

การแยกน้ำมันในน้ำเสียด้วยเยื่อแผ่นอุลตราฟิลเตรชันแบบเซรามิก

SEPARATION OF OILS FROM WASTEWATER BY CERAMIC ULTRAFILTRATION MEMBRANES

รัตนา จิระรัตนานนท์ ดุษฎี อุตภาพ และ ขวัญจิตร วงษ์ชารี

Ratana Jiraratananon, Dudsadee Uttapap and Kwanjit Wongcharee

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนประชาอุทิศ กรุงเทพฯ 10140

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Pracha-Utit rd. Bangkok 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอผลการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีน้ำมันเจือปน การแยก free oil ใช้อุปกรณ์แผ่นลูกลอน ซึ่งสามารถแยก free oil ได้ประมาณ 93% ส่วนการแยก emulsified oil ใช้เยื่อแผ่นอุลตราฟิลเตรชันแบบเซรามิก

สมรรถนะในการแยก emulsified oil ขึ้นอยู่กับสภาวะในการดำเนินการ และขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น นอกจากนี้พฤติกรรมการแยก emulsified oil ยังแตกต่างจากการแยกสารโมเลกุลใหญ่อื่นๆ และการแยกที่ความดันสูง ทำให้เกิด fouling ในเยื่อแผ่นสูง

ถ้าน้ำทิ้งมีความเข้มข้นสูงควรแยกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ใช้เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดใหญ่และเล็กตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ได้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของน้ำมันเพียง 2-8 ppm ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้หรือปล่อยทิ้งได้

ABSTRACT

This paper presents the treatment of industrial oily wastewater. Free oil was separated by a corrugated plate inceptor which was able to remove free oil approximately 93%. The performance of ultrafiltration for separation of emulsified oil was dependent upon operating conditions and membrane pore sizes. For wastewater with high concentration of oil, separation in two consecutive steps using membrane of large and small pore sizes was necessary to obtain the treated water with low oil concentration (2-8 ppm) that can be recycled or discharged.

1. บทนำ

น้ำเสียที่มีส่วนประกอบของน้ำมันเจือปน เช่น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร, สิ่งทอ, การขึ้นรูปและชุบเคลือบโลหะ เป็นต้น น้ำเสียเหล่านี้จะต้องได้รับการบำบัดก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือนำกลับมาใช้อีกเพราะน้ำมันจัดเป็นสารอันตรายชนิดหนึ่ง รวมทั้งมีกฎหมายควบคุมอย่างเข้มงวด

น้ำมันในน้ำเสียแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ free oil และ emulsified oil การแยก free oil โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือซึ่งอาศัยหลักการแยกชั้นของน้ำมันกับน้ำ เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกัน เช่น API separator, inclined plate separator, air floatation separator เป็นต้น ส่วน emulsified oil มีวิธีการแยกหลายวิธี เช่น การให้ความร้อน ซึ่งสามารถแยกได้เฉพาะ emulsified oil ที่ไม่เสถียรเท่านั้น หรือการเติม demulsifier เพื่อให้เกิดการแตกตัวและแยกน้ำมันออกมาได้ แต่มีข้อจำกัด คือ ต้องมีการแยกสารเคมีออกจากน้ำ ส่วนการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายน้อยแต่ใช้เวลานานและใช้พื้นที่มาก สำหรับการแยกน้ำมันในน้ำเสียโดยใช้เยื่อแผ่น ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จัดเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีการใช้พลังงานต่ำและใช้เครื่องมือที่ไม่ซับซ้อน

จากการสำรวจงานวิจัย การแยกน้ำมันในน้ำเสียด้วยกระบวนการ ultrafiltration (UF) โดยส่วนใหญ่จะเน้นในลักษณะการนำไปใช้งาน แต่การอธิบายในเชิงกลไกยังไม่ชัดเจนมากนัก เช่น Bhavé [1] ใช้เยื่อแผ่น microporous alumina ที่มีรูพรุนขนาด 40 และ 500 Å แยกน้ำมันในน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 80-120 ppm หลังจากแยกแล้วปริมาณน้ำมันลดลงเหลือ 2-5 ppm ซึ่งสามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ Goldsmith [2] ทดลองแยกน้ำมันในน้ำเสียจากท่าเรือโดยใช้เยื่อแผ่น Abcor (HFA-251) พบว่าเมื่อมีการเติมกรดในน้ำเสียพบว่า จะทำให้ anionic

surfactant ใน emulsified oil จะเกิดการรวมตัวกับประจุบวกในกรด และมีผลให้หยดนํ้ามันเกิดการรวมตัวกันได้นขนาดที่ใหญ่ขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันดีกว่าการแยกโดยไม่มีการเติมกรด

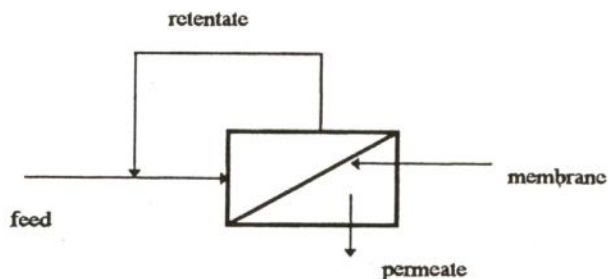
งานวิจัยของ Lee, Fane และ Fell [3] ศึกษาการแยกน้ำมันที่เป็น emulsified oil โดยใช้กระบวนการ UF โดยทดลองแบบแบบใช้ stirred cell ขนาดพื้นที่เยื่อแผ่น 15 cm² ในการทดลองมีการใช้เยื่อแผ่นหลายชนิดและน้ำมันที่ใช้เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ ผลงานวิจัยนั้นนอกจากจะแสดงผลความเป็นไปได้ของกระบวนการในรูปฟลักซ์และการกักกัน (รีเจคชัน) แล้ว ยังอธิบายถึงกลไกการเปลี่ยนขนาดของอิมัลชัน (emulsion) ระหว่างการกรองเนื่องจากแรงเฉือน

Hlavacek [4] ได้วิเคราะห์การแตกตัวของอิมัลชันในน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นจากการไหลผ่านเยื่อแผ่น microfiltration (MF) หลายชนิดโดยได้ทดลองกับน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอลูมิเนียม และพบว่าขนาดของอิมัลชันที่ผ่านเยื่อแผ่นแล้วใหญ่กว่าเดิม และได้อธิบายว่าอิมัลชันซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นมากถูกปิดอัด (ภายใต้ความดันในการป้อนสาร) เพื่อที่จะผ่านรูเยื่อแผ่นซึ่งสามารถทำให้ฟิล์มของ surfactant รอบๆ อิมัลชันหลุดออก น้ำมันจึงสามารถสัมผัสกับผนังรูพรุนของเยื่อแผ่นได้และเกิดการรวมตัวใหญ่ขึ้น หลังจากนั้น surfactant จึงไปจับตัวอยู่รอบหยดนํ้ามันใหม่ทำให้ขนาดของอิมัลชันในเฟอมีเอทใหญ่ขึ้น ซึ่งเมื่อนำเฟอมีเอทไปให้ความร้อนกวน และตั้งทิ้งไว้จะเกิดการแยกชั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ [4] จึงเน้นการใช้เยื่อแผ่น MF เพื่อการรวมตัวของอิมัลชันซึ่งจะทำให้แยก emulsified oil ได้ง่ายขึ้น

2. ทฤษฎี

กระบวนการแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์อาศัยหลักการป้อนสารละลายภายใต้ความดันให้ผ่านเยื่อแผ่นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการกักกันสารที่ต้องการ (หรือมีคุณสมบัติในการเลือกผ่าน)

ซึ่งจะเป็นผลให้ได้สารละลายสองส่วน คือ ส่วนเข้มข้นรีเทนเทท (retentate) และส่วนเจือจางเพอมีเอท (permeate) (ดูรูปที่ 1)



รูปที่ 1 แสดงหลักการของกระบวนการเยื่อแผ่น

สำหรับกระบวนการเยื่อแผ่นที่จัดว่าเป็นกระบวนการ ultrafiltration (UF) นั้น จะต้องป้อนสารละลายภายใต้ความดันในช่วง 100-200 kPa และใช้เยื่อแผ่น UF มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 10-1000 Å ซึ่งสามารถใช้แยกสารจำพวกโปรตีน แบคทีเรีย และคอลลอยด์ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การเพิ่มความเข้มข้นโปรตีนในทางนม การทำน้ำผลไม้ให้ใส การผลิตน้ำสะอาด การบำบัดน้ำทิ้ง และมีการประยุกต์ทางเทคโนโลยีชีวภาพ การประเมินสมรรถนะของกระบวนการ UF ประเมินจากค่าฟลักซ์ (น้ำหนักหรือปริมาตรของเพอมีเอท/พื้นที่เยื่อแผ่น/เวลา) และจากค่ารีเจคชัน ค่าฟลักซ์สามารถประมาณได้จากสมการอนุกรมความต้านทาน (resistance-in-series) ดังนี้

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

เมื่อ J_v = อัตราการไหล หรือฟลักซ์ ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$)

ΔP = ความดันในการป้อนสารละลาย (Pa)

μ = ความหนืดของเพอมีเอท (Pa.s)

R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหล (m^{-1})

โดย $R_t = R_m + R_{cf} + R_{if}$

R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น

R_{cf} = ความต้านทานเนื่องจากการเกิด concentration polarization และจากการสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น

R_{if} = ความต้านทานเนื่องจากการ fouling หรือการสะสมภายในรูพรุนของเยื่อแผ่น

ค่าความต้านทานต่างๆ สามารถคำนวณได้จากผลการทดลองและค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดดังเสนอไว้ในงานวิจัยของ Jiratananon และคณะ [5] และ % รีเจคชัน (R) คำนวณได้จาก

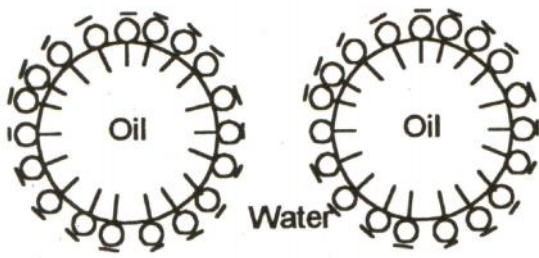
$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_b}\right) \times 100 \quad (2)$$

C_p = ความเข้มข้นในเพอมีเอท

C_b = ความเข้มข้นทางด้านรีเทนเทท

ทั้งฟลักซ์และรีเจคชันขึ้นอยู่กับสภาวะในการดำเนินการ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันและความเร็วในการป้อนสาร และยังอาจขึ้นอยู่กับ interaction ระหว่างองค์ประกอบในสารละลายและเยื่อแผ่น นอกจากนี้การอธิบายผลการทดลองในการแยกโดยเยื่อแผ่นจะต้องอาศัยความเข้าใจเรื่องการเกิด concentration polarization (C.P.) ซึ่งหมายถึงการสะสมของโมเลกุลบริเวณผิวหน้าและบนเยื่อแผ่น ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าจึงสูงกว่าใน bulk solution บริเวณนี้คือ ส่วนที่เป็นความต้านทาน R_{cf} ในการเลือกสภาวะการแยกจึงควรพยายามให้มี C.P. ต่ำ เช่น เพิ่มความเร็วในการไหลผ่านผิวหน้าเยื่อแผ่น เป็นต้น

เนื่องจากกระบวนการ UF มีการใช้งานและศึกษาวิจัยกันมากในกรณีที่น่าไปแยก/เพิ่มความเข้มข้นของสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน และคอลลอยด์ แต่น้ำมันที่เป็นอิมัลชันจัดเป็นคอลลอยด์ที่มีคุณสมบัติต่างจากคอลลอยด์อื่นๆ เช่น ความคงตัว ดังนั้น พฤติกรรมการแยก emulsified oil จึงอาจแตกต่างจากสารละลายอื่นๆ รูปที่ 2 แสดงลักษณะของน้ำมันอิมัลชันซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็น emulsifier อยู่ด้วย โดยที่ emulsifier ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่ชอบน้ำ



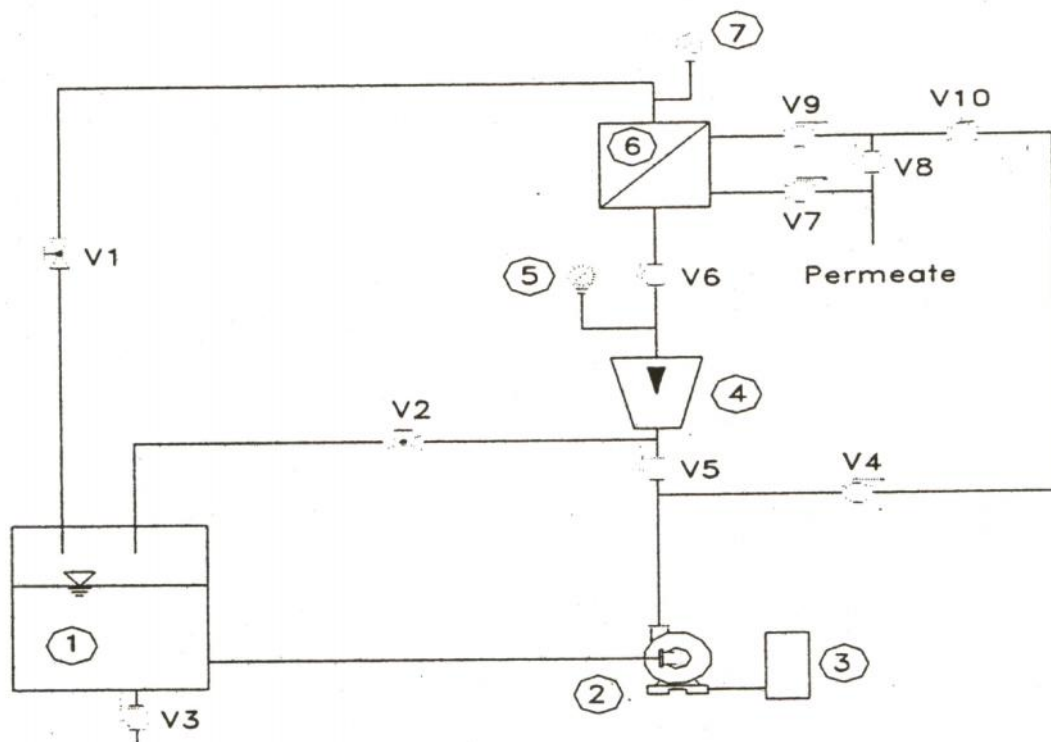
รูปที่ 2 อิมัลชันของน้ำมันในน้ำ

(hydrophilic) ซึ่งจะจับกับน้ำ และส่วนที่ชอบไขมัน หรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (lipophilic or hydrophobic) เมื่อนำมาผสมกับน้ำจะจับกันเป็นหยดน้ำมันในน้ำ ดังนั้นในการศึกษาศักยภาพของกระบวนการ UF ใน

การแยก emulsified oil จากน้ำเสีย จึงจำเป็นต้อง มีความเข้าใจกลไกการแยกที่ชัดเจนด้วย

3. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้กระบวนการ UF แยกน้ำมันในน้ำเสียโดยพิจารณาประสิทธิภาพในการแยกจากค่าฟลักซ์ และรีเจคชัน และมีการทดลองเปรียบเทียบผลการแยก น้ำมันระหว่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์กับ น้ำเสียสังเคราะห์ รวมทั้งมีการอธิบายกลไกที่เกิดขึ้น เพื่อเสริมความเข้าใจพื้นฐานที่จะเป็นประโยชน์ต่อการ ประยุกต์ใช้ต่อไป

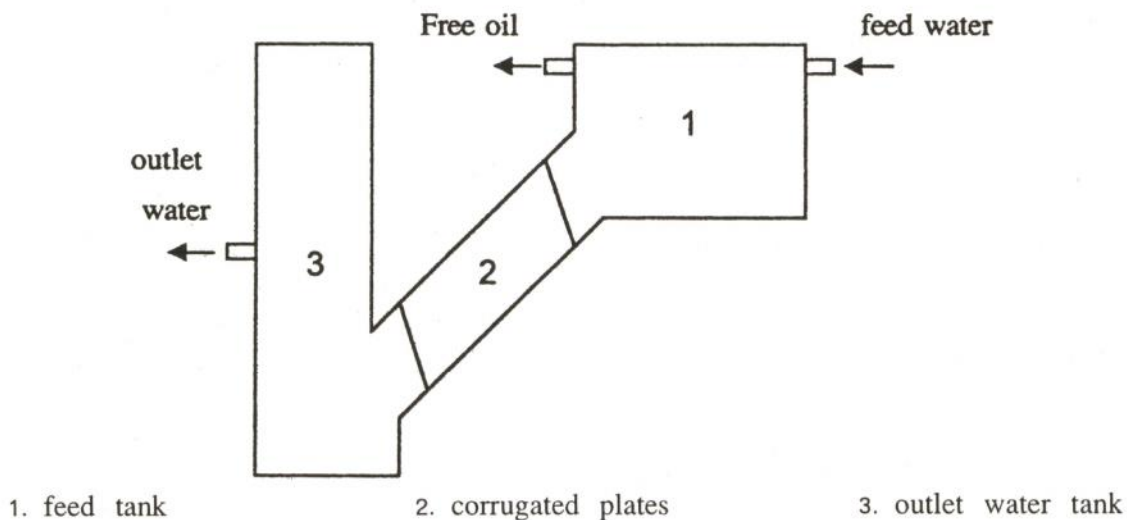


- ① feed tank
- ② pump
- ③ Inverter

- ④ flow meter
- ⑤ pressure gauge
- ⑥ membrane module

- ⑦ pressure gauge

รูปที่ 3 แผนภาพของอุปกรณ์เยื่อแผ่น UF



รูปที่ 4 อุปกรณ์แยก free oil แบบแผ่นลูกลอน

4. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการทดลอง

4.1 อุปกรณ์

ระบบ UF ประกอบด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกแบบ multichannel monolith (ผลิตโดย บริษัท NGK Insulators จำกัด ประเทศไทย) MW cut-off 150,000 (pore size $0.05 \mu\text{m}$) มีพื้นที่ในการกรอง 0.12 m^2 ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้ยังใช้เยื่อแผ่นชนิดเดียวกันแต่มี MW cut-off 50,000 (pore size $0.01 \mu\text{m}$) ในบางการทดลอง

ในการดำเนินการสารป้อนจะไหลผ่านปั๊ม (2) เครื่องวัดอัตราการไหล (4) และเกจวัดความดัน (5) เข้าสู่หน่วยของเยื่อแผ่น (6) รีเทนเทจจะไหลผ่านเกจวัดความดัน (7) และวาล์วควบคุมความดัน (V1) กลับสู่ถังป้อน (1) เพื่อบริการที่ผ่านรูปพรุนของเยื่อแผ่น จะไหลผ่านบอลล์วาล์ว (V8, V9) ลงสู่ภาชนะรองรับ ส่วนสารป้อนจะไหลผ่านวาล์วควบคุมความดัน (V2) กลับสู่ถังป้อนในการปรับความดันและอัตราการไหลของสารป้อน สามารถทำได้โดยการปรับวาล์วควบคุมความดัน (V1, V2) และ inverter (3)

อุปกรณ์แยกแบบแผ่นลูกลอน (Corrugated plate inceptor) เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อแยก free

oil ประกอบด้วยถังป้อนความจุ 15 l ชุดแผ่นลูกลอน ทำด้วยอะคริลิกยาว 30 cm กว้าง 14.5 cm วางซ้อนกัน 7 แผ่น ระยะห่างระหว่างแผ่น 1 cm (ดูรูปที่ 4) น้ำเสียในถังป้อนเมื่อไหลผ่านแผ่นลูกลอน free oil จะถูกแยกโดยไหลย้อนกลับขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำเสียในถังป้อนและถูกแยกโดย overflow ส่วนของน้ำที่หนักกว่าน้ำมันถูกแยกออกทางท่อของถังน้ำออกโดยการ overflow เช่นกัน

4.2 น้ำเสีย

4.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ เตรียมจากการเติมน้ำมันหล่อลื่นกับน้ำมันซุบ (แทนส่วนที่เป็น free oil) และน้ำมันหล่อเย็น (แทนส่วนที่เป็น emulsified oil) ลงในน้ำกลั่น ในอัตราส่วน free oil : emulsified oil เป็น 1:5 โดยน้ำหนัก ในการเตรียมมีการกวนด้วยความเร็ว 270 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที

4.2.2 น้ำเสียจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ มีความเข้มข้นน้ำมันประมาณ 4,000-10,000 ppm (free oil ประมาณ 80% และ emulsified oil ประมาณ 20% โดยน้ำหนัก) ก่อนนำไปทดลองในกระบวนการ UF ต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัด free oil โดยใช้อุปกรณ์แผ่นลูกลอน

4.3 วิธีการทดลอง

4.3.1 การทดลองแยกน้ำมัน free oil ออกจาก emulsified oil ใช้อุปกรณ์แผ่นลูกกลอนเป็นการทดลองแบบแบช ใช้น้ำเสียครึ่งละ 40 ลิตร และใช้เวลาในการทดลอง 30-60 นาที

4.3.2* การทดลองเพื่อศึกษาผลของความดันและอัตราการไหลที่มีต่อค่าฟลักซ์และรีเจคชันในช่วงความดัน 120-500 kPa อัตราการไหล 20, 50 และ 68 l/min (หรือความเร็ว 1.5, 3.5 และ 4.7 m/s) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำมันรวม 2310 ppm โดยเปลี่ยนตัวแปรทีละค่า แต่จะการทดลองใช้เวลา 30 นาที ทำการทดลองที่ความเข้มข้นคงที่หรือนำเฟอมีเอทกลับสู่ถังป้อน

4.3.3* การทดลองที่ความดันและอัตราการไหลคงที่ใช้อย่างน้ำเสียจริง และน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันต่างกัน (924-154,000 ppm) ปริมาตรเริ่มต้นของน้ำเสีย 25 l เก็บตัวอย่าง

เฟอมีเอทจนปริมาตรในถังป้อนเหลือ 10 l

4.3.4 การทดลองที่ความดันและอัตราการไหลคงที่ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นน้ำมันรวม 2310 ppm นำเฟอมีเอทที่ได้ไปแยกน้ำมันต่อโดยใช้เยื่อแผ่นที่มี MW cut-off 50,000 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

4.3.5 การทำความสะอาดเยื่อแผ่น หลังจากสิ้นสุดทุกการทดลอง ล้างเยื่อแผ่นด้วยน้ำประปา (แบบวนกลับ) 4-5 ครั้ง ๆ ละ 2-10 นาที ตามด้วยน้ำกรอง 1 ครั้ง (20 นาที) และล้างด้วยสารละลายดีเทเจนท์ แล้วล้างด้วยน้ำกรองอีกครั้งจนสะอาด หรือได้ค่าฟลักซ์ของน้ำใกล้เคียงกับเยื่อแผ่นที่ยังไม่ได้ใช้งาน

4.3.6 การวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง วิเคราะห์ของแข็งรวม (Total solids) น้ำมัน (ใช้วิธีของ Alpha [6]) ความหนืดโดย Cannon-Fenske viscometer และขนาดของอิมัลชันโดยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Microtac รุ่น 7997-10

ตารางที่ 1 ผลการแยกน้ำมันด้วยอุปกรณ์แผ่นลูกกลอน

องค์ประกอบ	ปริมาณขององค์ประกอบในน้ำเสีย (ppm)			
	น้ำเสีย		น้ำเสียผ่านการบำบัด	
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2
total oil	4923	3990	1108	1050
free oil	4020	3170	213	236
emulsified oil	903	820	895	814
total solids	10790	8040	3080	2984
การแยกน้ำมันรวม (%)			77.40	73.68
การแยก free oil (%)			94.47	92.55
การแยก emulsified (%)			0.88	0.73

* การทดลองในหัวข้อ 4.3.2-4.3.3 ใช้เยื่อแผ่นที่มี MW cut-off 150,000

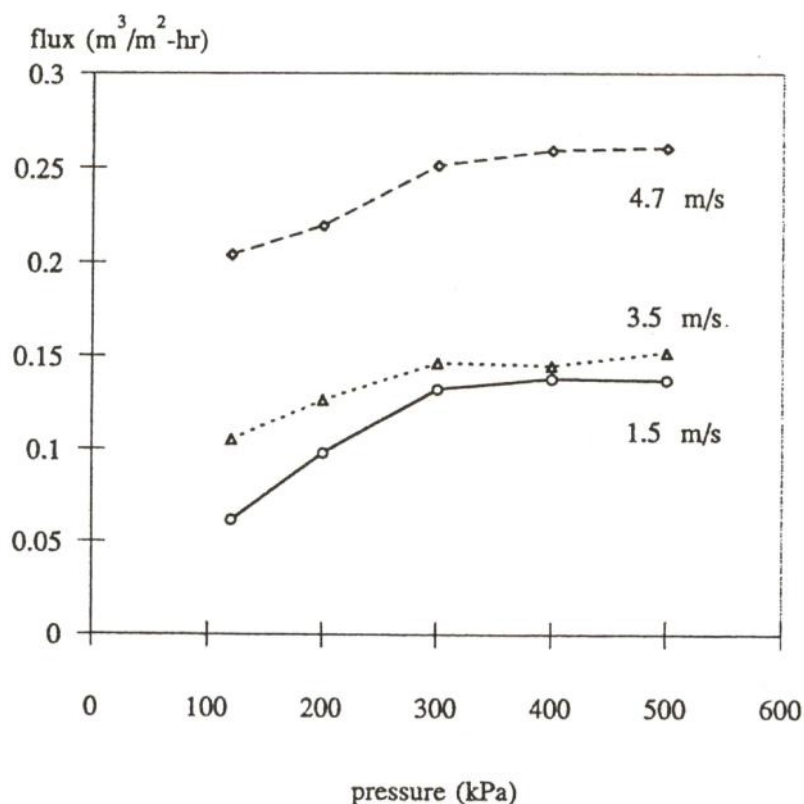
5. ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 การแยกน้ำมันโดยใช้อุปกรณ์แผ่นลูกลอน ใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ 2 ตัวอย่าง วิเคราะห์ส่วนประกอบต่างๆ หลังจากการแยกได้ผลดังตารางที่ 1 น้ำเสียทั้งสองตัวอย่างมีปริมาณน้ำมันรวมใกล้เคียงกัน อุปกรณ์ที่ใช้สามารถแยกน้ำมันรวมไว้ 74-77 % เมื่อพิจารณาในรูปของ free oil แยกได้ประมาณ 93% และแยก emulsified oil ได้ 0.8% เท่านั้น ทั้งนี้การทำงานอาศัยผลของความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำมันกับน้ำ สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ก็นำมาแยก free oil โดยอุปกรณ์นี้เช่นกัน

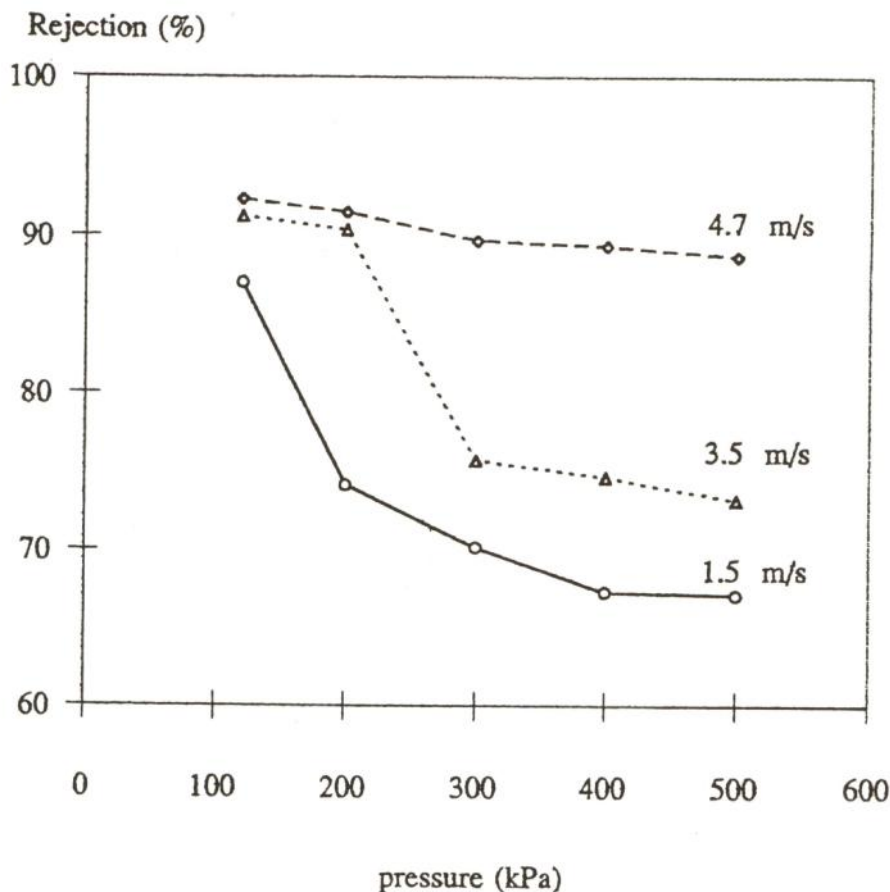
น้ำเสียที่เก็บจากโรงงานแต่ละครั้งมีความเข้มข้นไม่เท่ากัน ความเข้มข้นสูงสุดของน้ำมันรวมเป็น 9608 ppm องค์ประกอบอื่นๆ ที่ปนอยู่ในน้ำทิ้ง ได้แก่ ฝุ่นละออง และเกลือของโลหะต่างๆ

5.2 ฟลักซ์ของน้ำสะอาดและความต้านทานของเยื่อแผ่น มีการทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำที่อุณหภูมิ 30 °C เพื่อตรวจสอบว่าสามารถทำความสะอาดเยื่อแผ่นจนมีสภาพใกล้เคียงเยื่อแผ่นใหม่คำนวณความต้านทานของเยื่อแผ่น (R_m) ที่มี MW cut-off 150,000 และ 50,000 ได้ 2.0×10^{12} และ $2.4 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าถึงแม้เยื่อแผ่นทั้งสองชนิดจะมีค่า MW cut-off ต่างกัน 3 เท่าแต่ความต้านทานต่างกันประมาณ 1.3 เท่า เท่านั้น

5.3 ผลของความดันและความเร็วการไหลต่อฟลักซ์และรีเจคชัน จาก 15 การทดลองในช่วงความดัน 120-500 kPa และที่ความเร็ว 4.7, 3.5 และ 1.5 m/s ได้ผลดังรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งนำค่าฟลักซ์และรีเจคชัน ที่เวลา 30 นาที พล็อตที่ความดันและความเร็วต่างๆ ผลที่ได้สามารถอธิบายด้วยสมการ(1)



รูปที่ 5 ผลของความดันต่อเพอมีเอชันฟลักซ์ที่ความเร็วในการไหลผ่านเยื่อแผ่นต่างๆ; สภาวะการทดลอง : อุณหภูมิ 30 °C และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 2,310 ppm



รูปที่ 6 ผลของความดันต่อเปอร์เซ็นต์การกักกันน้ำมันที่ความเร็วในการไหลผ่านเยื่อแผ่นต่าง ๆ สภาวะการทดลอง : อุณหภูมิ 30 °C และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 2,310 ppm

ประกอบกับเหตุผลทาง hydrodynamics คือ การเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นตามสมการ (1) และฟลักซ์มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ที่ความดัน 300 kPa ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับที่พบในกระบวนการ UF ของสารละลายโปรตีนและแป้งที่มีนักวิจัยหลายคน [7] [8] อธิบายไว้ว่าที่ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นสูง โปรตีนเปลี่ยนรูปเป็นเจลและถูกอัดแน่นขึ้นทำให้ความต้านทานของชั้นเจลเพิ่มขึ้นหรือการเพิ่มความดันจะไม่มีผลให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นอีกแต่น้ำมันเป็นสารอินทรีย์ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ดังนั้นจึงคาดว่าเป็นการสะสมบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นของอิมัลชันซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดได้

การเพิ่มความเร็วมักเป็นการเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น ผลการคำนวณค่า Reynolds number พบ

ว่ามีค่า 7000-22000 ซึ่งจัดเป็นช่วงการไหลแบบปั่นป่วน แต่ความแตกต่างของค่าฟลักซ์ที่ความเร็ว 3.5 และ 4.7 m/s ค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับเมื่อความเร็วเพิ่มจาก 1.5 ไปเป็น 3.5 m/s ทั้งนี้อาจเกิดจากคุณสมบัติของน้ำมันซึ่งเป็นอิมัลชันที่มีการกระจายของขนาดหยด อยู่ในช่วงกว้างและอาจมีการเปลี่ยนแปลงขนาดระหว่างการแยก ดังจะได้อธิบาย/เสนอผลเสริมในส่วนต่อไป

จากรูปที่ 6 รีเจคชันของน้ำมันเพิ่มขึ้นกับความเร็วมักจะลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น การเพิ่มความเร็วดังที่ได้อธิบายแล้วว่าเพิ่มแรงเฉือนและทำให้เกิดการแพร่กลับ (จากผิวหน้าเยื่อแผ่น) ไปใน bulk น้ำมันจึงถูกกักกันได้มากขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการแยกน้ำมันแตกต่างจากสารโมเลกุลใหญ่อื่นๆ เช่น โปรตีน หรือ แป้ง ซึ่งการเพิ่มความเร็วมักจะ

ทำให้รีเจคชันลดลงและการเพิ่มความดันเพิ่มรีเจคชัน เพราะชั้นของโมเลกุลใหญ่ถูกอัดตัวแน่นและช่วยกักกัน โมเลกุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิมัลชันเป็นหยดของเหลว เมื่อถูกแรงกระทำสามารถเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ได้จึงมีโอกาสน้ำผ่านเยื่อแผ่นทำให้รีเจคชันลดลง ผลที่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ [6] Anderson [7] และ Mason [8]

5.4 ผลการเพิ่มความเข้มข้นน้ำมันใน น้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่างกันที่สภาวะการ

ตารางที่ 2 ผลการแยกน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง เดียวกันใช้เยื่อแผ่น MW cut-off 150,000

น้ำเสีย	ความเข้มข้นรวม (ppm)	ฟลักซ์ ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{-h}$)	ความเข้มข้นใน เพอมีเอท (ppm)	รีเจคชัน (%)
1. สังเคราะห์	924	0.225	96	94.90
2. จริง	1108	0.200	128	94.46
3. จริง	1050	0.200	135	89.94
4. สังเคราะห์	2310	0.197	173	96.4
5. สังเคราะห์	77000	0.110	956	98.50
6. สังเคราะห์	154000	0.072	2324	98.70

รูปที่ 7 และ 8 ได้นำค่าฟลักซ์และรีเจคชันของ น้ำทิ้ง ตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 (ดูตารางที่ 2) มาพล็อต เทียบกับเวลา ฟลักซ์ของน้ำเสียจริงและน้ำเสีย สังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าถึงแม้ว่าน้ำเสียจริง จะมีสิ่งเจือปนพวกเกลือของโลหะปนอยู่บ้าง แต่ก็ไม่มี ผลต่อฟลักซ์มากนัก ค่ารีเจคชันของน้ำมันก็ค่อนข้าง ใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่ารีเจคชันของของแข็งรวม เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีองค์ประกอบอื่นๆ อีก เช่น surfactant สารป้องกันสนิม สารด้านการเกิดฟอง เป็นต้น สารเหล่านี้มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนของ เยื่อแผ่นจึงผ่านเยื่อแผ่นได้

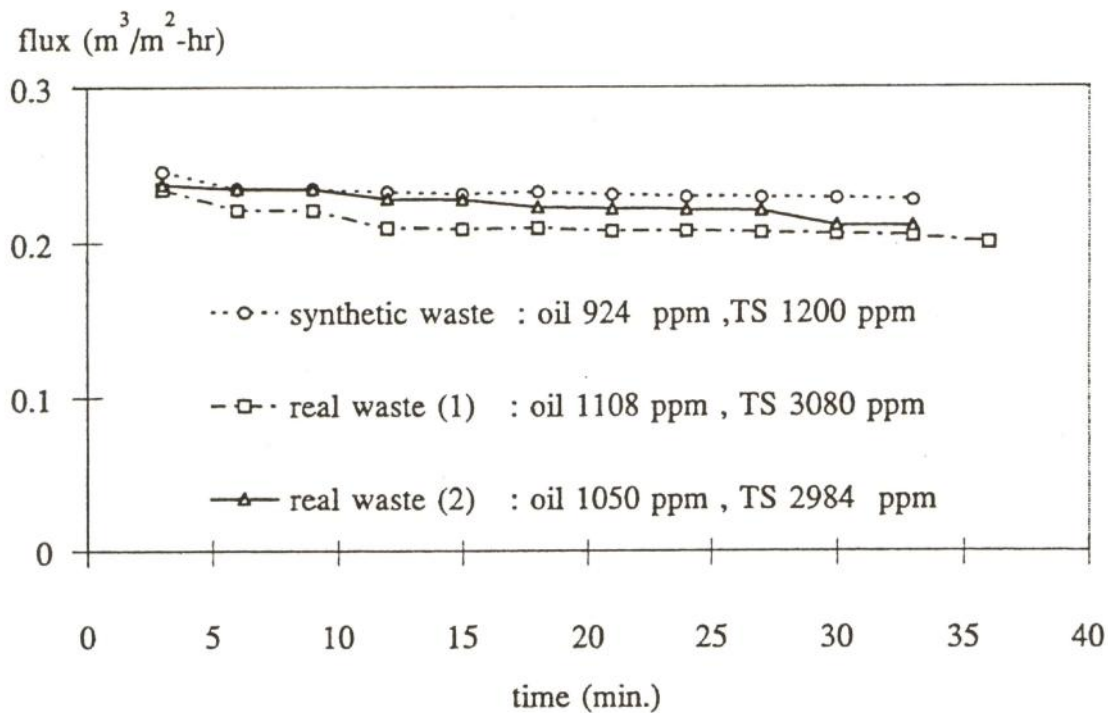
จากผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณ

ทดลองคงที่ จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.3 พบว่า สภาวะในการแยกควรเป็นที่มีความเร็วสูง (เพราะให้ ฟลักซ์และรีเจคชันสูง) 4.7 m/s และที่ความดันต่ำ 120 kPa อุณหภูมิคงที่ 30°C ผลการทดลองในส่วนนี้ แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อน้ำทิ้งมีความ เข้มข้นสูง ก็จะทำให้ค่าที่ผ่านการแยก (เพอมีเอท) มี น้ำมันปนออกมามากด้วย (คือแม้ว่าเมื่อพิจารณาจาก ค่ารีเจคชันจะค่อนข้างสูงก็ตาม) และได้ค่าฟลักซ์ต่ำ เพราะที่ความเข้มข้นสูงย่อมเกิด C.P. ได้สูง

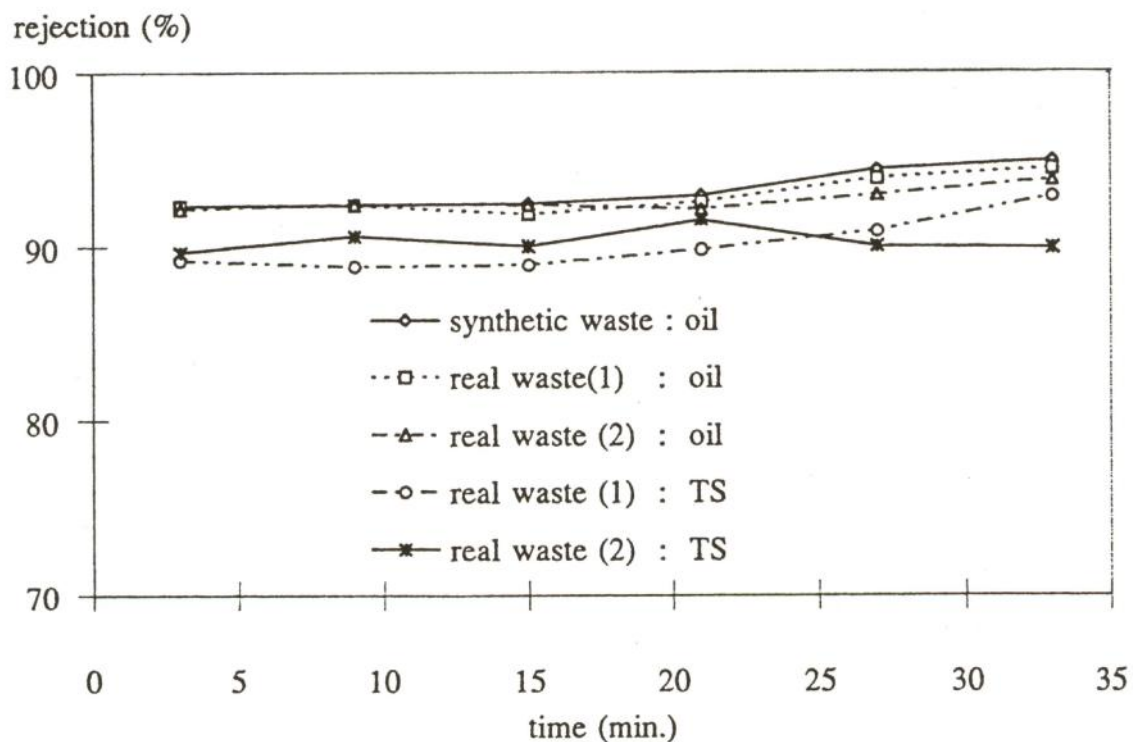
น้ำมันในเพอมีเอทเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นในสาร ละลายป้อน เช่น

งานวิจัยของ	ความเข้มข้นน้ำมัน ในสารป้อน (ppm)	ความเข้มข้นน้ำมัน ในเพอมีเอท (ppm)
Bhave [1]	80-120	2-4
Bansal [5]	1,000-5,000	≤ 80
Goldsmith [2]	37300	764

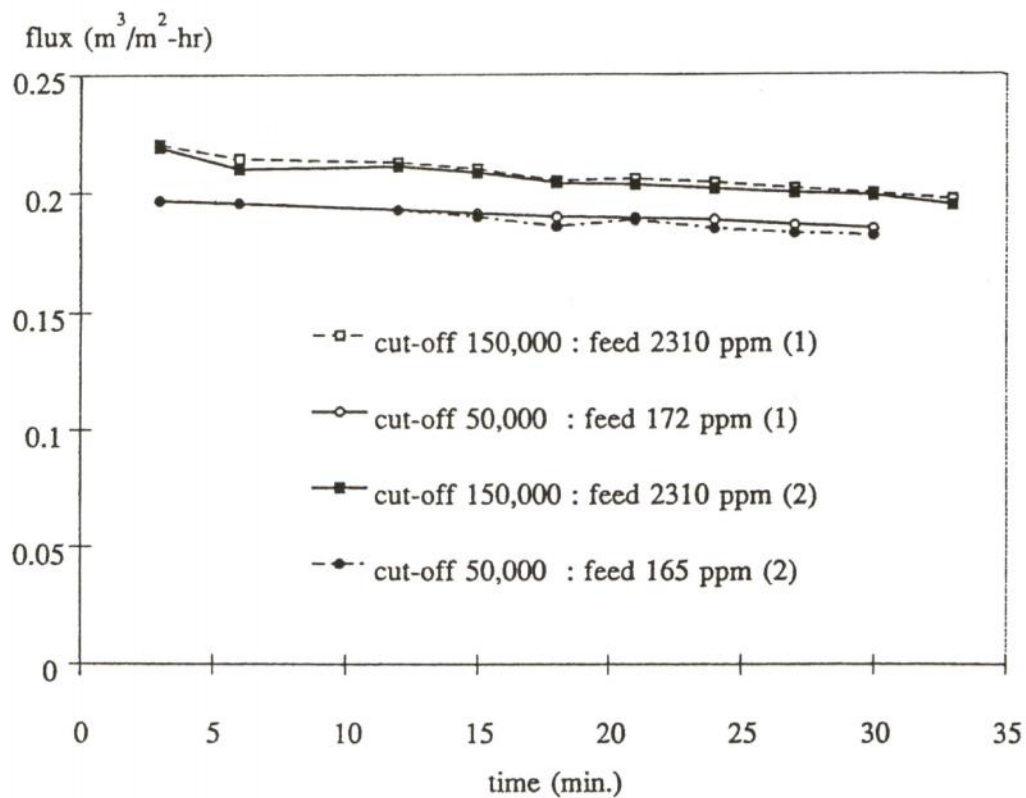
ผลการแยกน้ำมันโดยใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุน $0.05 \mu\text{m}$ นี้ได้ความเข้มข้นของน้ำมันสูงกว่าค่า มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนด ว่าความเข้มข้นต้องไม่เกิน 5 ppm แนวทางในการ



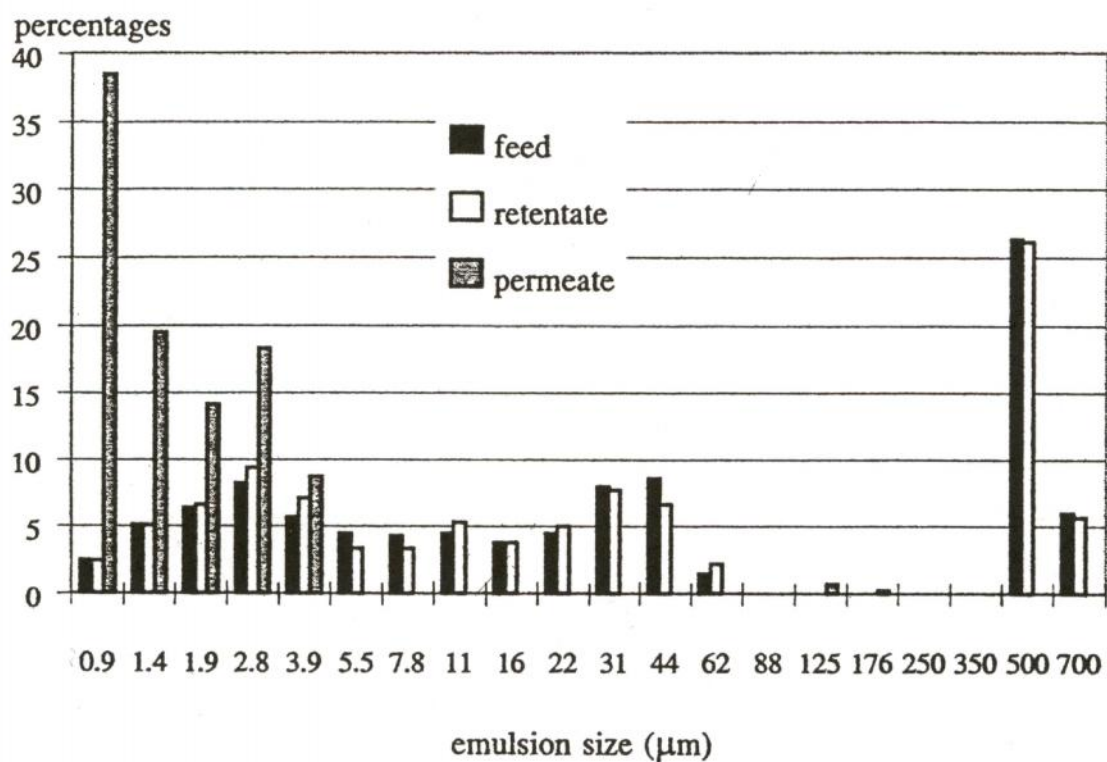
รูปที่ 7 ค่าเพอมีเอชันฟลักซ์ในการแยกน้ำมันในน้ำเสียแบบเพิ่มความเข้มข้นในระบบแบบช ; สภาวะการทดลอง : ความดัน 120 kPa, อุณหภูมิ 30 °C และความเร็วในการไหลผ่านเยื่อแผ่น 4.7 m/s



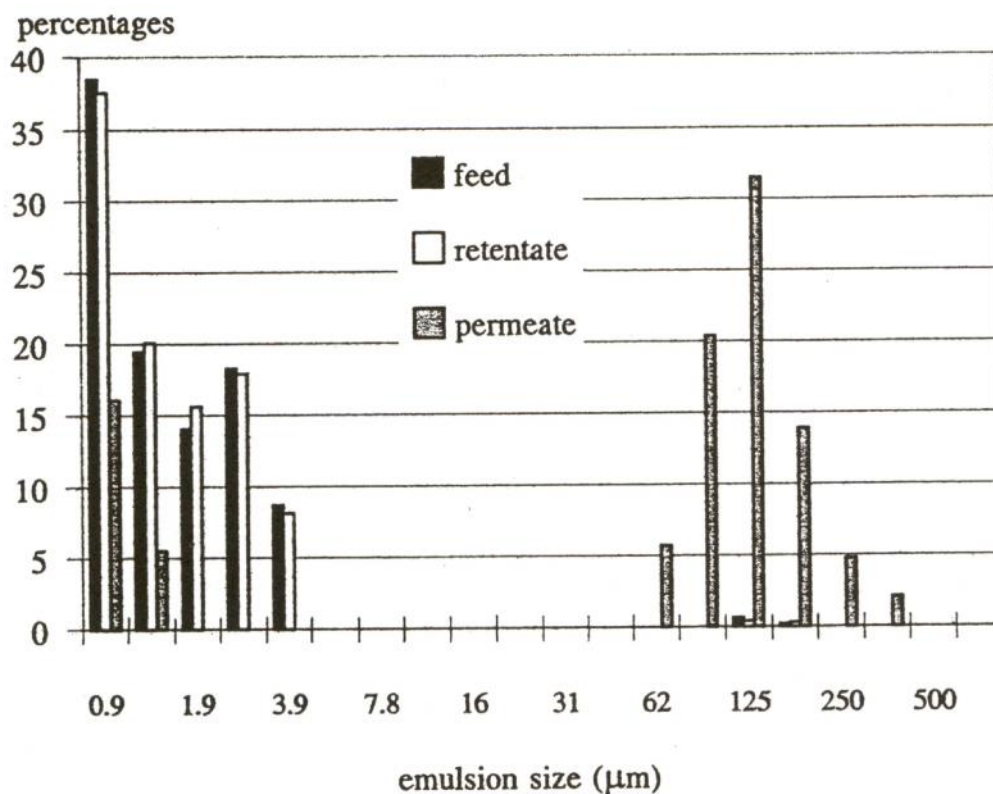
รูปที่ 8 ค่าเปอร์เซ็นต์การกักกันในการแยกน้ำมันในน้ำเสียแบบเพิ่มความเข้มข้นในระบบแบบชภาวะการทดลอง : ความดัน 120 kPa, อุณหภูมิ 30 °C และความเร็วในการไหลผ่านเยื่อแผ่น 4.7 m/s



รูปที่ 9 พลั๊กซ์ของการแยกน้ำมันด้วยเยื่อแผ่นที่มี MWCO 150,000 และ 50,000 ; สภาวะการทดลอง : ความดัน 120 kPa, ความเร็วในการไหลผ่านเยื่อแผ่น 4.7 m/s และอุณหภูมิ 30 °C



รูปที่ 10 ค่าการกระจายขนาดหยดน้ำมันในการแยกด้วยเยื่อแผ่น MWCO 150,000 สภาวะการทดลอง : ความดัน 120 kPa, ความเร็วในการไหลผ่านเยื่อแผ่น 4.7 m/s, อุณหภูมิ 30 °C

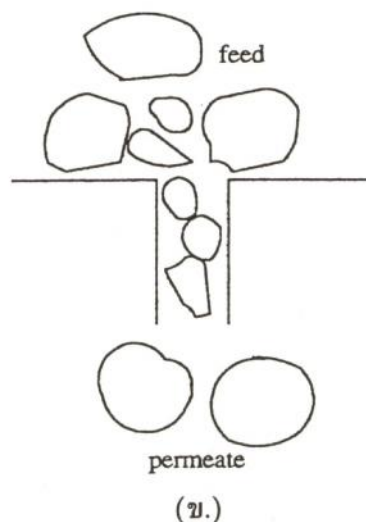
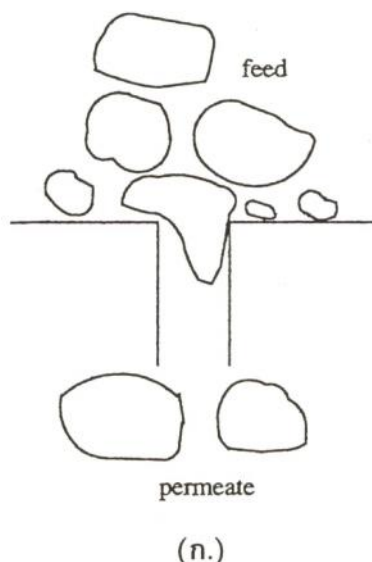


รูปที่ 11 ค่าการกระจายขนาดหยดน้ำมันในการแยกด้วยเยื่อแผ่น MWCO 50,000 สภาวะการทดลอง : ความดัน 120 kPa, ความเร็วในการไหลผ่านเยื่อแผ่น 4.7 m/s และ อุณหภูมิ 30 °C

ปรับปรุงระบบที่ใช้แยกน้ำมันที่มีความเข้มข้นสูง คือนำมาแยกด้วยเยื่อแผ่น UF ที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง ดังนั้น จากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2310 ppm เมื่อนำมาแยกด้วยเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุน 0.05 μm จะได้เพอมีเอทที่มีความเข้มข้นประมาณ 165-172 ppm และนำมาแยกด้วยเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุน 0.01 μm ผลของค่าฟลักซ์แสดงในรูปที่ 9 โดยค่าฟลักซ์จากเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่ามีค่าสูงกว่า และผลของรีเจกชันเป็นไปในทางตรงกันข้าม คือ เยื่อแผ่นรูพรุนเล็ก จะให้ค่ารีเจกชันสูง คือ 98% ความเข้มข้นของน้ำมันในเพอมีเอท หลังจากผ่านการแยก 2 ขั้นตอนนี้ลดเหลือ 2-8 ppm ซึ่งจัดได้ว่าเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีพอที่จะนำกลับมาใช้ในโรงงานหรือปล่อยทิ้งได้

5.6 ผลการวิเคราะห์ขนาดอิมัลชันในน้ำเสียสังเคราะห์ จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.5 ได้นำน้ำเสียซึ่งเป็นน้ำป้อน รีเทนเททและเพอมีเอทจากสอง

ขั้นตอน (ใช้เยื่อแผ่นขนาดรูพรุน 0.05 และ 0.01 μm ตามลำดับ) มาวิเคราะห์ขนาดอิมัลชัน เครื่องมือที่ใช้สามารถวัดขนาดได้ในช่วง 0.9-700 μm ขนาดของอิมัลชันในสารป้อน (ความเข้มข้น 2310 ppm) รีเทนเทท และเพอมีเอท แสดงในรูปที่ 10 และ 11 อิมัลชันในสารป้อนและรีเทนเททมีขนาดใกล้เคียงกัน อิมัลชันในเพอมีเอทส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 3.9 μm ซึ่งก็ยิ่งใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่น (0.05 μm) อธิบายได้ว่าอิมัลชันซึ่งอยู่ภายใต้ความดันเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจึงผ่านเยื่อแผ่นได้ (รูปที่ 12 ก.) หรืออิมัลชันที่มีขนาดใกล้เคียงและขนาดเล็กกว่าสามารถผ่านรูพรุนได้โดยขณะที่ผ่านทำให้ฟิล์มของ surfactant หลุดออกอิมัลชันเกิดการรวมตัวใหม่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งอาจเกิดขึ้น 2 ปรากฏการณ์ขึ้นพร้อมๆ กัน ในกรณีของการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นขนาดรูพรุน 0.01 μm แสดงผลของขนาดอิมัลชันในรูปที่ 12 ข.



รูปที่ 12 กลไกการแยกน้ำมันในน้ำเสีย (ก.) หยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและผ่านเยื่อแผ่นไปได้ (ข.) หยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กกว่าและใกล้เคียงกับรูพรุนของเยื่อแผ่นเกิดการรวมตัวกันในขณะผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น

ซึ่งก็พบว่าอิมัลชันในเฟอมีเอทมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ทำนองเดียวกัน และยังรูพรุนมีขนาดเล็กมากโอกาสหลุดของ surfactant ยิ่งสูงขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ [3] และ Hlavacek [4]

5.7 ผลการวิเคราะห์ความต้านทาน การวิเคราะห์ความต้านทานต่อการไหลในรูปของความต้าน ย่อย (R_m , R_{cf} และ R_{if}) มีประโยชน์ในการ ปรับปรุงสมรรถนะของระบบ เพราะทำให้ทราบว่าความ ต้านใดมีค่าสูงหรือมีอิทธิพลต่อค่าฟลักซ์ โดยปกติ ความต้านทานของเยื่อแผ่น (R_m) จะมีค่าต่ำและไม่ขึ้น อยู่กับสภาวะการดำเนินการ ส่วน R_{cf} และ R_{if} ขึ้น อยู่กับสภาวะ คือ พบว่า R_{if} เพิ่มขึ้นกับความดัน เพราะตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็ก เช่น emulsifier (หลุดจากอิมัลชัน) สารป้องกันสนิม เป็นต้น ถูกดัน ผ่านรูพรุนและมีโอกาสเกิดการสะสมภายในรูพรุน (หรือเกิด fouling) มากขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตพบ ว่า ในช่วงความดันต่ำ $R_{cf} > R_{if}$ เมื่อความดันสูงขึ้น $R_{if} > R_{cf}$ แสดงว่าที่ความดันยิ่งสูง การเกิด fouling

ภายในรูพรุนยิ่งมากขึ้น ส่วนการเพิ่มความเร็ว (ที่ความ ตันคงที่) ทำให้ R_{cf} และ R_{if} ลดลงเพราะลดการ เกิด C.P. หรือทำให้ความต้านทานเนื่องจากการเกิด C.P. ลดลง และมีการแพร่กลับ (ไปยัง bulk solution) ของหยดน้ำมันมากขึ้นจึงลดโอกาสการสะสมหรือการเกิด fouling ภายในรูพรุน (R_{if}) ด้วยเช่นกัน

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้เสนอผลการนำเยื่อแผ่นสังเคราะห์ มาใช้ในการแยกน้ำมันซึ่งอยู่ในรูปอิมัลชันออกจาก น้ำเสีย ในเบื้องต้นแยกน้ำมันที่เป็น free oil ก่อน โดยใช้อุปกรณ์แผ่นลูกลอน ที่พัฒนาขึ้นและพบว่า สามารถแยก free oil ได้ประมาณ 93% ในส่วนของ การแยก emulsified oil โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกส์ ฟลักซ์ (หรืออัตราการแยก) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น น้ำมัน ถ้าความเข้มข้นน้ำมันในสารป้อนสูงค่าฟลักซ์จะ ต่ำและโอกาสที่อิมัลชันจะหลุดปนอยู่ในเฟอมีเอทก็สูง ขึ้นด้วย ในกรณีที่ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำทิ้งต่ำ การเลือกเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนเล็กจะทำให้ได้เฟอ- มีเอทที่มีน้ำมันเจือปนต่ำที่สามารถปล่อยทิ้งหรือนำ

กลับไปใช้ ถ้าความเข้มข้นน้ำมันในสารป้อนสูงสมควรที่จะแยกเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า ดังที่เสนอไว้ในผลการทดลอง ดังนั้นการแยก emulsified oil โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นจึงเป็นทางเลือกซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ และลักษณะของกระบวนการไม่ยุ่งยาก นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ได้เปรียบกระบวนการบำบัดแบบอื่นๆ คือผลจากการแยกทำให้สามารถนำรีเทนเทท (น้ำมันเข้มข้น) กลับไปมาใช้ใหม่ได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่ามีความเข้มข้นของน้ำมัน 27% ยังมีค่าฟลักซ์ในระดับที่น่าพอใจ คือ $0.039 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-hr}$ น้ำมันเข้มข้นส่วนนี้เมื่อกำจัดน้ำออกโดยการระเหย สามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในส่วนของเพอมีเอทซึ่งมีน้ำมันเหลืออยู่ 2-8 ppm และสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ เช่น Surfactant อาจนำกลับมาใช้ในโรงงานได้ ทั้งนี้ต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบอย่างละเอียด นอกจากนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของระบบโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

1. Bhawe, R.R. 1988. Removal of Oily Contaminants in Wastewater with Microporous Alumina Membrane. AIChE Symposium Series 84, 19-27.
2. Goldsmith, R.L. 1974. Ultrafiltration of Soluble oil wastes. J. WPCE 46, 2182-2192.

3. Lee C.H.P., Fane, A.G., and Fell, C.J.D. 1988. A Fundamental Study of Ultrafiltration of Oil in Water Emulsion. J. Membrane Science, 36, 161-177.
4. Hlavacek, M. 1995. Break-up of Oil-in-Water Emulsions Induced by Permeation Through a Microfiltration Membrane. 102, 1-7.
5. Jiraratananon, R., Uttapap, D. and Tangamornsuksan, C. 1997. Self-forming Dynamic Membrane for Ultrafiltration of Pineapple Juice. J. Membrane Science, 129, 135-144.
6. Apha, A. 1971. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13rd edition. American Public Health Association, N.Y.
7. Nilssen, J.L. 1988. Fouling of an Ultrafiltration Membrane by a Dissolved Whey Concentrate and Whey Proteins. J. Membrane Science, 36, 147-160.
8. Chiang, B.H. and Cheryan, M. 1986. Ultrafiltration of Skimmed Milk in Hollow Fibres. J. Food Science. 51, 340-344.