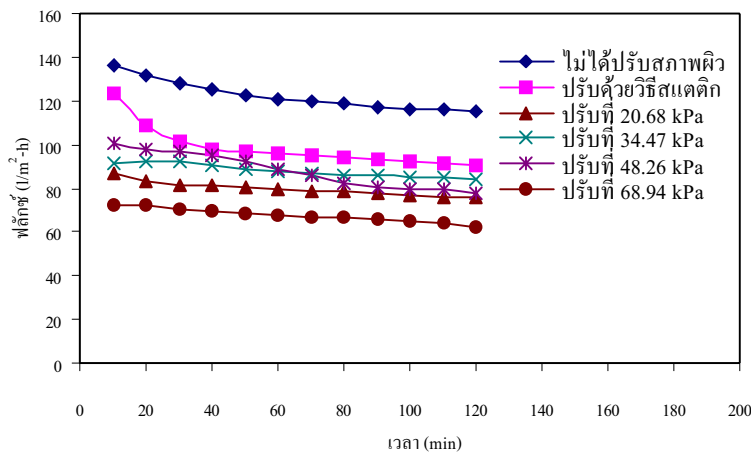
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยของสารปรับสภาพผิวกับเวลาขณะปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นด้วยวิธีไดนามิกที่ความดันต่างๆ



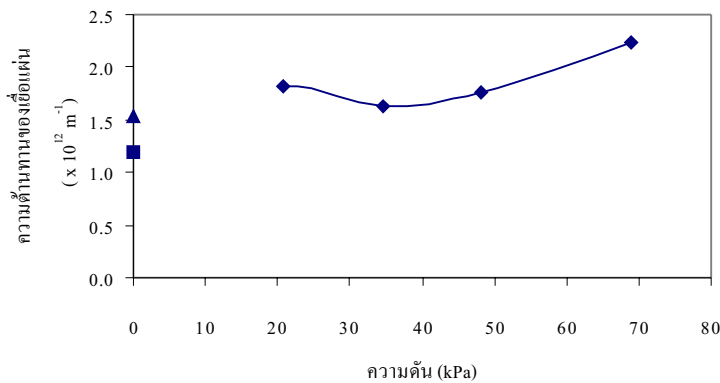
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรวมของการปรับสภาพผิวที่เวลา 120 นาที กับความดันที่ใช้ในการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นด้วยวิธีไดนามิก

3. ฟลักซ์ของน้ำสะอาดและความต้านทานต่างๆ ของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ

นำเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวมาวัดฟลักซ์ของน้ำสะอาด แสดงผลดังรูปที่ 4 พบว่า เยื่อแผ่นที่ผ่านการปรับสภาพผิวมีค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดต่ำกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อนำเยื่อแผ่นไปปรับสภาพผิวจะเกิดการสะสมของสารปรับสภาพผิวที่ผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่น ทำให้ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yamagiwa และคณะ [3] และ Kim และคณะ [5]



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยของน้ำสะอาดกับเวลา โดยใช้เยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก ที่เวลา 120 นาทีกับภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่น เมื่อสารป้อนคือน้ำสะอาด (โดย ■ คือไม่ได้ปรับสภาพผิว, ▲ คือปรับด้วยวิธีสแตติก, ◆ คือปรับด้วยวิธีไดนามิก)

เมื่อเปรียบเทียบเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติกกับวิธีไดนามิก พบว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติกจะได้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดสูงกว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก สารละลายของสารปรับสภาพผิวจะไหลผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นภายใต้แรงขับเคลื่อน จึงเป็นไปได้ว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก จะเพิ่มการเกิดเฟวว์ลิงหรือการสะสมในรูพรุนของเยื่อแผ่น โดยโมเลกุลของสารปรับสภาพผิวถูกดูดซับในรูพรุนได้มากกว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก ซึ่งเป็นการแช่เยื่อแผ่นในสารปรับสภาพผิวโดยไม่มีการใช้แรงขับเคลื่อนให้สารผ่านเยื่อแผ่น นอกจากนี้ยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเยื่อแผ่นที่ผ่านการปรับสภาพผิวเทียบกับความดัน (รูปที่ 5) สอดคล้องกับกราฟความต้านทานรวมของการปรับสภาพผิวเทียบกับความดัน (รูปที่ 3 ในข้อ 4.2) กล่าวคือเมื่อความต้านทานรวมของการปรับสภาพผิวเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ของน้ำสะอาด (J_w) ลดลงหรือความต้านทานของเยื่อแผ่น

ที่ปรับสภาพผิวมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเชื่อมั่นได้ว่าการล้างสารปรับสภาพผิวส่วนเกินออกตามที่ได้กล่าวถึงแล้วในวิธีการทดลองเป็นวิธีที่ยอมรับได้ จึงได้ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดและความต้านทานของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวแล้วสอดคล้องกับความต้านทานรวมของการปรับสภาพผิว

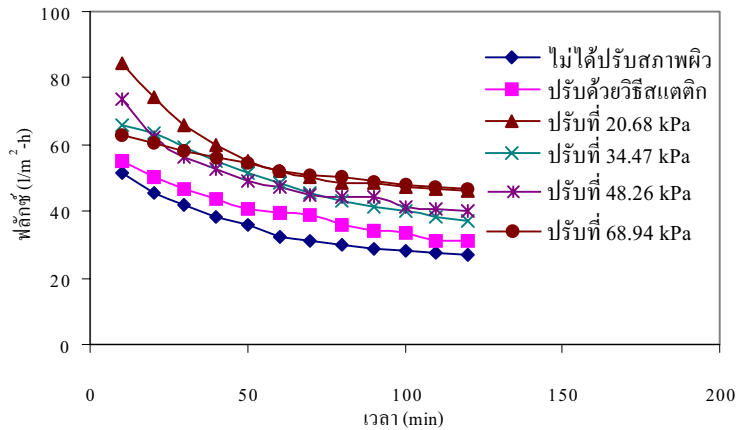
4. ฟลักซ์และความต้านทานต่างๆ ของสารลดฟอง Disfoam CE-120R และ silicone oil

ฟลักซ์และความต้านทานต่างๆ ของสารลดฟองที่ผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว เทียบกับเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ แสดงในรูปที่ 6 และ 7 (เมื่อสารป้อนคือสารลดฟอง Disfoam CE-120R) และรูปที่ 8 และ 9 (เมื่อสารป้อนคือสารลดฟอง silicone oil)

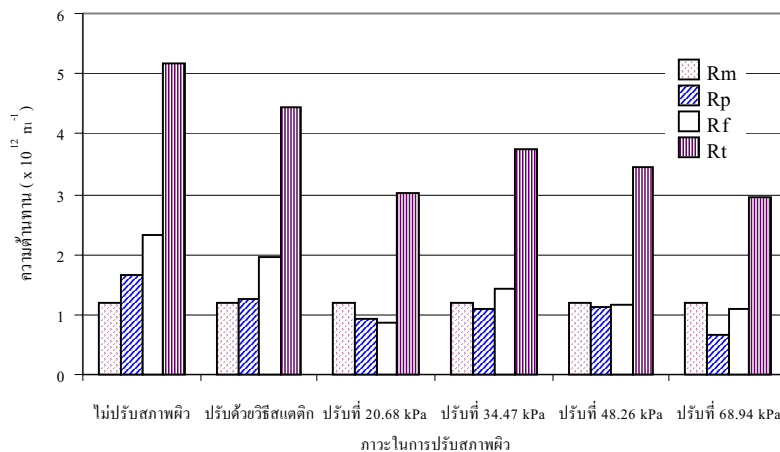
จากรูปที่ 6 และ 8 พบว่าฟลักซ์ของสารลดฟองที่ผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเกิดการอุดตันและสะสมของสารลดฟองบนผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่นด้วยแรงกระทำไฮโดรโฟบิกทำให้ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นเล็กลงหรือความต้านทานต่อการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Kroner และคณะ [1] และ Yamagiwa และคณะ [3] โดยผลที่ได้นี้แตกต่างจากกรณีที่สารป้อนคือน้ำสะอาด (ผลการทดลองข้อ 4.1) คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว (J_w) มีค่าสูงกว่าฟลักซ์ของสารลดฟองมาก ทั้งนี้เพราะน้ำสะอาดมีลักษณะชอบน้ำ จึงไม่เกิดแรงกระทำไฮโดรโฟบิกกับเยื่อแผ่น ในขณะที่สารลดฟองมีสมบัติไม่ชอบน้ำ จึงเกิดแรงกระทำดังกล่าวกับเยื่อแผ่นได้

เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิว พบว่าเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวจะมีค่าฟลักซ์ของสารลดฟองสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นโพลีซัลโฟนซึ่งเป็นเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำด้วยสารปรับสภาพผิว Brij-58 ทำให้เยื่อแผ่นมีสมบัติในการชอบน้ำมากขึ้น โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสารปรับสภาพผิวจะจับกับเยื่อแผ่นแล้วหันส่วนที่ชอบน้ำออกมา (ดูรูปที่ 10 ประกอบ) ซึ่งจะลดแรงกระทำไฮโดรโฟบิกระหว่างสารลดฟองกับเยื่อแผ่นลงได้

และพบว่าเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิกมีฟลักซ์ของสารลดฟองสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก ทั้งนี้เพราะการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติกเป็นเพียงการแช่เยื่อแผ่นให้ค่อยๆ ดูดซับสารปรับสภาพผิว โดยไม่ใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการป้อนสารปรับสภาพผิว จึงอาจเป็นไปได้ว่าโมเลกุลของสารปรับสภาพผิวจะค่อยๆ ซึมผ่านเข้าไปและเกิดการดูดซับที่ผิวและในรูพรุนที่บริเวณใกล้ๆ ผิวของเยื่อแผ่น ซึ่งยังมีเยื่อแผ่นบางส่วนที่ไม่ถูกดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิว และเมื่อนำไปกรองสารลดฟอง โมเลกุลของสารลดฟองอาจดูดซับกับเยื่อแผ่นในส่วนที่ว่างนั้นแทน ในขณะที่การปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิกใช้แรงขับเคลื่อนสารปรับสภาพผิวให้ไหลผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น จึงเป็นไปได้ที่จะเกิดการดูดซับในรูพรุนได้อย่างทั่วถึงกว่าหรือมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพผิวสูงกว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก

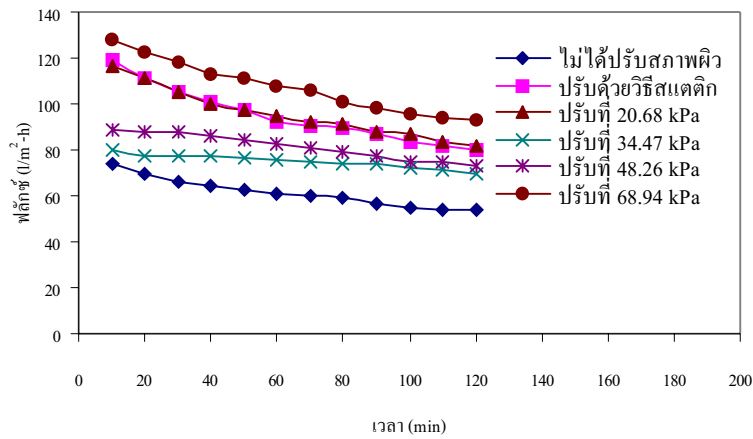


รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยของสารลดฟอง Disfoam CE-120R กับเวลา โดยใช้เยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ

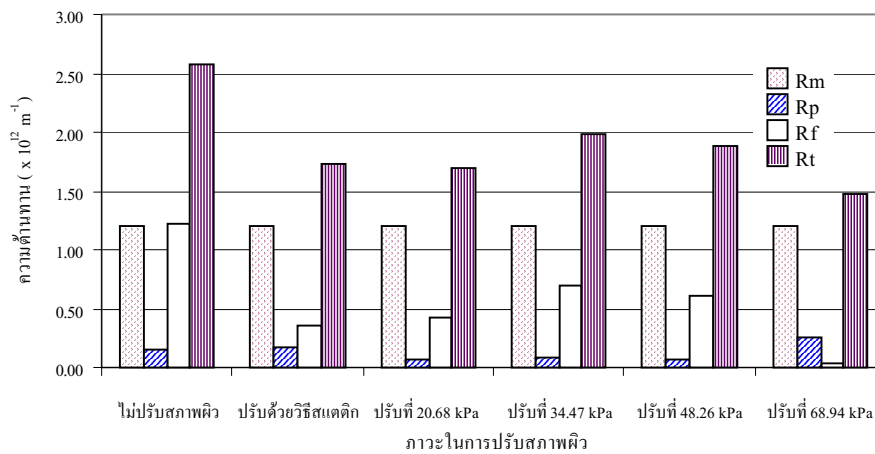


รูปที่ 7 แสดงค่าความความต้านทานต่างๆ ของเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวเทียบกับเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ เมื่อสารป้อนคือสารลดฟอง Disfoam CE-120R

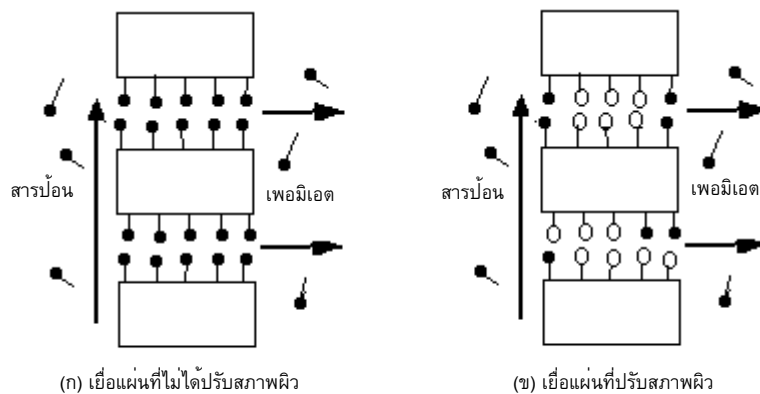
เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานที่ภาวะต่างๆ (รูปที่ 7 และ 9) พบว่าความต้านทานรวมของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิกทุกๆ ความดันมีค่าต่ำกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก และความต้านทานของชั้นโพลาริซ์และความต้านทานเนื่องจากการเกิดเฟว์ลิงของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิกมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลจากการปรับสภาพด้วยสารปรับสภาพผิว Brij-58 ช่วยลดการเกิดแรงกระทำไฮโดรโฟบิกระหว่างสารลดฟองกับเยื่อแผ่นลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Fane และ Fell [6] จึงกล่าวได้ว่าสารปรับสภาพผิวช่วยลดการเกิดชั้นโพลาริซ์และเฟว์ลิงเนื่องจากสารลดฟองได้มาก



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยของสารลดฟอง silicone oil กับเวลา โดยใช้เยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ



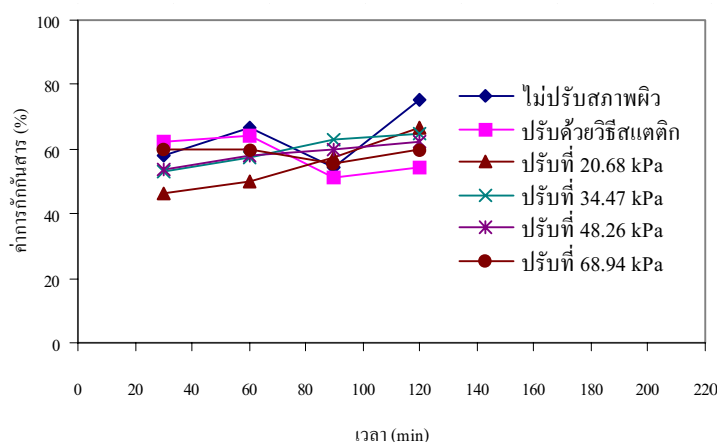
รูปที่ 9 แสดงค่าความต้านทานต่างๆ ของเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวเทียบกับเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ เมื่อสารป้อนคือสารลดฟอง silicone oil ปรับด้วยวิธีสแตติก



รูปที่ 10 แสดงกลไกที่อาจเป็นไปได้ในการกรองสารลดฟองผ่านเยื่อแผ่น เมื่อ O— คือ สารปรับสภาพผิว และ ●— คือ สารลดฟอง

5. ค่าการกักกันของสารลดฟอง

การวิเคราะห์ค่าการกักกันสารของสารลดฟอง Disfoam CE-120R แสดงในรูปที่ 11 พบว่าค่าการกักกันสารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับเวลา ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการสะสมหรือการดูดซับของโมเลกุลของสารลดฟองที่ผิวและการเกิดฟาว์ลิงในรูพรุนของเยื่อแผ่น ซึ่งการดูดซับดังกล่าวมักมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แต่ในบางกรณี (เยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก) ค่าการกักกันสารจะเพิ่มขึ้นและลดลงแล้วจึงเพิ่มขึ้นอีกครั้งโดยในช่วงที่ค่าการกักกันลดลงอาจเป็นเพราะสารที่ถูกดูดซับบนผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่นถูกชะให้หลุดออกมาในขณะดำเนินการ



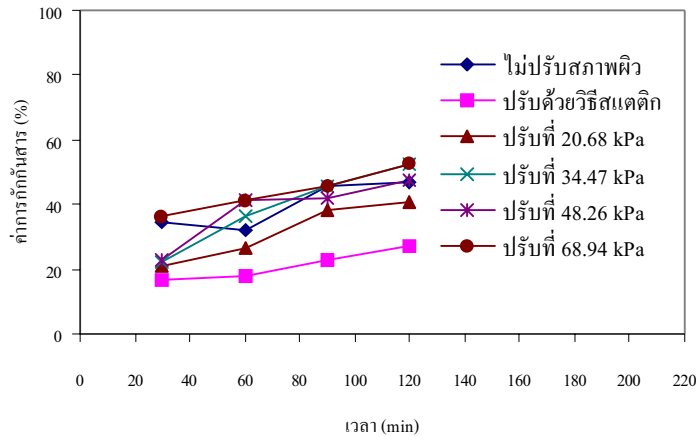
รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกักกันของสารลดฟอง Disfoam CE-120R กับเวลาเมื่อใช้เยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ

นอกจากนี้ ผลการทดลองพบว่าในช่วงแรกค่าการกักกันสารของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธี สแตติกมีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ทั้งนี้เพราะเมื่อทำการปรับสภาพผิว การสะสมของสารปรับสภาพผิว เป็นการกีดกันให้โมเลกุลของสารลดฟองผ่านไปได้น้อยหรือถูกกักได้มาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าการกักกันสารของเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวมีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการดูดซับและสะสมของโมเลกุลของสารลดฟองบนผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่น ทำให้สารลดฟองผ่านไปได้น้อยหรือถูกกักได้มากกว่าเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Jonsson [2] และ Yamagiwa และคณะ [4]

ส่วนค่าการกักกันสารของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก พบว่าค่าการกักกันสารในแต่ละความดันที่ใช้ในการปรับสภาพผิวมีค่าไม่ต่างกันมากนัก จึงอาจกล่าวได้ว่าความดันที่ใช้ในการปรับสภาพผิวมีผลต่อค่าการกักกันสารของระบบอัลตราฟิลเตรชันน้อยมาก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของทศพร ทรงงามทรัพย์ [8]

เมื่อเปรียบเทียบค่าการกักกันสารลดฟองของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติกกับเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก พบว่าค่าการกักกันของเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธี

สแตติกมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของสารลดฟอง อธิบายได้ว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก สารปรับสภาพผิวเกิดการดูดซับกับเยื่อแผ่นได้อย่างทั่วถึงกว่าวิธีสแตติก ตามที่ได้อธิบายแล้ว เยื่อแผ่นจึงมีความชอบน้ำมากขึ้น สารลดฟอง Disfoam CE-120R จับกับเยื่อแผ่นได้น้อยหรือผ่านไปได้น้อย ค่าการกักกันจึงต่ำ



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกักกันของสารลดฟอง silicone oil กับเวลา เมื่อใช้เยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและเยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวที่ภาวะต่างๆ

การวิเคราะห์ค่าการกักกันสารของสารลดฟอง silicone oil แสดงในรูปที่ 12 พบว่าค่าการกักกันของสารลดฟอง silicone oil มีแนวโน้มเช่นเดียวกับสารลดฟอง Disfoam CE-120R โดยสารลดฟอง silicone oil มีค่าการกักกันต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า จึงสามารถผ่านไปได้น้อยกว่า สารลดฟอง Disfoam CE-120R ที่มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างยาวและเกาะเกาะกว่า

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและวิจารณ์ที่ได้ สามารถสรุปได้ว่า

1. เยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวจะมีค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดต่ำกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว และการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก จะได้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดสูงกว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นจะเกิดการสะสมและอุดตันของสารปรับสภาพผิวที่ผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่น ทำให้ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นเล็กลง โดยการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิก สารละลายของสารปรับสภาพผิวจะไหลผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นภายใต้แรงขับดัน จึงอาจเป็นไปได้ว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีไดนามิกจะเพิ่มการดูดซับของสารปรับสภาพผิวในรูพรุนของเยื่อแผ่นมากกว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีสแตติก ซึ่งเป็นการแช่เยื่อแผ่นในสารปรับสภาพผิวโดยไม่มีการใช้แรงขับดันให้สารผ่านเยื่อแผ่น

2. ฟลักซ์ของสารลดฟองที่ผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวมีค่าค่อนข้างต่ำ เพราะเกิดการอุดตันและสะสมของสารลดฟองบนผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่นด้วยแรงกระทำไฮโดรโฟบิก ทำให้ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นเล็กลง

3. เยื่อแผ่นที่ปรับสภาพผิวจะมีค่าฟลักซ์ของสารลดฟองสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่น จะเพิ่มสมบัติในการชอบน้ำของเยื่อแผ่นให้มากขึ้นและลดแรงกระทำไฮโดรโฟบิกระหว่างสารลดฟองกับเยื่อแผ่นลงได้

4. การปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นช่วยลดความต้านทานของชั้นโพลารไรซ์และความต้านทานเนื่องจากการเกิดเฟวว์ลิงได้อย่างเห็นได้ชัด

5. ค่าการกักกันของสารลดฟองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับเวลา ทั้งนี้เนื่องจากสารลดฟองเกิดการสะสมหรือดูดซับที่ผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่น ซึ่งการดูดซับดังกล่าวควรมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

6. เยื่อแผ่นให้ค่าการกักกันของสารลดฟอง Disfoam CE-120R และ silicone oil ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดและโครงสร้างของโมเลกุลของสารลดฟองที่ต่างกัน จึงทำให้ความสามารถในการผ่านเยื่อแผ่นต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

1. Kroner, K. H., Hummel, W., Volkel, J. and Kula, M. R., 1986, "Effects of Antifoam on Cross-Flow Filtration of Microbial Suspensions," *Membranes and Membrane Processes*, Edited by Drioli, E. and Nakagaki, M., New York, Plenum Press, pp. 223-232.

2. Jonsson, A. S. and Jonsson, B., 1991, "The Influence of Nonionic and Ionic Surfactants on Hydrophobic and Hydrophilic Ultrafiltration Membranes," *Journal of Membrane Science*, Vol. 56, pp. 49-76.

3. Yamagiwa, K., Kobayashi, H., and Ohkawa A., 1993, "Membrane Fouling in Ultrafiltration of Hydrophobic Nonionic Surfactant," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 26, No. 1, pp. 13-18.

4. Yamagiwa, K., Kobayashi, H., and Onodera, M., 1994, "Surfactant Pretreatment of a Polysulfone Ultrafilter for Reduction of Antifoam Fouling," *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 43, No. 4, pp. 301-308.

5. Kim K. J., Fane, A. G., and Fell, C. J. D., 1988, "The Performance of Ultrafiltration Membranes Pretreated by Polymers," *Desalination*, Vol. 70, Nos. 1-3, pp. 229-249.

6. Fane, A. G. and Fell, C. J. D., 1987, "A Review of Fouling and Fouling Control in Ultrafiltration," *Desalination*, Vol. 62, pp. 117-136.

7. รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541, กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า, 147-177.

8. ทศพร ทรงงามทรัพย์, 2541, "การศึกษาผลของ pH, Ionic strength ในสารละลาย Bovine Serum Albumin และการปรับสภาพผิวเยื่อแผ่นเซอร์โคเนียด้วยกรดฟอสฟอริกที่มีต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 50-83.