

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

นางสาวปุณทรีย์ เขียวภักดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

TREATMENT OF OILY WASTEWATER BY ULTRAFILTRATION PROCESS

Miss Phuntharee Khiewpuckdee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการ อัลตราฟิลเตรชัน
โดย	นางสาวปณทรีย์ เขียวภักดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ฉัตรแก้ว ตันสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุภา ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. ฉัตรแก้ว ตันสกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนิก)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศรายุทธ ราชู)

ปทุมทรีย์ เขียวภักดี: การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Treatment of Oily Wastewater by Ultrafiltration Process) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: ผศ.ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ฉัตรแก้ว ตันสกุล,
 198 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration process) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน คือ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม โดยศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมและการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia และสมการการกรองที่ผิวหน้า (Surface filtration equation) มาประยุกต์ใช้ในการอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรน รวมไปถึงการศึกษาลักษณะการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี จากการศึกษาพบว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าร้อยละ 95 โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการเดินระบบคือ ใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที ทั้งนี้ จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนพบว่าเมมเบรนเกิดการอุดตันแบบการเกิดชั้นเค้ก (Cake formation) ซึ่งมีค่าความพรุน (ϵ) และค่าความหนาของชั้นเค้กเท่ากับ 0.32 และ 3.14 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยเมื่อความดันและความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของเค้ก (α) และค่าความต้านทานของฟาวลิง (R_f) เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความเร็วตามขวางจะทำให้ค่า α และค่า R_f มีค่าลดลง จากการทำทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารเคมีและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความสะอาดด้วยค่าประสิทธิภาพการฟื้นฟูฟลักซ์ (FR) และค่าประสิทธิภาพการกำจัดแรงต้านทานของเมมเบรน (RR) พบว่า เมื่อใช้สาร SDS NaOH และ EDTA ร่วมกันจะสามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้สะอาดที่สุด โดยให้ค่า FR และค่า RR เท่ากับ 96% และ 55% ตามลำดับ

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5270397221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ULTRAFILTRATION / OILY WASTEWATER / FOULING / CHEMICAL WASHING

PHUNTHAREE KHIEWPUCKDEE :TREATMENT OF OILY WASTEWATER BY ULTRAFILTRATION PROCESS.ADVISOR:ASST. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D.,CO-ADVISOR :CHATKAEW TANSAKUL, Ph.D.,198 pp.

The aim of this research is to study Ultrafiltration process for treating the oily-wastewater. Two different physical characteristics (cutting oil and palm oil-emulsion) were investigated. The optimal operating condition was determined, as well as, the fouling mechanisms by applying the Hermia's model and the surface filtration equation. Furthermore, the effect of various chemical washing was analyzed in order to propose the appropriate method for membrane fouling recovery. The results showed that the UF membrane can effectively treat the oily-wastewater with efficiency of 95%. The optimal operating condition obtained in this study was at concentration of 1 g/l, TMP of 2.5 Bar and cross-flow velocity equal to 0.24 m/s. By applying the mathematic models, the cake formation fouling mechanisms can be proven. Moreover, 0.32 of cake porosity and 3.14 μm thickness cake layer were calculated. The increase of TMP and inlet oil concentration can enhance the specific cake resistance (α) and fouling resistance (R_f). On the other hand, the increase of cross flow velocity leads to decreasing α and R_f values. The membrane washing was conducted and compared by means of the flux recovery (FR) and the resistance removal (RR). The highest FR and RR values of 96% and 55%, respectively, were obtained from the combining (SDS, NaOH, and EDTA) chemical cleaning agent.

Department : Environmental Engineering... Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year 2011..... Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ฉัตรแก้ว ต้นสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ และดร. ศรายุทธ ราชู ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ดิฉันแก้ไขให้งานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งานห้องปฏิบัติการและเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	5
2.2 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย.....	8
2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant).....	11
2.4 กระบวนการเมมเบรน.....	13
2.5 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	21
2.6 สมการที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรน.....	30
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอุดตันของเมมเบรน.....	37
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39

บทที่	หน้า
3	54
3.1	54
3.2	59
3.3	59
4	74
4.1	74
4.2	80
4.3	86
4.4	99
4.5	123
4.6	135
5	138
5.1	138
5.2	141
รายการอ้างอิง.....	142
ภาคผนวก.....	147
ภาคผนวก ก.....	148
ภาคผนวก ข.....	153
ภาคผนวก ค.....	156
ภาคผนวก ง.....	164

บทที่	หน้า
ภาคผนวก จ.....	175
ภาคผนวก ช.....	195
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	198

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ค่าการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	5
2-2	การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย.....	9
2-3	ประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรน.....	51
3-1	ลักษณะของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่ใช้.....	56
3-2	คุณสมบัติของน้ำมันตัด รุ่น 3810150 บริษัท BP-Castrol (ประเทศไทย จำกัด)	57
3-3	ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์ม.....	57
3-4	ลักษณะสมบัติของ Sodium lauryl sulphate.....	58
3-5	สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์.....	62
3-6	ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.	64
3-7	ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	65
3-8	ตัวแปรในการศึกษาเพื่อการทดสอบหาชนิดและปริมาณของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดเมมเบรน.....	73
4-1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์.....	75
4-2	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์.....	77
4-3	ประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้กระบวนการต่างๆมาใช้นำบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	79
4-4	การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	80
4-5	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที.....	95
4-6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia.....	100
4-7	การเปรียบเทียบค่า R ² ที่ได้จากการใช้แบบจำลองของ Hermia อธิบายลักษณะการดูดตันของเมมเบรนเมื่อผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที.....	101

ตารางที่		หน้า
4-8	การเปรียบเทียบค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองของ Hermia อธิบายลักษณะการดูดตันของเมมเบรนเมื่อผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์....	108
4-9	ความสัมพันธ์ของค่า α_0 และ S.....	113
4-10	สมบัติของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน	127
4-11	ค่า FR และ RR ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำความสะอาดเมมเบรน.....	128
4-12	สรุปและวิเคราะห์สภาวะการเดินระบบและวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนที่เหมาะสม.....	137

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	การผลัดกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารถแรงตึงผิว.....	6
2-2	ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำกับความเข้มข้น ของสารถแรงตึงผิว.....	7
2-3	การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารถแรงตึงผิวร่วม.....	8
2-4	โครงสร้างโมเลกุลของสารถแรงตึงผิว.....	11
2-5	แรงระหว่างโมเลกุลของสารถแรงตึงผิว.....	12
2-6	การเดินระบบแบบอัดตัว (Dead-end Filtration).....	14
2-7	การเดินระบบแบบไหลตามขวาง (Crossflow Filtration).....	15
2-8	ขนาดของสารที่เมมเบรนแต่ละชนิดสามารถกำจัดได้.....	17
2-9	ความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของเมมเบรนแต่ละชนิด.....	17
2-10	โมดูลชนิดแบบแผ่น.....	18
2-11	โมดูลชนิดแบบท่อ.....	19
2-12	โมดูลชนิดแบบเส้นใยกลวง.....	19
2-13	โมดูลชนิดแบบม้วน.....	20
2-14	การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization).....	22
2-15	ฟลักซ์การแพร่กระจายกลับ (Back diffusion flux).....	24
2-16	การอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน (Pore blocking fouling).....	25
2-17	ไดอะแกรมแสดงการกักฟลักซ์ด้วยการล้างเมมเบรน.....	26
2-18	การสะสมตัวของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน.....	32
2-19	ความสัมพันธ์ระหว่าง t/V กับ V	36
2-20	ความสัมพันธ์ระหว่าง $-\Delta p$ กับ V	37
2-21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำเสียและค่าความเข้มข้น ของ SDS.....	40
2-22	แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โคอะเลสเซอร์.....	41
2-23	ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์โดย วางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบน.....	42

ภาพที่		หน้า
2-24	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	42
2-25	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	44
2-26	COD ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 140 กรัมและสารเฟอร์รัสซัลเฟตในปริมาณ 500 มิลลิกรัมของเหล็กต่อลิตรของน้ำเสีย (mg/L as Fe ²⁺) เมื่อใช้ขนาดของถังปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน.....	45
2-27	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง	46
2-28	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	47
2-29	พลั๊กซ์ที่ลดลงตามเวลาและแรงต้านทานการเกิดการอุดตันเมื่อเดินระบบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน.....	48
2-30	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	49
2-31	ค่าพลั๊กซ์ในการกรองน้ำของเมมเบรนทั้ง 2 ขนาด.....	49
2-32	ค่าพลั๊กซ์ในการกรองน้ำเมื่อใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ทำความสะอาดเมมเบรน.....	50
2-33	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	51
2-34	ความสามารถในการทำให้พลั๊กซ์ที่เกิดการอุดตันกลับมาใช้งานใหม่เมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้ สารลดแรงตึงผิว.....	52
3-1	แผ่นอะคริลิกใสสำหรับใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	55
3-2	ถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการ อัลตราฟิลเตรชัน.....	55
3-3	การติดตั้งชุดการทดลอง.....	59
3-4	แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	63
3-5	แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	65
3-6	ความสัมพันธ์ของค่าพลั๊กซ์ของการกรองน้ำกับเวลา.....	66
3-7	แผนผังการศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน.....	69
3-8	แผนผังการทดสอบหาชนิดและปริมาณของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดเมมเบรน.....	72
4-1	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์.....	76
4-2	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร.....	76

ภาพที่	หน้า	
4-3	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์มสังเคราะห์.....	77
4-4	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันปาล์มในน้ำเสียความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร.....	78
4-5	พลั๊กซีในการกรองน้ำของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม.....	81
4-6	ความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม.....	82
4-7	ซีไอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม.....	83
4-8	ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ทีไอซี และปริมาณไขมันและน้ำมันของน้ำเสีย ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม.....	84
4-9	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเพอมิเอทที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน...	85
4-10	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันปาล์มในน้ำเพอมิเอทที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน	85
4-11	พลั๊กซีในการกรองน้ำเมื่อผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสีย ปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่ แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที.....	88
4-12	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ อัลตราฟิลเตรชัน ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่ แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที.....	89
4-13	การกำจัดซีไอดีในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อ เดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที.....	90
4-14	ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอัลตรา ฟิลเตรชัน ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่ แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที.....	92
4-15	ประสิทธิภาพการบำบัดทีไอซีในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัลตรา ฟิลเตรชัน ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่ แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที.....	93

ภาพที่		หน้า
4-16	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันไขมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที....	94
4-17	พลักร์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์.....	96
4-18	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและความขุ่นในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์.....	97
4-19	ประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดี ทีไอซีและน้ำมันไขมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์.....	98
4-20	การวิเคราะห์กลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์.....	102
4-21	การวิเคราะห์กลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา.....	103
4-22	การวิเคราะห์กลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์.....	105
4-23	การวิเคราะห์กลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการเกิดชั้นเค้ก....	106
4-24	การวิเคราะห์กลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลอง.....	109
4-25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัตราฟิลเตรชัน.....	111
4-26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α ความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัตราฟิลเตรชัน....	112
4-27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\alpha$ กับ $\ln\Delta P$ ที่ใช้ในการเดินระบบอัตราฟิลเตรชัน	113
4-28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับความเร็วตามขวางที่ใช้ในการเดินระบบอัตราฟิลเตรชัน.....	114

ภาพที่	หน้า
4-29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงกับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน..... 115
4-30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิง ความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน..... 116
4-31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิง กับความเร็วตามขวางที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน..... 117
4-32	SEM ของเมมเบรนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)..... 118
4-33	SEM ของเมมเบรนที่เกิดการอุดตัน..... 119
4-34	ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้น้ำบริสุทธิ์..... 125
4-35	ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สาร SDS ที่ความเข้มข้นต่างกัน..... 129
4-36	ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สาร NaOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน..... 130
4-37	ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สาร EDTA ที่ความเข้มข้นต่างกัน..... 132
4-38	ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สาร SDS NaOH และ EDTA ร่วมกัน..... 133
4-39	ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ทำความสะอาดเมมเบรน..... 134

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน น้ำเสียเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุมชนเมืองที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและขาดการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการเพิ่มขึ้นของปริมาณและความเป็นพิษของน้ำเสีย โดยที่ น้ำเสียจากแหล่งกำเนิดต่างกันก็จะประกอบด้วยองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้ความเป็นพิษของน้ำเสียนั้นแตกต่างกันด้วย

“น้ำมัน” เป็นหนึ่งในสารมลพิษที่มักพบปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งพบได้ทั้งในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม และชุมชน โดยจะมีที่มาจากแหล่งต่างๆ เช่น น้ำมันในน้ำเสียจากครัวหรือร้านอาหาร น้ำมันหล่อลื่นในเครื่องจักร น้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากกระบวนการต่างๆ ของอุตสาหกรรมปิโตรเลียม น้ำมันที่ใช้เป็นสารหล่อเย็น เป็นต้น ซึ่งน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียนี้ จะแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ คือ 1) น้ำมันที่อยู่ในรูปฟิล์มลอยอยู่บนผิวน้ำ 2) น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว 3) น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว และ 4) น้ำมันที่ละลายน้ำ โดยการปนเปื้อนของน้ำมันทั้ง 4 รูปแบบนี้ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว เช่น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม และ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เป็นน้ำมันที่มีเสถียรภาพมากที่สุด จึงทำให้การแยกออกจากน้ำเสียทำได้ยากที่สุดด้วย (กรชกร ก้องกังวาลย์, 2552)

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มเป็นน้ำเสียที่พบปัญหามากเนื่องจาก น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันที่นิยมใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมและครัวเรือน ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของน้ำมันจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนมีค่าอยู่ในช่วง 4,000-8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Kajitvichyanukul, 2006) ในขณะที่น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil) เป็นน้ำมันอยู่ในรูปอิมัลชันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวอีกชนิดหนึ่งที่เกิดผลกระทบมากที่สุดในกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งนิยมนำน้ำมันตัดมาใช้งานในกระบวนการผลิตชิ้นงานเนื่องจากสามารถใช้ความเร็วสูงในการตัดกลึงโลหะและมีราคาต่อหน่วยต่ำ การใช้งานเมื่อน้ำมันตัดผสมกับน้ำจะเกิดเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water Emulsion) ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก และมีเสถียรภาพสูง ยากต่อการแยกด้วยกระบวนการกายภาพทั่วไป (Rosen, 1989) นอกจากนี้ในน้ำมันตัดยังมีสารเคมีที่ก่อให้เกิดอันตราย ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันแร่ สารอิมัลซิไฟเออร์ สารป้องกันการกัดกร่อน สารต้านทาน การเปลี่ยนแปลง

กรด-เบส สารป้องกันการเกิดฟอง และสารป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เป็นต้น (Anderson และคณะ, 2003)

โดยทั่วไปน้ำเสียที่พบมักจะถูกปนเปื้อนด้วยสารลดแรงตึงผิวเสมอ เนื่องจากมีการใช้สารลดแรงตึงผิวในการทำมาสะอาด ดังนั้น น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันจึงมักจะพบอยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการแยกอิมัลชันนี้ออกจากน้ำเสีย โดยทั่วไปมักจะทำการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการทางกายภาพ และใช้เป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะส่งน้ำเสียไปดำเนินการบำบัดทางชีวภาพต่อไป เนื่องจากการบำบัดด้วยวิธีการทางกายภาพนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ใช้เวลาน้อยและมีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ โดยที่กระบวนการทางกายภาพที่ได้รับความนิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ ได้แก่ กระบวนการโคalesceเซอร์ (Coalescence), กระบวนการทำให้ลอยแบบอินดิวิจิวแอโรฟเลชัน (Induced Air Flotation: IAF), กระบวนการโคแอกกูเลชันและโซโนเฟนตัน และ กระบวนการเมมเบรน (Membrane process) ซึ่งพบว่ากระบวนการเมมเบรน เป็นกระบวนการที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ประสิทธิภาพสูง ใช้ระยะเวลาในการเดินระบบสั้น ใช้พื้นที่น้อย อีกทั้งยังสามารถกำจัดสารที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่มีความคงตัวสูงได้ แต่พบข้อเสียของกระบวนการคือ เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย ราคาแพง และอายุการใช้งานจำกัด ซึ่งเป็นปัญหาที่ควรแก้ไขต่อไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เนื่องจากเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชันมีขนาดที่เหมาะสมที่จะสามารถแยกอนุภาคของน้ำมันออกจากเฟสน้ำได้ และเดินระบบแบบไหลตามขวาง โดยศึกษาประสิทธิภาพบำบัดและสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ลักษณะของการเกิดฟาวลิง (Fouling) หรือการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope : SEM) และประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia (1982) ซึ่งใช้อธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยจำแนกการอุดตันของ เมมเบรนตามลักษณะของการอุดตัน ออกเป็น 4 ชนิด เพื่อเข้าใจถึงกลไกการอุดตันของเมมเบรน และศึกษาวิธีการทำมาสะอาดโดยใช้สารเคมี (Chemical washing) เพื่อลดการอุดตันและเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรนจากการนำกลับมาใช้ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทางกายภาพเคมี (Physico-chemical process)
- 1.2.2 ศึกษาสภาวะการเดินระบบ (Operating condition) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน
- 1.2.3 ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายและทำนายการเกิดฟาวลิงของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน
- 1.2.4 ศึกษาผลการล้างผิวหน้าของเมมเบรนด้วยสารเคมีและการนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขต ในการวิจัย ได้แก่

- 1.3.1 เตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวสูง (Stabilized oily wastewater) โดยสังเคราะห์จากน้ำมันปาล์ม (Palm oil) ที่มีความเข้มข้นความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ที่มีความเข้มข้น 0.008 โมล/ลิตร และน้ำมันตัด (Cutting oil) ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร
- 1.3.2 ใช้กระบวนการกรองแบบกรองที่ผิวหน้า (Surface filtration) แบบไหลตามขวาง (Cross-flow filtration) ด้วยกระบวนการเมมเบรนโดยใช้เมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชันแบบแผ่นกรอง (Plate and Frame Module) ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่ทำจากวัสดุ Regenerated cellulose ที่มีขนาดรูพรุน 30,000 ดาลตัน และมีขนาดพื้นที่ผิว 98 ตารางเซนติเมตร โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม (Palm oil) และ น้ำมันตัด (Cutting oil) กับกระบวนการทางกายภาพเคมีจากงานวิจัยที่ผ่านมา

- 1.3.3 ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่
- ความเข้มข้นของน้ำเสีย ทำการศึกษา ในช่วง 1 – 20 กรัม/ลิตร
 - ความดัน ทำการศึกษาในช่วง 1 - 2.5 บาร์
 - ความเร็วตามขวาง (Crossflow velocity) ของน้ำเสีย ทำการศึกษา ในช่วง 0.1 – 0.2 เมตร/วินาที
- 1.3.4 ตัวแปรที่วิเคราะห์ได้แก่ ค่าฟลักซ์ ความขุ่น ขนาดของหยดน้ำมัน ซีไอดี และน้ำมันไขมัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และวิเคราะห์รูปแบบการเกิดฟาวลิงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเสนอแนะแนวทางการทำความสะอาด โดยใช้สารเคมีในการทำทำความสะอาดผิวหน้าของเมมเบรนและศึกษาผลกระทบจากการนำกลับมาใช้ใหม่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงกลไกการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน รวมทั้งปัญหาต่างๆ ในการใช้งานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน
- 1.4.2 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- 1.4.3 ทราบถึงปัญหาในการอุดตันของเมมเบรนเพื่อนำไปหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาและปรับปรุงกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ (Aurelle, 1985) ได้แก่

2.1.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ

โดยทั่วไปมักเชื่อกันว่าน้ำมันไม่ละลายน้ำหรือไม่รวมตัวกับน้ำ แต่ความจริงแล้วความสามารถในการละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติประจำตัวของน้ำมัน โดยความสามารถในการละลายน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าโพลาริตี (Polarity) ของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังนั้นโมเลกุลที่ไม่อิมิตัวจะละลายน้ำได้ดี โดยเฉพาะสารประกอบ Cyclic Compounds เช่น เบนซีน ละลายน้ำได้ถึง 1650 มิลลิกรัม/ลิตร นอกจากนี้ความสามารถในการละลายน้ำจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ น้ำมันที่ระเหยได้ง่าย (ซึ่งมักจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) จึงละลายน้ำได้ดี ตารางที่ 2-1 แสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2-1 ค่าการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ

Straight chain hydrocarbons C ₈		Straight chain hydrocarbons C ₆		Cyclic hydrocarbons C ₆	
n-octane	0.66 mg/l	n-hexane	9.5 mg/l	cyclohexane	55 mg/l
octene-1	2.7 mg/l	hexene-1	50 mg/l	cyclohexene	213 mg/l
octyne-1	24 mg/l	hexyne-1	360 mg/l	benzene	1650 mg/l

ปัญหาของน้ำมันที่ละลายน้ำ คือจะมีลักษณะใสและละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำ รวมถึงเป็นพิษ เพราะน้ำมันที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกอะโรมาติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

2.1.2 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) เช่น เครื่องสูบน้ำ วาล์ว ไบพัส ข้อต่อต่างๆ ฯลฯ จะทำให้เกิดการกระจายตัวของน้ำมันกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยขนาดของหยดน้ำมันจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ทำให้เกิดการปั่นป่วนและแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (Interfacial tension oil/water)

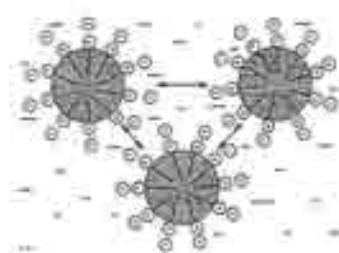
น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ปั่นเป็อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- อิมัลชันขั้นต้น (Primary emulsion) คือ อิมัลชันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 ไมครอน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
- อิมัลชันขั้นสอง (Secondary emulsion) คือ อิมัลชันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 ไมครอน และจะมีลักษณะคล้ายกับน้ำมัน

แต่เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น เมื่อหยุดการปั่นกววน หยดน้ำมันเหล่านี้จะพยายามรวมตัวกันและกลับมาแยกชั้นเช่นเดิม เนื่องจากมีการปรับสภาพเข้าสู่จุดสมดุลโดยการลดพื้นที่ผิวที่สัมผัสกันให้น้อยที่สุด

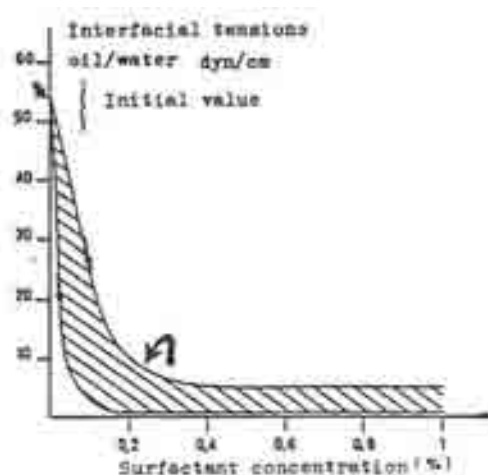
2.1.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

โดยทั่วไปน้ำเสียจากชุมชนหรือแม้กระทั่งอุตสาหกรรม มักจะพบว่ามีการปนเป็อนของสารลดแรงตึงผิวอยู่เสมอ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ โมเลกุลที่ชอบน้ำมันและโมเลกุลที่ชอบน้ำ จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 การผลัดกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

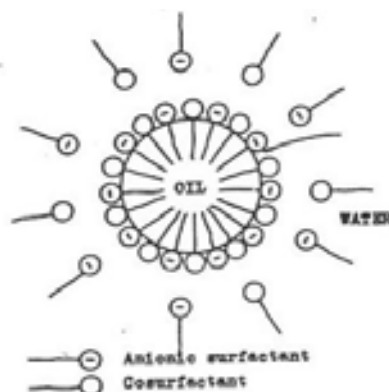
สารลดแรงตึงผิวจะทำให้แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำลดลง ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นต่ำก็ตาม ดังแสดงในภาพที่ 2-2 จะเห็นได้ว่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำจะลดลงตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น และจะลดลงจนมีค่าต่ำมาก ซึ่งภายใต้สภาวะนี้ น้ำมันจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นอิมัลชันได้เองและเกิดเป็นอิมัลชันที่มีเสถียรภาพสูงมาก จึงเรียกอิมัลชันที่เกิดในสภาพที่มีสารลดแรงตึงผิวว่า “อิมัลชันที่มีเสถียรภาพ” (Stabilized emulsion)



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

อนุภาคน้ำมันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ดังนั้นความเร็วในการลอยขึ้นจึงมีค่าต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) และเนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน (Electrokinetic หรือ Zeta potential) จึงทำให้ไม่เกิดการชนและการรวมตัวกันในระหว่างการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า บางครั้งน้ำเสียมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวร่วม (Co surfactant) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว คือจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ขอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมจะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และจะไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ขอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว (ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 อิมัลชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวร่วมจะมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กมาก โดยจะมีขนาดประมาณ 100-600 อังสตรอม



ภาพที่ 2-3 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle, 1985)

2.1.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ

น้ำมันส่วนใหญ่มักจะมีน้ำหนักที่หนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงมักจะลอยอยู่บนผิวน้ำในลักษณะของฟิล์มบางๆ ซึ่งจะไปขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสง ปัญหาของน้ำมันในลักษณะนี้ก็คือสามารถปนเปื้อนได้เป็นพื้นที่กว้าง ถึงแม้จะมีน้ำมันปริมาณน้อยก็ตาม เพราะจะมีการแพร่กระจายออกไปในลักษณะของแผ่นฟิล์มโมเลกุลเดี่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะแพร่กระจายได้เป็นพื้นที่กว้างมาก ซึ่งการปนเปื้อนในลักษณะนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า คือจะสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งลอยอยู่บนผิวน้ำ

2.2 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

การแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย มีหลายกระบวนการที่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเลือกเทคนิคที่จะใช้ในการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพการผสมกันของน้ำมันและน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาคุณลักษณะของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนที่จะตัดสินใจเลือกกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป

หลักการพิจารณา ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบกระบวนการแยกน้ำมันกับน้ำเสียมีดังนี้

- ปริมาณน้ำมันในน้ำเสีย
- ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำเสีย
- การใช้สารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลซิไฟเออร์
- ความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน

- ความถ่วงจำเพาะของน้ำเสีย
- อุณหภูมิของน้ำเสีย
- ความเข้มข้นของสารแขวนลอย

กระบวนการในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Arizona Department of Environmental Quality, 1996)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravity separation	API, CPI, TPS, PPI	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันอิสระและน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้ - ใช้งานง่าย และประหยัด 	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดอนุภาคน้ำมันที่เล็กกว่า 20 ไมครอนหรือน้ำมันที่ละลายน้ำไม่ได้ - มีข้อจำกัดในการกำจัดอิมัลชัน - ต้องใช้ความเร็วการไหลต่ำ - ต้องการถังแยกขนาดใหญ่
Air Flotation	DAF, IAF	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชันได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีช่วย - รองรับสภาวะ shock load ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น ถ้าใช้สารเคมีช่วยสร้างตะกอน
Chemical flocculation	ใช้ร่วมกับ gravity separation และ air flotation	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น
Filtration	Sand, anthracite, graphite	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องทำการล้างย้อนซึ่งต้องบำบัดน้ำล้างย้อนต่อไป

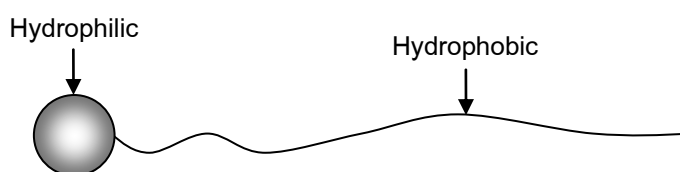
ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Arizona Department of Environmental Quality, 1996) (ต่อ)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Coalescence	Fibrous membrane	- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำ	- ต้องมีการบำบัดขั้นต้น - เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย - ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale
Membrane processes	Reverse osmosis, ultrafiltration, hyper filtration	- สามารถกำจัดน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดเล็กและลอยน้ำได้ - ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง - ใช้เวลาในการเดินระบบรวดเร็ว	- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย และอายุการใช้งานจำกัด
Biological processes	Activated sludge	- สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ	- ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 mg/l
Carbon adsorption	GAC และ PAC	- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำ	- ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 mg/l - ค่าใช้จ่ายสูง - ต้องมีการฟื้นฟูหรือเปลี่ยนคาร์บอน - ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale

จากตารางที่ 2-2 พบว่ากระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถกำจัดน้ำมันที่มีขนาดเล็กและลอยน้ำได้รวมทั้งมีความประหยัดพื้นที่ใช้งานและใช้เวลาในการเดินระบบรวดเร็ว แต่พบมีข้อเสียคือ เกิดการอุดตันได้ง่ายและอายุการใช้งานจำกัด ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ปัญหาดังกล่าวต่อไป

2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) (Aurelle, 1985)

สารลดแรงตึงผิว หรือ Surfactant เป็นคำย่อของ Surface active agent เป็นสารมีคุณสมบัติในการลดค่าที่ผิวระหว่างเฟส ทำให้แรงตึงผิว (Surface tension) ลดลง สารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นส่วนหัวของโมเลกุล และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นส่วนหางของโมเลกุล ซึ่งจะเป็นอนุพันธ์ของสารอินทรีย์โซ่ยาวดังแสดงในภาพที่ 2-4

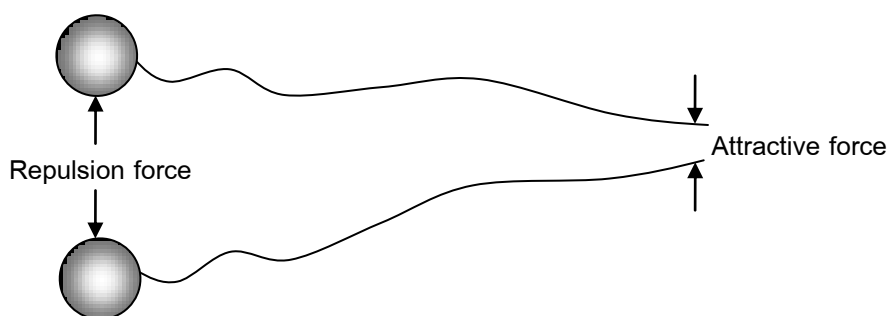


ภาพที่ 2-4 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำที่มีไขมันหรือน้ำมัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำโดยส่วนหัว (ส่วนที่ชอบน้ำ) จะอยู่ในเฟส น้ำ ส่วนหาง (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ) จะอยู่ในเฟส น้ำมัน และทำให้แรงตึงผิวของน้ำมันลดลง จึงทำให้น้ำมันสามารถกระจายอยู่ในน้ำได้ ซึ่งจากคุณสมบัตินี้ จึงใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ เพื่อลดแรงตึงผิวของสิ่งสกปรกจำพวกไขมันที่เกาะอยู่กับพื้นผิวต่างๆ ให้ออกไปกับน้ำ

แรงระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมี 2 แรง (ดังแสดงในภาพที่ 2-5) คือ

- แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เกิดขึ้นที่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิว โดยจะเป็นแรงผลักร (Repulsion force) เนื่องจากส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวมีประจุเดียวกัน
- แรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic force) เกิดขึ้นที่ส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว เป็นแรงที่ดึงส่วนหางเข้าหากัน (Attractive force)



ภาพที่ 2-5 แรงระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนชอบน้ำออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

2.3.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุลเป็นประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในภาพของ Carboxylate Sulfate Sulfonate หรือ Phosphate สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาล้างจาน เป็นต้น โดยใช้มากถึงร้อยละ 49 ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้จัดคราบสกปรกได้ดี

2.3.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุลเป็นประจุบวก ส่วนมากจะเป็นพวก Quaternary ammonium สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (pH 10 - 11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ สารลดแรงตึงผิวประเภทประจุบวกจะทำให้เกิดการระคายเคืองน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบ จึงนิยมใช้ในการทำน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น

2.3.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ต่างจากสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบและประจุบวก คือส่วนที่ชอบน้ำเป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยจะมีพวก Polyether หรือ Polyhydroxyl เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

2.3.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวก (Amphoteric surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำสามารถเป็นได้ทั้งประจุลบและลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นนั้น จะขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่าง ($\text{pH} > 7$) ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรด ($\text{pH} < 7$) ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดประจุไฟฟ้า สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม ในปัจจุบันยังใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น

2.4 กระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรน หมายถึง กระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi permeable membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำ หรือของเหลวอื่น ๆ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2539) โดยอาศัยกลไก 2 ชนิด คือ การกรองติดค้าง (Sieve Effect) และการแพร่ผ่าน (Diffusion) ซึ่งสามารถนำมาใช้เพิ่มความเข้มข้นหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น

การเกิดขึ้นของกระบวนการเมมเบรนสร้างมิติใหม่ในการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) สำหรับทั้งระบบ ของแข็ง-ของเหลว ก๊าซ-ก๊าซ โดยกระบวนการเมมเบรนมีบทบาทที่สำคัญทั้งในการบำบัดน้ำและน้ำเสีย กระบวนการเมมเบรนจะแยกสิ่งเจือปนออกจากน้ำโดยไม่มี การการทำลายโครงสร้างของสิ่งเจือปนเหล่านั้น นอกจากนี้กระบวนการเมมเบรนยังมีข้อได้เปรียบที่สำคัญอื่นๆ อีกคือ ใช้พลังงานต่ำ ต้องการพื้นที่น้อย สามารถใช้ได้ง่ายในการปรับปรุงให้ระบบที่มีอยู่แล้ว ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น การแยกเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ให้คุณภาพของน้ำที่ออกจาก ระบบที่ดีกว่า และหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีต่างๆ จึงไม่เกิดปัญหาเรื่องตะกอนทางเคมี (ปฏิรูป

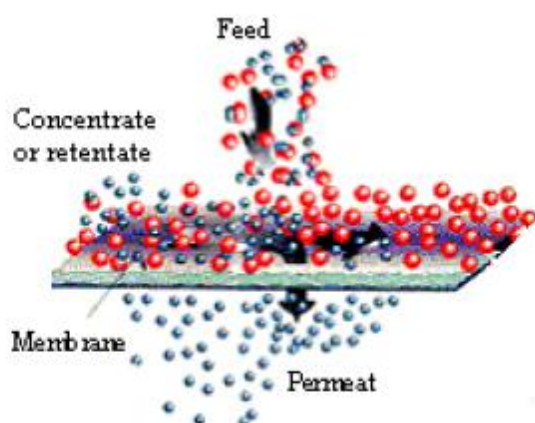
ผลจันทร์, 2544) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการเมมเบรนเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรม รวมทั้งในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย

2.4.1 ลักษณะการเดินระบบของกระบวนการเมมเบรน (Rachu, 2005)

ในกระบวนการเมมเบรน น้ำเสียจะถูกปั๊มเข้าสู่เมมเบรน โดยจะเรียกส่วนของน้ำเสียที่ถูกปั๊มเข้าไปว่า Feed เมื่อผ่านกระบวนการเมมเบรนแล้วจะมีส่วนที่สามารถกรองผ่านเมมเบรนได้เรียกว่า Permeate (เพอมีเอท) หรือ Filtrate (ฟิลเตรท) และส่วนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่า Retentate (รีเทนเทรท) หรือ Concentrate (คอนเซนเทรท) ในการเดินระบบสามารถแบ่งประเภทของลักษณะของการเดินระบบตามลักษณะของการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่กระบวนการเมมเบรนได้ 2 แบบ ได้แก่

2.4.1.1 การเดินระบบแบบอัดตัว (Dead-end Filtration)

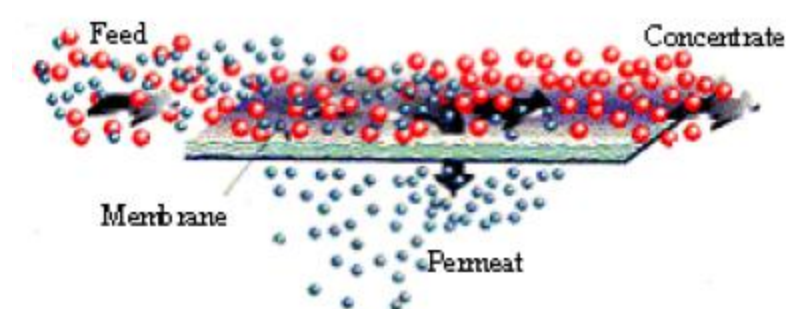
การเดินระบบแบบอัดตัวเป็นการปั๊มน้ำเสียในทิศทางการไหลที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของเมมเบรน ดังภาพที่ 2-6 ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน เกิดเป็นชั้นเค้ก (cake filtration) ส่งผลให้การไหลของน้ำผ่านเมมเบรนลดลง โดยทั่วไปการเดินระบบลักษณะนี้ใช้ในการทดสอบกระบวนการเมมเบรน



ภาพที่ 2-6 การเดินระบบแบบอัดตัว (Dead-end Filtration)

2.4.1.2 การเดินระบบแบบไหลตามขวาง (Crossflow Filtration)

การเดินระบบแบบไหลตามขวางมีความต่างจากการเดินระบบแบบอัดตัว คือ ใช้ปั๊มเป็นแรงดันช่วยในการป้อนน้ำเสียให้ไหลขนานไปกับผิวหน้าของเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำเพอมีเอท ดังภาพที่ 3-7 การเดินระบบแบบนี้จะมีผลต่อการลดลงของการไหลของน้ำน้อยกว่าการเดินระบบแบบอัดตัว จะทำให้ไม่เกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของเมมเบรน และลดการเกิด Concentration Polarization



ภาพที่ 3-7 การเดินระบบแบบไหลตามขวาง (Crossflow Filtration)

2.4.2 ประเภทของเมมเบรน

ปัจจุบันได้มีการผลิตเมมเบรนขึ้นมาหลายชนิดเพื่อให้เหมาะกับลักษณะของการนำไปใช้งานในประเภทต่าง ๆ ซึ่งเมมเบรนที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายได้แก่

2.4.2.1 Microfiltration (MF)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อแยกอนุภาคขนาดไมครอนหรือเล็กกว่าไมครอน เมมเบรนแบบ MF สามารถกักอนุภาคแขวนลอยและจุลชีพได้ แต่ยอมให้สารละลายและน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนผ่านได้ มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 0.03 – 10 ไมครอน ค่า MWCO มากกว่า 100,000 ดาลตัน ใช้ความดันต่ำประมาณ 100 – 400 กิโลปาสกาล

2.4.2.2 Ultrafiltration (UF)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ที่ประกอบด้วยคอลลอยด์ และสารน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทั่วไปสารที่ไม่มีประจุจะถูก

กันเอาไว้ และอ็อกซิเจนจะสามารถผ่านเมมเบรนไปได้ โดยค่า MWCO อยู่ที่ 10,000 – 100,000 ดาลตัน การทำงาน ของ UF ใช้แผ่นเยื่อที่มีขนาดของช่องว่าง (pore size) ประมาณ 0.002 ถึง 0.1 ไมครอน ใช้ความดันประมาณ 200 – 700 กิโลปาสกาล มักนิยมใช้ในการแยกสารแขวนลอย แยกโปรตีน และใช้ในการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยใช้ควบคู่กับ ion exchanger เป็นต้น

2.4.2.3 Nanofiltration (NF)

เป็นกระบวนการซึ่งใช้ความดันต่ำมาก โดยจะยอมให้ผ่านได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรเท่านั้น มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 0.001 ไมครอน ค่า MWCO อยู่ที่ 1,000 – 100,000 ดาลตัน ในการใช้งานต้องการความดันสูงกว่าแบบ MF และ UF คือประมาณ 600 กิโลปาสกาล และอาจจะสูงได้ถึง 1,000 กิโลปาสกาล มีลักษณะการทำงานของทั้ง UF และ RO รวมอยู่ในตัว โดยทั่วไปเมมเบรนแบบ NF จะกำจัดอ็อกซิเจนชนิดวาเลนซ์คู่ในอัตราสูงกว่าอ็อกซิเจนวาเลนซ์เดี่ยว ทำให้มีความสามารถในการลดความกระด้าง ซึ่งบางครั้งจะเรียกเมมเบรนชนิดนี้ว่า Softening membrane

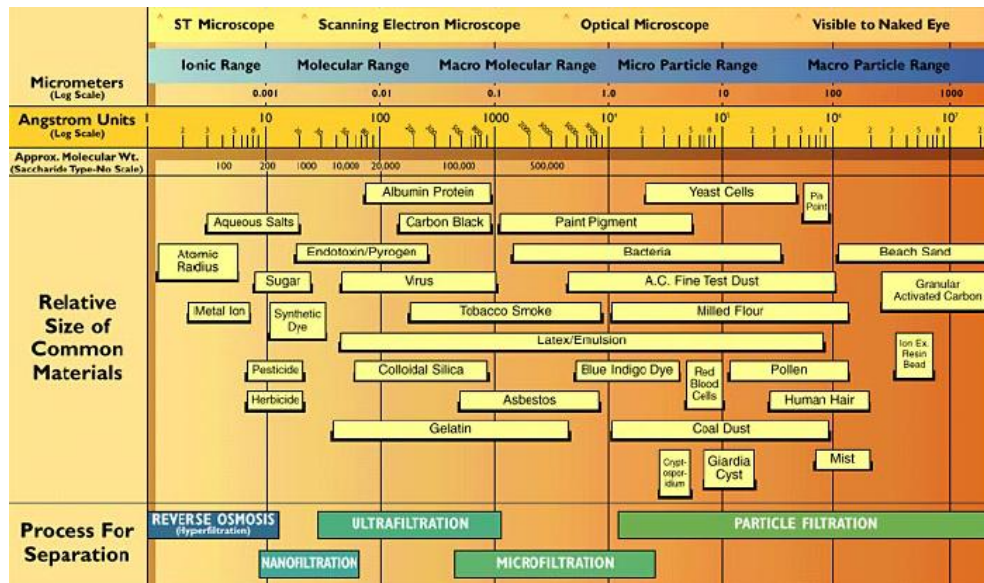
2.4.2.4 Reverse Osmosis (RO) หรือ Hyperfiltration

ทำงานโดยอาศัยการไล่ความดันเข้าไปในสารละลายเข้มข้น ความดันที่ไล่เข้าไปต้องมากกว่าความดันออสโมซิสของสารละลายจากผลของความดันนี้ ทำให้น้ำบริสุทธิ์ถูกบังคับให้ไหลผ่านเมมเบรนชนิดที่ยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กผ่านได้ โดยจะทิ้งเกลือและสิ่งเจือปนเอาไว้ หลักการทำงานของ RO จะตรงกันข้ามกับกระบวนการออสโมซิส โดยใช้ความดันสูงถึง 1,380 – 6,890 กิโลปาสกาล สารต่างๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100 ดาลตัน จะถูกกรองไว้บนแผ่นเมมเบรน การกรองแบบ RO สามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์สูง โดยใช้ควบคู่กับ ion exchanger ใช้ในการแยกโลหะ การทำให้น้ำตาลเข้มข้นสูงขึ้น การทำให้สีย้อมมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น เป็นต้น

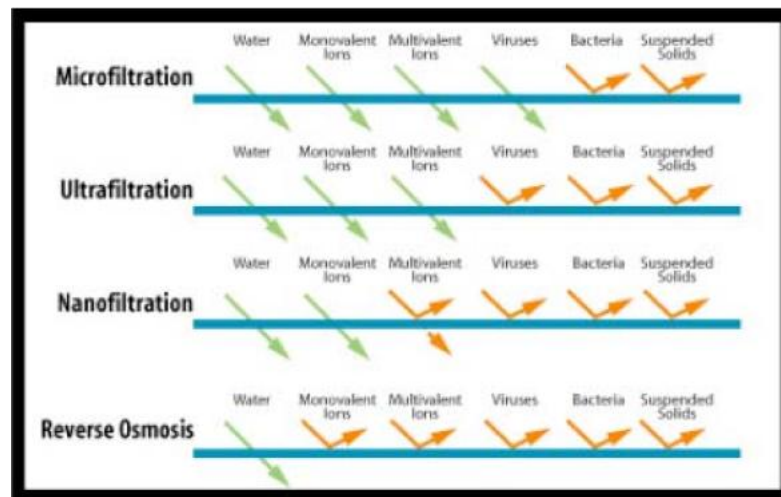
2.4.2.5 Electrodialysis (ED)

เป็นกระบวนการกำจัดเกลือใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนโดยที่อ็อกซิเจนจะถูกกำจัดโดยผ่านกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปสู่เมมเบรนซึ่งมี 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ ซึ่งจะยอมให้เฉพาะอ็อกซิเจนที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกันไหลผ่าน น้ำจะไหลผ่านเมมเบรนเพียงแค่ออกซิเจนซึ่งจะตรงกันข้ามกับอ็อกซิเจนที่เคลื่อนที่ตั้งฉากกับเมมเบรน

ขนาดและความสามารถในการกำจัดสารและอนุภาคของเมมเบรนแต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 2-8 และ 2-9



ภาพที่ 2-8 ขนาดของสารที่เมมเบรนแต่ละชนิดสามารถกำจัดได้ (Rachu, 2005)



ภาพที่ 2-9 ความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของเมมเบรนแต่ละชนิด (Rachu, 2005)

2.4.2 โมดูลชนิดต่างๆ ของเมมเบรน

ในการนำเมมเบรนไปใช้งานจริง จำเป็นจะต้องมีการบรรจุแผ่นเมมเบรนลงในวัสดุรองรับที่เรียกว่าโมดูลเพื่อให้สะดวกในการใช้งาน ซึ่งโมดูลที่ใช้กันในปัจจุบันพบอยู่ 4 ลักษณะ ได้แก่

2.4.3.1 แบบแผ่น (Plate And Frame Module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุดโมดูลที่ใช้จะมีลักษณะทำงานคล้าย Filter press ดังภาพที่ 2-10 แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous Plate) หรือแผ่นรองรับ ที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนกัน และสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับแล้วจึงไหลออกจากโมดูล



ภาพที่ 2-10 โมดูลชนิดแบบแผ่น (Rachu, 2005)

2.4.3.2 แบบท่อ (Tubular Module)

วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็กและยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยสแตนเลส หรือไฟเบอร์กลาส ดังภาพที่ 2-11 และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรนไม่ให้เกิดการบิดในระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำดิบจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อด้วยความดันแรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับออกไปสู่ภายนอก เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย จึงนิยมใช้ในกรณีที่มีการอุดตันเกิดขึ้นเร็ว



ภาพที่ 2-11 เมมเบรนแบบท่อ (Rachu, 2005)

2.4.3.3 แบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงจะมีผิวที่คล้ายฟองน้ำล้อมรอบผิวชั้นใน (ซึ่งมีความหนาเพียง 0.1 ไมครอน) ทำโดยการนำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมามัดรวมกันเป็นมัดๆ และงอพับเป็นรูปเกือกม้าหรือตัวยู ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งมัดถูกตรึงติดอยู่ด้านใดด้านหนึ่ง เมมเบรนชนิดนี้เหมาะสำหรับน้ำดิบที่มีความสกปรกหรือของแข็งเจือปนสูงเพราะว่ามีช่องว่างขนาดใหญ่ทำให้มีโอกาสอุดตันได้น้อย และยังสามารถจัดภาพแบบการวางในโมดูลได้หลายลักษณะดังภาพที่ 2-12

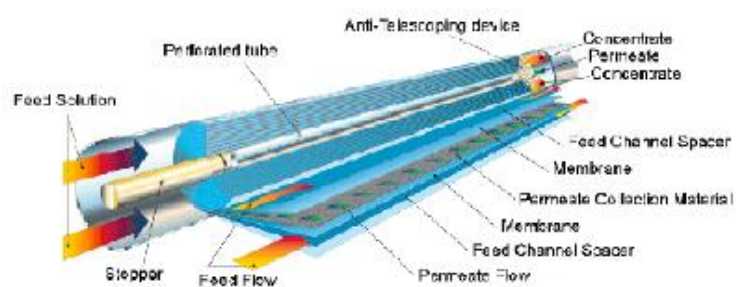


ภาพที่ 2-12 เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Rachu, 2005)

2.4.3.4 แบบม้วน (Spiral Wound Module)

โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรนสองแผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนและแผ่นวัสดุพรุนทั้งสามรอบท่อเจาะรูดังภาพที่ 2-13 โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วย Polypropylene คลุมปิดด้านนอก ขอบของเมมเบรนทั้งสามด้านถูกยึดได้ด้วยการพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและจึงติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ ทำให้น้ำถูกบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน แผ่นรองรับ

และตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้โมดูลรูปทรงกระบอก ที่สามารถบรรจุลงในท่อทรงกระบอกธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5 10 20 หรือ 30 เซนติเมตร และมีความยาวต่างๆ กัน แต่มักไม่เกิน 1 เมตร น้ำดิบจะถูกบังคับให้ไหลในแนวแกนของโมดูล เข้าไปตามแผ่นตะแกรง และจะถูกแรงดันอัดให้น้ำซึมผ่านเมมเบรนตามแนวรัศมีลงไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งจะส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรูเพื่อนำน้ำออกจากโมดูลต่อไป



ภาพที่ 2-13 เมมเบรนแบบม้วน (Rachu, 2005)

2.5 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกด้วยเยื่อเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเยื่อเมมเบรนอยู่ในช่วง 30-1,000 อังสตรอม ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้เพื่อแยกอนุภาคหรือตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1,000 - 500,000 ดาลตัน ไม่ให้ผ่านเยื่อเมมเบรนออกไป จึงไม่ค่อยมีความแตกต่างในความดันออสโมติกคร่อมเยื่อเมมเบรน ดังนั้นจึงสามารถทำงานที่ความดันในช่วง 2-10 บาร์ เยื่อเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน มักทำให้โครงสร้างแบบไม่สมมาตร โดยมีขนาดรู 30 - 400 อังสตรอม อยู่ที่ผิวหน้าเพียง 0.1 - 1.5 ไมครอน ส่วนขนาดรูของชั้นรองรับมีขนาดใหญ่กว่าชั้นผิวอย่างมาก อนุภาคที่สามารถผ่านรูขนาดเล็กที่ชั้นผิวไปได้ก็จะผ่านรูในชั้นรองรับไปได้โดยง่ายดาย

รูปแบบของอัลตราฟิลเตรชันโมดูลที่มีขายในท้องตลาดมีทุกลักษณะ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame) แบบท่อม้วน (Tubular) และแบบเส้นใย (Hollow fiber) ไม่ว่าจะเป็โมดูลลักษณะใดก็ตามเพื่อให้มีการถ่ายโอนมวลมากที่สุด จำเป็นต้องให้มีความเร็วแนวสัมผัส (แรงเฉือน) บริเวณผิวหน้าเยื่อเมมเบรนสูง วิธีการที่ง่ายที่สุด คือ ให้สารป้อนไหลตามแนวขวาง (Cross flow) กล่าวคือ สารป้อนมีแนวการไหลขนานกับผิวหน้าของเยื่อเมมเบรนและเพอมีเททผ่านเยื่อเมมเบรนในแนวตั้งฉากกับเยื่อเมมเบรน (ชั้นทอง สุณฑรภา, 2547)

2.5.1 การเกิดฟาวลิง (Fouling)

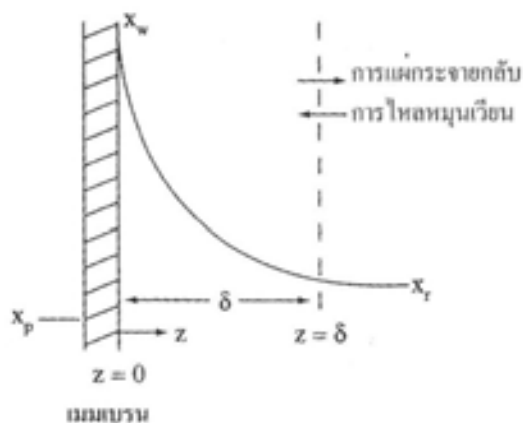
การอุดตัน (Fouling) ที่เกิดบนเยื่อเมมเบรนส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการติดเกาะของสารอินทรีย์ในรูปพูนของเยื่อเมมเบรน ทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรน และไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้ดีเหมือนเดิม ซึ่งอาจเกิดจากการอุดตันของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ การเกิดฟาวลิง สามารถแบ่งการเกิดได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.5.1.1 การอุดตันบริเวณผิวด้านนอก (External Surface Fouling) เกิดจากการสะสมตัวของชั้นเค้ก (Cake) หรือเจล (Gel) ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อเมมเบรน ซึ่งการอุดตันนี้เรียกว่า การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization)

Concentration Polarization เป็นปรากฏการณ์ปกติของกระบวนการที่ดำเนินการภายใต้แรงดัน เมื่อตัวละลายเกิดการสะสมกันอยู่ที่ผิวหน้าของเยื่อเมมเบรน ทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายที่ไม่ผ่านเยื่อเมมเบรนออกไปสูงกว่าความเข้มข้นในเนื้อสารละลาย ก่อให้เกิดชั้น

ขอบ (Boundary layer) ทำให้สมรรถนะของเมมเบรน กล่าวคือ ฟลักซ์ (Flux) และสมรรถนะการเลือก (Selectivity) ลดลง

การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เนื่องจากตัวทำละลายจะไหลผ่านของเหลวผ่านผิวเมมเบรนมากขึ้น และส่งผลต่ออัตราส่วนน้ำหนักของตัวถูกละลาย (Solute) ที่ผิวเมมเบรน (X_w) จะสูงกว่าอัตราส่วนน้ำหนักของตัวถูกละลายในส่วนรีเทนเนท (X_r) โดยการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเมมเบรนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนย้ายของตัวทำละลาย (Solvent) หรือส่วนเพอมีเอท ผ่านเมมเบรนทำให้พาโมเลกุลของตัวถูกละลายไปที่ผิวเมมเบรน เนื่องจากสารที่ถูกละลายไม่ผ่านเมมเบรนจึงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นที่ผิว รวมถึงทำให้เกิดการแพร่กระจายกลับไปที่เฟสสารละลาย (Back diffusion) ทำให้เกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันขึ้นดังภาพที่ 2-14 ซึ่งส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของเมมเบรนทั้งในด้านฟลักซ์ของการกรอง และการหลุดลอดของโมเลกุลของตัวถูกละลาย และด้านการลดลงของระยะเวลาใช้งานของเมมเบรน



ภาพที่ 2-14 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization)

ในทางทฤษฎีสามารถเขียนสมการเพื่อฟลักซ์การกรอง (N_w , กิโลกรัม/ตารางเมตร.วินาที) ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันได้ดังนี้

$$N_w = A_w \times (\Delta P) = \frac{P_w}{L_M} \times (\Delta P) \quad (2-1)$$

เมื่อ A_w = ค่าคงที่การแพร่ผ่านของตัวทำละลาย (Solvent permeability constant, กิโลกรัม/ตารางเมตร.วินาที.บรรยากาศ)

P_w	=	สัดส่วนระหว่างค่าการแพร่ผ่านของเมมเบรน (Solvent membrane permeability)
L_M	=	ความหนาของเมมเบรน (Membrane thickness)
ΔP	=	ความดันของระบบ (atm)

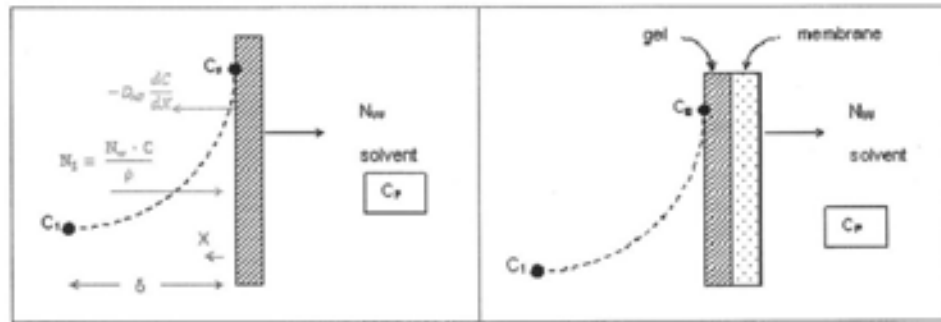
เมื่อพิจารณาสมการข้างต้นพบว่า เมื่อเพิ่มความดันของระบบจะส่งผลให้ ฟลักซ์การกรองของระบบมีค่าสูงขึ้น รวมถึงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของโมเลกุลของอนุภาคตัวถูกละลายที่ผิวของเมมเบรน (C_s) และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์การแพร่กระจายกลับ (Back diffusion flux) ของโมเลกุลดังกล่าวกลับสู่เฟสของไหล (Bulk solution) ดังแสดงในภาพที่ 2-15 เมื่อที่สภาวะคงที่สามารถเขียนสมการฟลักซ์ดังกล่าวได้ดังนี้

$$\frac{N_w \cdot C}{\rho} = -D_{AB} \cdot \frac{dC}{dx} \quad (2-2)$$

อินทิเกรตสมการข้างต้นภายใต้สภาวะขอบเขตที่พิจารณาคือ $x = 0 \rightarrow C = C_s$ และ $x = \delta \rightarrow C = C_{in}$ จะได้ว่า

$$\frac{N_w}{\rho} = \frac{D_{AB}}{\delta} \ln \frac{C_s - C_p}{C_{in} - C_p} = k_c \cdot \ln \frac{C_s - C_p}{C_{in} - C_p} \quad (2-3)$$

เมื่อ	C	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย
	ρ	=	ความหนาแน่นของเฟสของไหลของตัวทำละลาย
	D_{AB}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายที่สะสมที่ผิวของเมมเบรน (ตารางเมตร/วินาที)
	C_{in}	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ระยะ $x = \delta$
	C_p	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อยู่ในส่วนของเพอมีเอท
	k_c	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (เมตร/วินาที) ซึ่งเท่ากับสัดส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ D_{AB} และความหนาของชั้น Boundary layer ของการแพร่กระจายกลับ (δ) ของตัวถูกละลาย



ภาพที่ 2-15 ฟลักซ์การแพร่กระจายกลับ (Back diffusion flux)

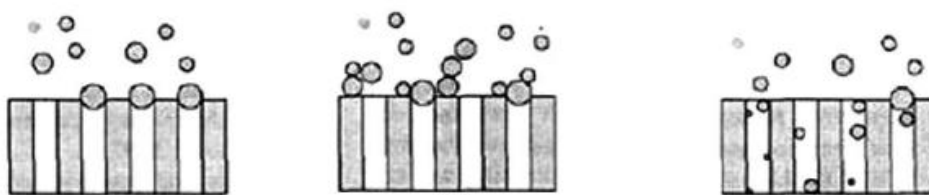
เมื่อความดันของระบบเป็นแบบต่อเนื่อง พบว่าค่าความเข้มข้น C_s จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของชั้นเจลที่สะสมตัวที่ผิวของเมมเบรน (Gel polarized concentration, C_{Gel}) รวมถึงยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรอง (เก็บกัก) โมเลกุลตัวถูกละลายที่สูงขึ้น (ร้อยละ 100) หรือทำให้ค่าความเข้มข้น C_p มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2-4

$$\frac{N_w}{\rho} = k_c \cdot \ln \frac{C_s}{C_{In}} = k_c \cdot \ln \frac{C_{Gel}}{C_{In}} \quad (2-4)$$

จากสมการข้างต้นกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มความดันของระบบ จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาชั้นเจล (Gel polarized thickness) และการลดลงของค่าฟลักซ์การกรองจากการเพิ่มขึ้นของความต้านทานของชั้นเจลที่ผิวเมมเบรน โดยที่เมื่อเดินระบบต่อไป อาจกล่าวได้ว่า ฟลักซ์ในการกรองจะสมดุลกับฟลักซ์ในการแพร่กระจายกลับ ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ที่ได้ นั้นจะไม่ขึ้นกับแรงดันที่ให้กับระบบอีกต่อไป โดยที่ จะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (k_c) และความเข้มข้นของเจลที่สะสมตัวบนผิวของเมมเบรนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังสามารถประมาณค่าทั้งสองข้างต้นจากการ plot graph ความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่าง $\frac{N_w}{\rho}$ และ $\ln \frac{1}{C_{In}}$ จากนั้นคำนวณหาค่าความชัน (Slope) และจุดตัดแกน y (Intersection) ซึ่งจะช่วยในการควบคุมกระบวนการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเตรชันได้อย่างเหมาะสม

2.5.1.2 การอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน (Pore blocking fouling) เป็นการอุดตันที่เกิดจากอนุภาคเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน การอุดตันประเภทนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท (ภาพที่ 2-16) ได้แก่

- การอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Complete Pore blocking) เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับรูพรุนของเมมเบรน อุดตันที่ภายในรูพรุนของเมมเบรน และไม่สามารถหลุดออกมาได้อีก ทำให้น้ำไหลผ่านได้น้อยมาก
- การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (Intermediate pore blocking) เกิดจากอนุภาคที่อุดตันมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับรูพรุนของเมมเบรน เกิดการอุดตัน แต่น้ำยังสามารถผ่านไปได้อย่างสมควร
- การอุดตันแบบธรรมดา (Standard pore blocking) เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุน เข้าไปอุดตัน ติดค้างและอัดตัวอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน



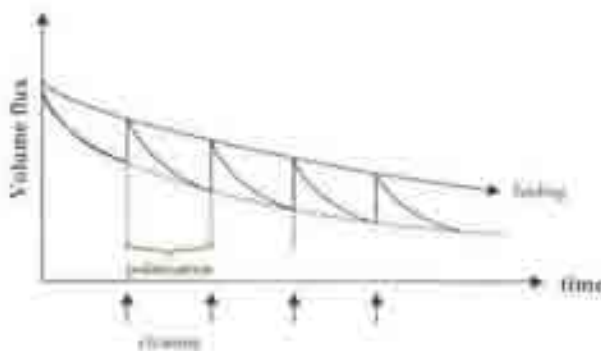
(1) การอุดตันอย่างสมบูรณ์ (2) การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (3) การอุดตันแบบธรรมดา

ภาพที่ 2-16 การอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน (Pore blocking fouling) (Salahi และคณะ, 2010)

วิธีการหลักเพื่อไม่ให้เกิดหรือวิธีการควบคุมการเกิดการอุดตัน ได้แก่

- การบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment) แก่สารละลายป้อน ด้วยการเติมสารตกตะกอน การกรองเบื้องต้น (Prefiltration) การปรับค่าพีเอช การเติมคลอรีน หรือการดูดซับด้วยคาร์บอน
- การดัดแปลงผิวหน้าของเมมเบรน (Membrane surface modification) โดยการเติมหมู่ชอบน้ำหรือหมู่ที่มีประจุที่ผิวหน้าเมมเบรน
- การออกแบบอุทกศาสตร์ของโมดูลให้เหมาะสม (Hydrodynamic optimization of the membrane module) โดยการออกแบบให้เกิดแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของสารป้อนที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงๆ
- การล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีที่เหมาะสม เมื่อฟลักซ์ลดลงจนถึงระดับหนึ่ง จำเป็นต้องล้างเมมเบรนเพื่อให้ได้ฟลักซ์กลับคืนมาบางส่วนหรือให้ได้เท่าเดิม สารเคมีที่ใช้ทำความ

สะอาดได้แก่ กรดไนตริก ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ สารเชิงซ้อน EDTA เอนไซม์ สารซักฟอก และสารฆ่าเชื้อ เป็นต้น ภาพที่ 2-17 แสดงการก่อกำเนิดฟลักซ์ด้วยการล้างเมมเบรน



ภาพที่ 2-17 ไดอะแกรมแสดงการก่อกำเนิดฟลักซ์ด้วยการล้างเมมเบรน (ชินทอง สุนทรภา, 2547)

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะและการเกิดฟาวลิงของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ ความเร็วของสารป้อนที่ผิวหน้าของเมมเบรน เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น Permeate rate จะเพิ่มขึ้นลดการเกิด fouling ที่ผิวหน้าเมมเบรน แต่ต้องเสียพลังงานสูงขึ้นและต้องการปั๊มตัวใหญ่ขึ้น จึงต้องหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของขนาดปั๊มและ Permeate rate ความดันโดย Permeate rate เป็นสัดส่วนตรงกับความดันที่ให้แก่ระบบ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความดัน ทำให้เกิด Fouling และการอุดตันของเมมเบรนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องความแข็งแรงของเมมเบรนในโมดูลบางแบบ เช่น Capillary type อุดหนุมิ โดย Permeate rate สูงขึ้นตามอุดหนุมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม อุดหนุมิไม่ได้เป็นตัวแปรที่ถูกต้องควบคุม แต่สิ่งที่สำคัญ คือผลของอุดหนุมิต่อฟลักซ์เพื่อให้สามารถวินิจฉัยได้ว่าการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากผลของอุดหนุมิหรือผลของพารามิเตอร์อื่นๆ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟาวลิงของเมมเบรนได้แก่

2.5.2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำดิบ

ความเข้มข้น และชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำจะมีผลถึงลักษณะสมบัติของน้ำที่จะผ่านระบบเมมเบรนโดยตรง องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำจะแตกต่างกันในแต่ละ

แห่ง จากการศึกษาสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับการเกิด Fouling ของเมมเบรนแบบ UF แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

- Polysaccharide
- Polyhydroxy aromatics
- Proteins
- Amino sugars

โมเลกุลของแต่ละประเภทนี้จะมีผลต่อ Fouling ต่างกัน แต่ละตัวจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุล และโครงสร้างโมเลกุล ภายในโมเลกุลจะมีแรงกระทำต่อผิวเมมเบรน และต่อตัวมันเองทำให้เกิดการต้านแรงไหลของน้ำ เมื่อโมเลกุลขนาดใหญ่ต่างชนิดกันเหล่านี้อยู่ในสารละลายเดียวกันจะก่อให้เกิด Fouling มากกว่าเมื่ออยู่แยกกันตัวใดตัวหนึ่ง Divalent cation และ pH ที่ต่ำกว่าจะทำให้สารอินทรีย์มีความสามารถในการดูดเกาะมากขึ้น น้ำที่กระด้างและ pH ที่ต่ำมีผลต่อลักษณะการเกิด Fouling ของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ (Dissolved Organic Carbon, DOC)

pH ที่จุด Isoelectric point (จุดที่สารมีประจุไฟฟ้าเท่ากัน) ของตัวถูกละลายใดๆ จะทำให้เกิด flux ต่ำสุด เนื่องจากที่จุดนี้ประจุของตัวถูกละลายจะลดลง ทำให้เกิดการรวมตัวใหญ่ขึ้น (agglomeration) ซึ่งจะลดอัตราการแพร่ผ่านผิวของเมมเบรนลง ดังนั้น การใช้วิธีการปรับ pH เพื่อตกตะกอนสารอินทรีย์ก็มีผลต่อการเกิด fouling จากสารอินทรีย์ในน้ำนั้นด้วย

2.5.2.2 วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ขนาดของรู และการกระจายขนาดของรูในเมมเบรน มีผลต่อลักษณะ fouling ในระบบ UF วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ วัสดุที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติปนอยู่ผ่านเมมเบรนก่อนและหลังจากการทำการล้างย้อน (Backwash) พบว่าเมมเบรนที่ชอบน้ำจะมีการไหลผ่านมากกว่าเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำเมื่อมี MWCO เท่ากัน คำอธิบายอย่างหนึ่งสำหรับพฤติกรรมนี้ก็คือ เมมเบรนชนิดที่ชอบน้ำจะดูดซับสารอินทรีย์น้อยกว่าเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่าการเกิด Fouling จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

2.5.2.3 การปรับสภาพน้ำ

จุดมุ่งหมายของการปรับสภาพน้ำในขั้นตอนนี้ เพื่อลดปริมาณของ Irreversible fouling และเพิ่มอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ด้วยเหตุนี้สารที่ใช้ปรับสภาพเมมเบรนควรจะเป็นตัวที่ดูดซับได้ดีบนผิวของเมมเบรน และยับยั้งการดูดซับของสารที่อุดตันบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน และมีผลกระทบต่ออัตราการไหลน้อยที่สุด

ในอีกแง่หนึ่งการปรับสภาพของน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบ อาจจะช่วยปรับปรุงการไหลผ่านเมมเบรน การกำจัดสารออกจากเมมเบรน หรือทั้งสองอย่าง

2.5.3 การทำความสะอาดแผ่นอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Cheryen, 1998)

การนำเมมเบรนมาใช้ในการแยกสารละลายพบว่าเมมเบรนจะเกิดการอุดตัน ส่งผลให้อัตราการผลิตน้ำลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีที่เหมาะสม เพื่อให้เมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงกับเมมเบรนที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งานมากที่สุด เพื่อยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน

การอุดตัน (Fouling) เกิดการองค์ประกอบในสารละลายที่ไปสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนและในรูพรุน และอาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่เจริญอยู่ในสารละลาย การเลือกวิธีล้างและทำความสะอาดเมมเบรนจำเป็นต้องพิจารณาชนิดของสารที่อุดตันบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน วัสดุที่ใช้ในการผลิตเมมเบรน รูปแบบของอุปกรณ์ ค่าใช้จ่าย ความยากง่าย และระยะเวลาในการล้าง วิธีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักได้แก่

2.5.3.1 วิธีกายภาพ (Physical methods)

เป็นการทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานเป็นหลัก เช่น การเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงเฉือนที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน แต่วิธีนี้จะสามารถลดการอุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งทำได้โดยการดูดซับที่สะสมออกจากชั้นผิวหน้าเมมเบรนด้วยฟองน้ำ (Sponge balls)

2.5.3.2 วิธีเคมี (Chemical methods)

เป็นการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนด้วยวิธีทางเคมี สารเคมีอาจช่วยให้อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยสารเคมีอาจทำให้อนุภาคที่เกิดการอุดตันเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้เกิดการหลุดออก (Desorption) หรือสารเคมีที่ใช้ อาจทำปฏิกิริยากับอนุภาคที่อุดตัน เช่น การเกิด ไฮโดรไลซิส การย่อยสลายพันธะเปปไทด์ของโปรตีน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น โดยสารเคมีที่ใช้ ควรมีคุณสมบัติ ละลายสารอุดตันหรือทำให้สารอุดตันเกาะตัวกันน้อยลง ด้วยกลไกทางกายภาพหรือทางเคมี รักษาสภาพการกระจายตัวของสารอุดตันไม่ให้กลับไปสะสมอีก ไม่เป็นสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันเอง และไม่ทำให้แผ่นเมมเบรนเสื่อมสภาพ

สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

- กรด ใช้ได้ทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ เช่น กรดเกลือ (Hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) กรดออกซาลิก (Oxalic acid) กรดซิตริก (Citric acid) เป็นต้น ใช้ได้ผลดีในการละลายตะกอนที่เป็นโลหะออกไซด์ เกลือ คาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารอุดตันที่พบในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ แต่ใช้ไม่ได้ผลกับสารอุดตันที่เป็นซิลิกา ซิลิเกต คอลลอยด์ และจุลินทรีย์

- ต่าง ที่ใช้กันแพร่หลายคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) คาร์บอเนต และฟอสเฟต ใช้ได้ผลดีกับสารอุดตันที่เป็นอินทรีย์ เช่น โปรตีน เพคติน เซลลูโลส ดังนั้น จึงนิยมใช้ล้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรม อาหาร และน้ำผลไม้

- เอนไซม์ (Enzyme) ใช้สำหรับทำความสะอาดสารอินทรีย์ เช่นโปรตีน โดยทำให้เกิดการแตกตัว ทำลายพันธะ เป็นโมเลกุลที่เล็กลง โดยต้องเลือกเอนไซม์ที่เหมาะสม เช่น ถ้าสารอุดตันเป็นโปรตีน ควรใช้เอนไซม์โปรติเอส (Protease) ถ้าเป็นแป้งควรใช้อะมัยเลส (Amylase) หรือควรใช้ไลเปส (Lipase) ถ้าสารอุดตันเป็นไขมัน บางทีอาจจะต้องใช้หลายตัวผสมกัน หรือหาสูตรที่เหมาะสม เอนไซม์จัดเป็นสารทำความสะอาดที่อ่อน ไม่เป็นอันตรายต่อเมมเบรน แต่มีราคาแพง

- สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งเป็นส่วนที่เมื่ออยู่ในน้ำจะแสดงประจุบวก และประจุลบ หรือเป็นกลาง ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิว โดยสารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าถึงส่วนต่างๆ ของเมมเบรนได้ดี (เกิด Wetting) จึงสัมผัสกับสารอุดตันได้ดี ล้างออกได้ง่าย แต่ควรเลือกรายละเอียดระวัง เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวอาจถูกดูดซับได้ด้วยแผ่นเมมเบรนบางชนิด ซึ่งทำให้เกิดการอุดตันเอง

- สารฆ่าเชื้อ (Disinfectant) สารฆ่าเชื้อส่วนมากเป็นตัวออกซิเดนต์ (Oxidant) เช่น คลอรีน (Chlorine) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) สารพวกไฮโปรคลอไรด์ (Hypochloride) เป็นสารที่ออกฤทธิ์แรง จึงควรใช้อย่างระมัดระวัง เนื่องจากอาจมีผลเสียต่อเมมเบรนและส่วนอื่นของอุปกรณ์ นอกจากนี้จะใช้สารเหล่านี้ในการทำความสะอาดเมมเบรนแล้ว ยังใช้ในการเก็บรักษาเมมเบรนด้วย

- สารทำความสะอาดกำหนดสูตร (Formula cleaner) เป็นสารที่ผู้จำหน่ายกำหนดส่วนประกอบขึ้นโดยอาจใช้สารหลายชนิดผสมกันให้มีความเหมาะสมกับชนิดของอนุภาคที่อุดตันเมมเบรน แต่มีราคาแพง

2.6 สมการที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรน

2.6.1 สมการทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรน (Metcalf และ Eddy, 2004)

การกรองโดยใช้กระบวนการเมมเบรน เมื่อเดินระบบแบบไหลตามขวาง ความดันที่ผ่านเมมเบรน (Transmembrane pressure) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$P_{tm} = \left(\frac{P_f + P_c}{2} \right) - P_p \quad (2-5)$$

เมื่อ	P_{tm}	=	ความดันทั้งหมดที่ผ่านเมมเบรน (กิโลปาสคาล)
	P_f	=	ความดันของน้ำที่ไหลเข้าระบบ (กิโลปาสคาล)
	P_c	=	ความดันของน้ำรีเทนเทท (กิโลปาสคาล)
	P_p	=	ความดันของน้ำเพอมีเอท (กิโลปาสคาล)

อัตราการไหลของน้ำเพอมีเอทที่ไหลผ่านกระบวนการเมมเบรนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$Q_p = F_w A \quad (2-6)$$

เมื่อ	Q_p	=	อัตราการไหลของน้ำเพอมีเอท (กิโลกรัม/วินาที)
-------	-------	---	---

$$F_w = \text{ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอท (กิโลกรัม/ตารางเมตร.วินาที)}$$

$$A = \text{พื้นที่ของเมมเบรน (ตารางเมตร)}$$

ค่าที่แสดงสมรรถนะในกระบวนการเมมเบรนคือ ค่าฟลักซ์และค่าการกักกัน โดยที่ค่าฟลักซ์จะแสดงถึงปริมาณของเพอมิเอทที่ผ่านเมมเบรนต่อพื้นที่ต่อเวลา ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$F_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (2-7)$$

เมื่อ K_w = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เมตร/วินาที.บรรยากาศ)

ΔP = ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน (บาร์)

$\Delta \pi$ = ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน (บาร์)

เนื่องจากโมเลกุลของสารละลายมีขนาดใหญ่ ซึ่ง $\Delta P \gg \Delta \pi$ จึงอาจตัดเทอมของ $\Delta \pi$ ดังนั้นจากสมการที่ 2-7 สามารถลดรูปที่ดังนี้

$$F_w = K_w \Delta P = \frac{Q_p}{A} \quad (2-8)$$

ค่าการกักกัน (Rejection coefficient, R_j) คือ เปอร์เซ็นต์ของตัวถูกละลายที่ถูกเมมเบรนกักกันไว้ หรือไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ ซึ่งค่าการกักกันที่หาได้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

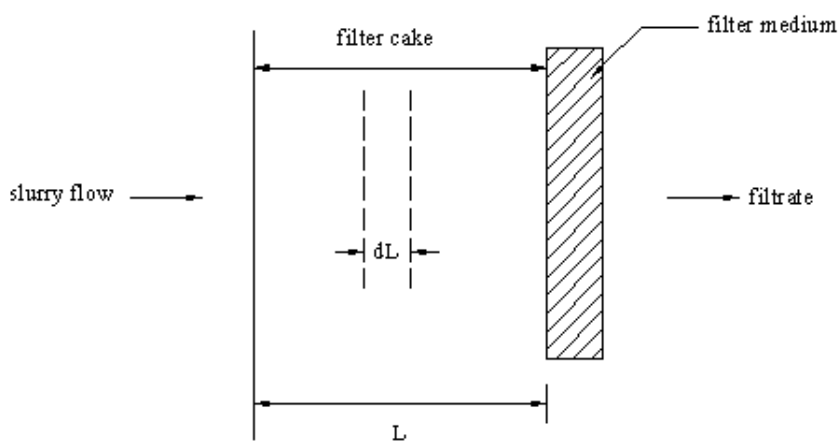
$$R_j = \left(1 - \frac{C_p}{C_f} \right) \times 100 \quad (2-9)$$

เมื่อ C_p = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมิเอท

C_f = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในรีเทนเทท

2.6.2 การกรองผ่านชั้นเค้ก (สาวิตรี จันทธานุรักษ์, 2546)

การกรองโดยใช้กระบวนการเมมเบรน ในขณะที่เดินระบบพบว่าเกิดชั้นเค้กสะสมตัว ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ดังรูปที่ 2-18 แรงเสียดทานระหว่างของไหลและอนุภาค จะทำให้ความดันของการไหลมีค่าลดลง Carman – Kozeny ได้อธิบายความดันตกที่เกิดจากการกรองผ่านชั้นเค้กได้ดังสมการที่ 2-19



ภาพที่ 2-18 การสะสมตัวของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

$$-\frac{\Delta P_c}{L} = \frac{k_1 \mu v (1 - \epsilon)^2 S_0^2}{\epsilon^3} \quad (2-19)$$

เมื่อ	ΔP_c	=	ความดันตกเนื่องจากเค้ก (นิวตัน/ตารางเมตร)
	k_1	=	ค่าคงที่สำหรับขนาดและรูปร่างของอนุภาค
	μ	=	ความหนืด (กิโลกรัม/เมตร.วินาที)
	v	=	ความเร็วในการกรอง (เมตร/วินาที)
	ϵ	=	ความพรุนของเค้ก
	L	=	ความหนาของเค้ก
	S_0	=	พื้นที่จำเพาะของอนุภาค

ความหนาของชั้นเค้กเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของสเลอริที่ป้อนให้แก่เมมเบรน
ดังนั้นความหนาของชั้นเค้กจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรของฟิลเตรท ดังนี้

$$m_c = \rho_p(1-\varepsilon)AL = C_s(V + \varepsilon LA) \quad (2-20)$$

เมื่อ m_c = มวลทั้งหมดของเค้ก
 C_s = มวลของเค้กที่ก่อดัวอยู่ในเมมเบรนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของฟิลเตรท
 ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่ฟิลเตอร์เค้ก
 ε = สัดส่วนช่องว่าง (void fraction) หรือรูพรุนของฟิลเตอร์เค้ก
 A = พื้นที่หน้าตัดของเค้ก
 V = ปริมาตรของฟิลเตรทที่ได้จากการกรอง

เนื่องจากปริมาตรของฟิลเตรทที่ถูกกักอยู่ในเค้ก มีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตร V ดังนั้น $(\varepsilon LA) \approx 0$ จะได้

$$L = \frac{C_s V}{A(1-\varepsilon)\rho_p} \quad (2-21)$$

เมื่อนำสมการที่ 2-21 ไปแทนในสมการที่ 2-19 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$v = \frac{-\Delta p_c \varepsilon^3}{\left[\frac{C_s V}{A(1-\varepsilon)\rho_p} \right]} K_1 \mu (1-\varepsilon)^2 S_0^2 \quad (2-22)$$

$$v = \frac{-\Delta P_c}{\left[\frac{K_1 (1-\varepsilon) S_0^2}{\rho_p \varepsilon^3} \right]} \cdot \frac{\mu C_s V}{A} \quad (2-23)$$

เมื่อ ความเร็วในการกรอง (v) = $\frac{dV}{dt} / A$

ดังนั้นเมื่อนำความเร็วในการกรองไปแทนค่าคงในสมการที่ 2-23 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2-20

$$\frac{dV/dt}{A} = \frac{-\Delta p_c}{\frac{K_1(1-\epsilon)^2 S_0^2}{\rho_p \epsilon^3} \cdot \frac{\mu C_s V}{A}} \quad (2-24)$$

กำหนดให้ α คือความต้านทานจำเพาะของฟิลเตอร์เค้ก (specific cake resistance) โดย α จะมีรูปของสมการดังนี้

$$\alpha = \frac{K_1(1-\epsilon)^2 S_0^2}{\rho_p \epsilon^3} \quad (2-25)$$

นำสมการที่ 2-25 แทนในสมการที่ 2-24 ทำให้สามารถอธิบายความดันตกที่เกิดจากการกรองผ่านชั้นเค้กดังสมการที่ 2-26

$$\frac{dV/dt}{A} = \frac{-\Delta p_c}{\alpha \frac{\mu C_s V}{A}} \quad (2-26)$$

2.6.3 ความต้านทานรวมและความดันตกจากการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเตรชัน (ส่วิตรี จันทรานุกรักษ์, 2546)

ความดันตกในการกรองส่วนใหญ่จะมาจากฟิลเตอร์เค้กและเมมเบรน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_m \quad (2-27)$$

เมื่อ	Δp	=	ความดันตกทั้งหมด (นิวตัน/ตารางเมตร)
	Δp_c	=	ความดันตกเนื่องจากชั้นเค้ก (นิวตัน/ตารางเมตร)
	Δp_m	=	ความดันตกเนื่องจากเมมเบรน (นิวตัน/ตารางเมตร)

กำหนดให้ R_m เป็นความต้านทานของเมมเบรน ที่ขึ้นกับความดันลด อัตราการกรอง ชนิด และอายุการใช้งานของตัวกรอง เป็นต้น โดยที่ R_m มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_m}{\mu R_m} \quad (2-28)$$

นำสมการที่ 2-26 และ 2-28 แทนลงในสมการที่ 2-27 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2-29

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p}{\mu \left(\frac{\alpha C_s V}{A} + R_m \right)} \quad (2-29)$$

2.6.3.1 การกรองด้วยความดันคงที่ (Constant – Pressure Filtration)

การกรองด้วยความดันคงที่ สามารถทำได้โดยการควบคุมให้ ΔP มีค่าคงที่ และเมื่อนำสมการที่ 2-29 จัดรูปใหม่ ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของการกรองด้วยความดันคงที่ได้ดังสมการที่ 2-30

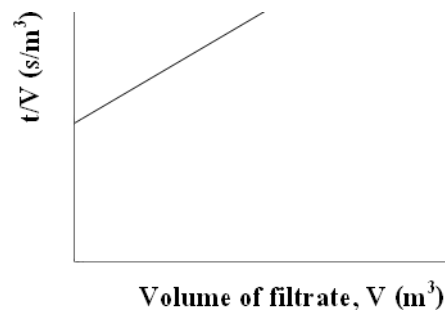
$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu \alpha C_s}{A^2 (-\Delta p)} V + \frac{\mu}{A (-\Delta p)} R_m = K_p V + B \quad (2-30)$$

เมื่อ

$$K_p = \frac{\mu \alpha C_s}{A^2 (-\Delta p)}$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta p)}$$

จากสมการที่ 2-30 เมื่อนำมา plot graph หาความสัมพันธ์ระหว่าง t/V กับ V จะได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2-19 และทำให้สามารถหาค่า R_m และค่า α ได้



ภาพที่ 2-19 ความสัมพันธ์ระหว่าง t/V กับ V

3.6.3.2 การกรองด้วยอัตราคงที่ (Constant – Rate Filtration)

การกรองชนิดนี้ อัตรากรองจะมีค่าที่คงที่ และเมื่อนำสมการที่ 2-29 มาจัดรูปใหม่ ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของการกรองด้วยอัตรากรองคงที่ได้ดังสมการที่ 2-31

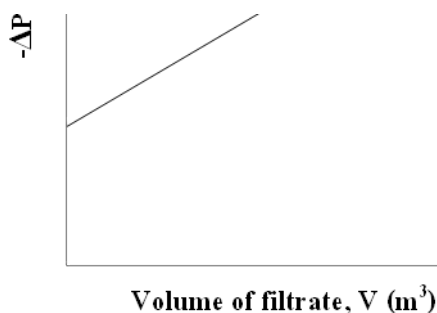
$$-\Delta p = \left(\frac{\mu \alpha C_s}{A^2} \cdot \frac{dV}{dt} \right) V + \left(\frac{\mu R_m}{A} \frac{dV}{dt} \right) = K_v V + C \quad (2-31)$$

เมื่อ

$$K_v = \left(\frac{\mu \alpha C_s}{A^2} \cdot \frac{dV}{dt} \right)$$

$$C = \left(\frac{\mu R_m}{A} \frac{dV}{dt} \right)$$

จากสมการที่ 2-31 เมื่อนำมา plot graph หาความสัมพันธ์ระหว่าง $-\Delta p$ กับ V จะได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2-20 และทำให้สามารถหาค่า R_m และค่า α ได้



ภาพที่ 2-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $-\Delta p$ กับ V

2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอุดตันของเมมเบรน

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการอุดตันของเมมเบรนถูกพัฒนาโดย Hermia (1982) โดยเสนอรูปแบบการเกิดฟาวลิงทั้งที่เกิดขึ้นในรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรน โดยมีเงื่อนไขอยู่ภายใต้สภาวะความดันคงที่ของการไหลที่มีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน (non-Newtonian) และเป็นการเดินระบบแบบอัดตัว (Dead-end Filtration) ภายหลัง Salahii และคณะ (2010) ได้มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายกลไกการเกิดฟาวลิงสำหรับการเดินระบบแบบไหลตามขวาง (Crossflow Filtration) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 Complete pore blocking model

แบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์นี้มีสมมติฐาน คือ ฟลักซ์จะลดลงเนื่องจากมีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนค้างอยู่บริเวณผิวของเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณทางเข้ารูพรุนแบบไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งค่าฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการดังนี้

$$\ln(J) = \ln(J_0) - K_b t \quad (2-32)$$

เมื่อ	J	=	ฟลักซ์ของเพอเมอที่เวลาใดๆ (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร.วินาที)
	J_0	=	ฟลักซ์ของเพอเมอที่เริ่มต้น (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร.วินาที)
	t	=	เวลา (วินาที)
	k_b	=	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์ (วินาที ⁻¹)

2.7.2 Standard pore blocking model

แบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา แสดงการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจาก มีอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนผ่านรูพรุนได้ แต่มีบางส่วนที่ตกค้างและถูกดูดซับด้วยเมมเบรน ทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนเพียงเท่านั้น แต่ไม่เกิดการสะสมบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน สมการที่เป็นไปตามแบบจำลองนี้สามารถเสนอได้คือ

$$1/J^{1/2} = 1/J_0^{1/2} + K_s t \quad (2-33)$$

เมื่อ k_s = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา (วินาที⁻¹)

2.7.3 Intermediate pore blocking model

แบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ แสดงการลดลงของฟลักซ์คล้ายกับแบบ Complete pore blocking model เนื่องจาก เกิดการสะสมของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนในระยะเวลาสั้นหรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งอนุภาคสามารถย้อนทับกันได้ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าการอุดตันได้ ซึ่งค่าฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการดังนี้

$$1/J = 1/J_0 + K_t t \quad (2-34)$$

เมื่อ k_t = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา (วินาที⁻¹)

2.7.4 Cake formation model

แบบจำลองการเกิดชั้นเค้ก แสดงการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรน ไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้ ทำให้เกิดชั้นฟิล์มขึ้น จากการเสียดสีของอนุภาคโดยการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของชั้นเค้กทำให้ความต้านทานในชั้นเค้กสูงขึ้นและการบีบอัดตัวของชั้นฟิล์มเนื่องจากความหนา ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าการอุดตันได้ สมการที่เป็นไปตามแบบจำลองนี้สามารถเสนอได้คือ

$$1/J^2 = 1/J_0^2 + K_c t \quad (2-35)$$

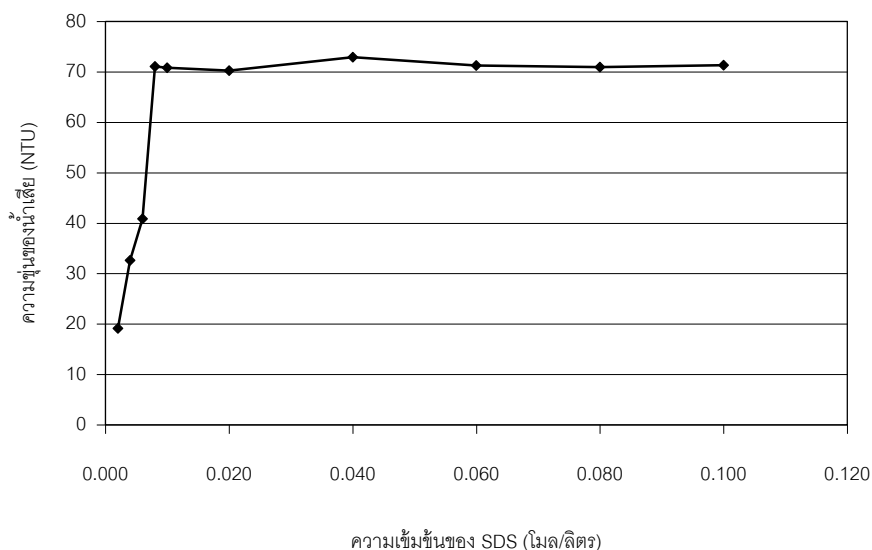
เมื่อ k_c = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา
(วินาที⁻¹)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กชกร ก้องกังวาลย์ (2552) ปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวโดยศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ชนิดเส้นใย โดยศึกษากลไกการทำงาน ประสิทธิภาพและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ และความเป็นไปได้ในการนำเอาวัสดุราคาถูกลงและหาได้ง่ายมาใช้แทนตัวกลางที่มีการใช้งานทั่วไปในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ รวมถึงการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการวางตัวกลางแบบชั้นตอน การเติมสารเคมีและการประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิวิชแอโรเฟลเทชัน (IAF)

จากการทดลองเพื่อทำการหาค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ พบว่าค่าความขุ่นของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของ SDS มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความขุ่นเริ่มมีค่าคงที่เมื่อค่าความเข้มข้นของ SDS มีค่า 0.008 โมล/ลิตร โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำเสียและความเข้มข้นของ SDS แสดงดังภาพที่ 2-21

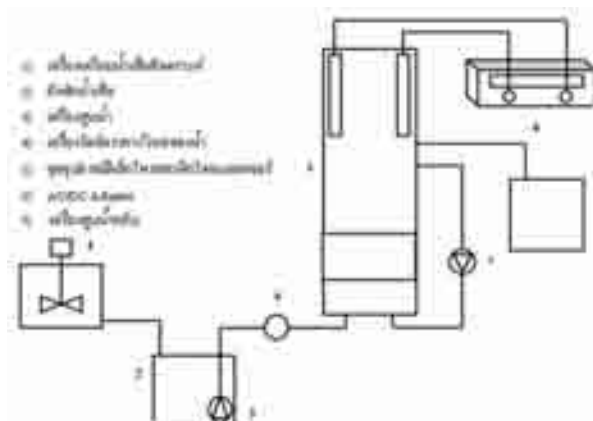
จากการศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ คือ เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาและเส้นใยสแตนเลส พบว่าตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลามีความเหมาะสมมากกว่าเส้นใยสแตนเลสเนื่องจากมีความไม่ชอบน้ำมากกว่า โดยมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 87.88 องศา นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของชั้นตัวกลางและอัตราการไหลของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุดได้จากการใช้เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตร/ชั่วโมง เท่ากับร้อยละ 44.37 และจากการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ด้วยการเดินระบบแบบทีละเท พบว่าการเติมสารเคมีให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีร้อยละ 62.2 ส่วนการวางตัวกลางแบบชั้นตอน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีร้อยละ 52.46



ภาพที่ 2-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำเสียและค่าความเข้มข้นของ SDS

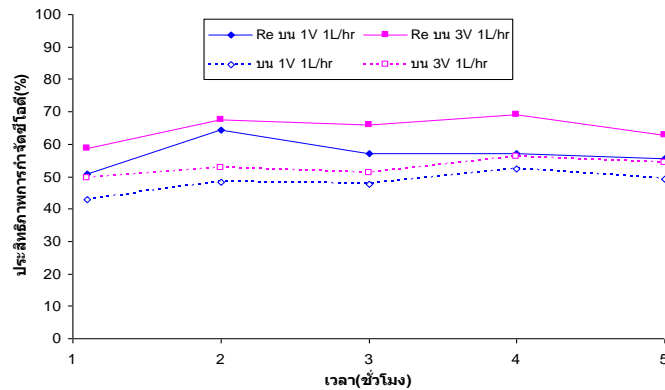
การประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีร้อยละ 44.59 โดยที่การเดินระบบแบบต่อเนื่องพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากการเดินระบบแบบที่ละเทประมาณร้อยละ 30 เนื่องจากมีระยะเวลาสำหรับการสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันน้อยกว่า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าถังปฏิกรณ์อีกครั้งเพื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสดังกล่าว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การหมุนเวียนน้ำร้อยละ 50 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้เล็กน้อย (ร้อยละ 10) โดยที่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบำบัดหรือกักน้ำของระบบเป็นหลัก

สุดศิริ วิฑูรย์วัฒน์ (2552) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 5,000 กรัม/ลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวประจุลบชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเดินระบบแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง เช่น ความสูงของชั้นตัวกลาง ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย ชนิดขั้วไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยออกแบบการทดลองดังนี้



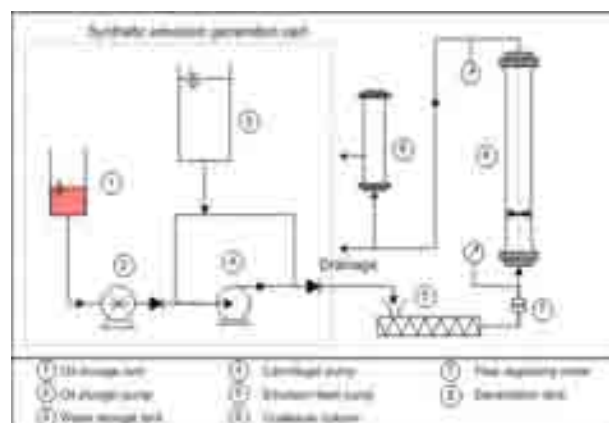
ภาพที่ 2-22 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โวลต์โอมมิเตอร์ (ชุดสิริ ฐิตสุภาวัฒน์, 2552)

จากการทดลองพบว่าในการเดินระบบแบบต่อเนื่องควรวางตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา หน้า 3.5 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 5 ลิตร/ชั่วโมง โดยสามารถใช้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้า บริเวณด้านล่างแทนการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของน้ำมัน ในขณะที่การวาง ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 เซนติเมตรและศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ สามารถส่งผลดีต่อทั้งประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงการเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมัน ซึ่ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวสัมพันธ์กับกลไกการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า (Electrostatic coalescence) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำให้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ น้ำมันปนเปื้อนสูง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความสามารถในการรวมตัว ของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ พบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ส่งผลเสียต่อสภาพ ความปั่นป่วนในระบบบำบัด โดยเมื่อทำการเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์เข้าคอลัมน์ที่อัตราการ ไหล 1 ลิตร/ชั่วโมง ค่าศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ จะช่วยเพิ่มระยะเวลาและเพิ่มโอกาสในการชนกันของ อนุภาคน้ำมันให้มากขึ้น จึงส่งผลให้สามารถบำบัดได้ร้อยละ 60 – 70 ดังภาพที่ 2-23



ภาพที่ 2-23 ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบน

ณัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา (2552) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ซึ่งศึกษาและเสนอโมเดลทำนายประสิทธิภาพของแนวทางการบำบัดแบบผสมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดในรูปอิมัลชัน ตลอดจนศึกษาผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส และความเร็วในการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดซึ่งพิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (ทีไอซี) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย โดยใช้น้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร และออกแบบการทดลองดังภาพที่ 2-24

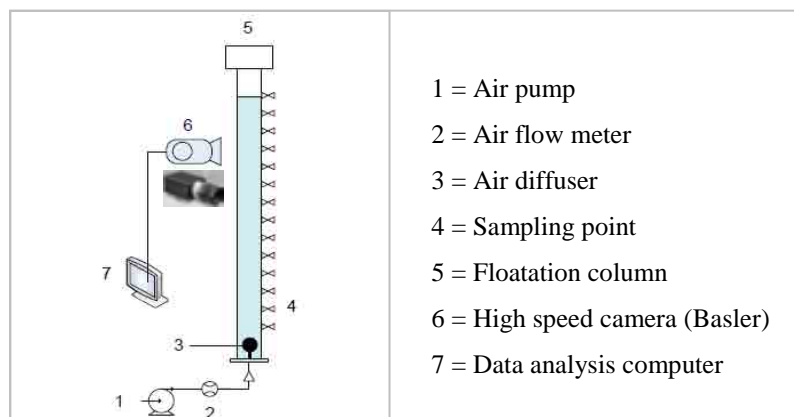


ภาพที่ 3-24 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง (ณัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา, 2552)

จากผลการศึกษาพบว่าความสูงของตัวกลางและความเร็วของน้ำเสีย มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดอินทรีย์ของกระบวนการบำบัดแบบผสม นอกจากนี้ ค่าตัวแปรประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการกระทบ การเกาะติด และการตกตะกอนสามารถประยุกต์ใช้ในโมเดลเพื่อทำนายประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบจากการลดลงของพื้นที่ได้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 25

สุรารักษ์ อวนฎวน (2552) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นแปรรูปโลหะด้วยกระบวนการทำให้ลอยแบบอินดิเวอโรฟลอตชัน (Induced Air Flotation: IAF) ร่วมกับกระบวนการโคแอกูเลชัน (Coagulation) เรียกว่ากระบวนการโมดิฟายด์อินดิเวอโรฟลอตชัน (Modify Induced Air Flotation: MIAF) รวมถึงการประยุกต์ใช้แนวคิดการใช้ฟองอากาศเคลือบน้ำมัน โดยทำการศึกษาด้วยคอลัมน์ 2 ขนาดคือ ขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 เซนติเมตร และขนาดใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดในด้านอัตราไหลอากาศ ปริมาณสารเคมี ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และรูปแบบการกระจายของเวลากัก (Residence Time Distribution: RTD) โดยเดินระบบแบบทีละเท (Batch process) และแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยออกแบบการทดลองดังภาพที่ 2-25

จากการทดลองพบว่า ขนาดของน้ำมันหล่อลื่นแปรรูปโลหะที่มีขนาดหยดน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 1.3 ไมครอน ซึ่งทำให้ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการตกตะกอนตามปกติ และยังเป็นข้อจำกัดสำหรับกระบวนการ IAF และกระบวนการทำให้ลอยโดยใช้ฟองอากาศเคลือบเคโรซีน ในขณะที่ สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกูเลชันที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดถึงร้อยละ 91.23 คือ ที่ค่า pH เริ่มต้น 7 โดยใช้สารส้ม 150 มิลลิกรัม/ลิตร



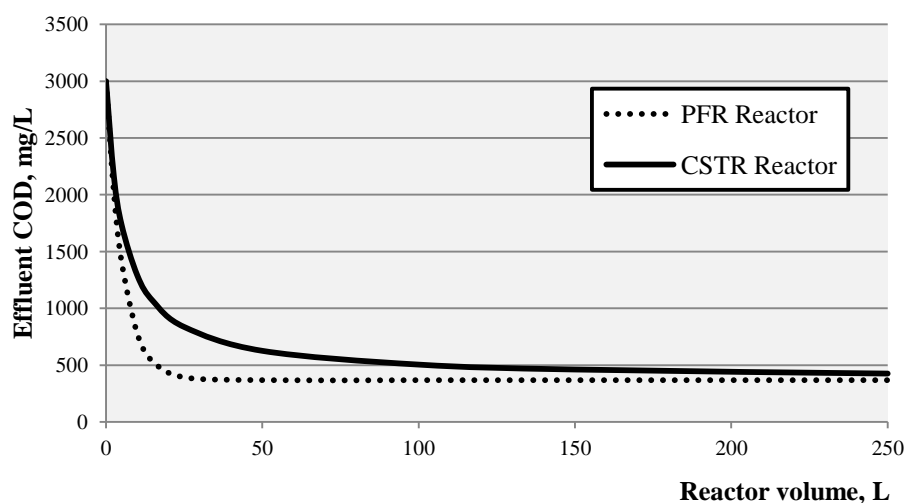
ภาพที่ 2-25 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง
(สุรารักษ์ อวนญวน, 2552)

สำหรับกระบวนการ MIAF แบบที่ละเท พบว่าสำหรับคอลัมน์ขนาดเล็กให้ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 94.96 โดยใช้ปริมาณสารส้ม 150 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อัตราไหลอากาศ 1.0 ลิตร/นาท ในขณะที่คอลัมน์ขนาดใหญ่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 82.97 โดยใช้ปริมาณสารส้ม 255 มิลลิกรัม/ลิตร และที่อัตราไหลอากาศ 2.0 ลิตร/นาท นอกจากนี้ การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นแปรรูปโลหะ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน a/G ซึ่งเป็นตัวแปรรวมทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและทางกายภาพ (ความปั่นป่วน) ของระบบ เนื่องจากข้อจำกัดในการรวมตัวกันของหยดน้ำมันขนาดเล็กและฟองอากาศ แต่ขึ้นอยู่กับการทำลายเสถียรภาพทางเคมีของหยดน้ำมันเป็นหลัก สำหรับการเดินระบบของกระบวนการ MIAF แบบต่อเนื่องพบว่า ได้ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณร้อยละ 80 โดยประมาณที่อัตราน้ำเข้า 5 ลิตร/ชั่วโมง และ 11 ลิตร/ชั่วโมง สำหรับคอลัมน์เล็ก ในขณะที่การเดินระบบในคอลัมน์ใหญ่ที่ได้ประสิทธิภาพการบำบัดเพียงร้อยละ 25 - 45 ซึ่งเป็นผลจากการไหลวนของน้ำที่เป็นผลกระทบจากความแตกต่างของโมเมนต์ ซึ่งส่งผลเสียต่อการรวมตัวของฟล็อกที่เกิดขึ้น

ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ (2552) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและโซโน-เฟนตัน โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการอะคูสติก ออกซิเดชัน (acoustic oxidation) ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advance oxidation processes) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (cutting oil

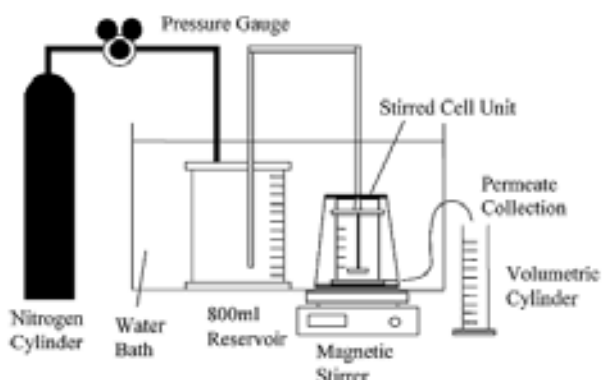
wastewater) ตัวแปรที่ ความเข้มข้นน้ำมัน รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิไดซ์ด้วยการเติม สารออกซิแดนท์ชนิดอื่น เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การเติมอากาศ และการใช้สารเฟนตัน

จากผลการทดลองพบว่า การใช้อะคูสติคออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ โดยมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากคุณลักษณะเฉพาะของน้ำเสียชนิดนี้ อย่างไรก็ตาม การใช้สารเฟนตันร่วมกันกับการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงนั้นจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึงร้อยละ 92.3 โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 140 กรัมและสารเฟอร์รัสซัลเฟตในปริมาณ 500 มิลลิกรัมของเหล็กต่อลิตรของน้ำเสีย (mg/L as Fe^{2+}) ซึ่งเป็นปริมาณที่สูง แต่สามารถลดปริมาณเพื่อให้ได้มาซึ่งการกำจัดที่เหมาะสมได้ด้วยการใช้สมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (reaction kinetic) ดังภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 COD ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 140 กรัมและสารเฟอร์รัสซัลเฟตในปริมาณ 500 มิลลิกรัมของเหล็กต่อลิตรของน้ำเสีย (mg/L as Fe^{2+}) เมื่อใช้ขนาดของถังปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน (ธนันท์ เณิมสินสุวรรณ, 2552)

Lim and Mohammad (2010) ศึกษากลไกการเกิดฟาวลิงของสารละลายเจลาตินเมื่อใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และศึกษาเกี่ยวกับถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโปรตีนกับโปรตีนและโปรตีนกับเมมเบรน ในงานวิจัยนี้จะใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีสมบัติชอบน้ำ ชนิด Regenerated cellulose acetate ที่มีขนาดรูพรุน 30,000 ดาลตัน เตินระบบแบบอัดตัว (Dead-end Filtration) และใช้แบบจำลองการอุดตันของ Hermia อธิบายลักษณะการเกิดฟาวลิงของเมมเบรน การออกแบบการทดลองมีลักษณะดังภาพที่ 2-27



ภาพที่ 2-27 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง (Lim and Mohammad, 2010)

จากการศึกษาพบว่าพีเอชของสารละลายและค่า ionic strength มีผลต่อการอุดตันของโปรตีนที่เมมเบรน เมื่อพิจารณาที่เพอมีเอทพลั๊กซ์พบว่า พลา๊กซ์จะลดลงสูงสุดที่พีเอช 5.3 ซึ่งอยู่ในช่วงของค่า isoelectric point ของสารละลายเจลาตินเนื่องจากเกิดการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ในทางตรงข้ามพลา๊กซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงและต่ำค่า isoelectric point (พีเอช 4 และ 6.8) การอุดตันจะลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพลา๊กซ์ และจากการใช้แบบจำลองของ Hermia ทำนายการอุดตันของเมมเบรนพบว่า เมื่อใช้สารละลายเจลาตินที่มีพีเอชใกล้ค่า isoelectric point (พีเอช 5.3) พบว่าเมมเบรน เกิดการอุดตันแบบพื้นฐาน (Standard pore blocking) แต่เมื่อใช้สารละลายเจลาตินที่มีพีเอชสูงและต่ำกว่าค่า isoelectric point (พีเอช 4 และ 6.8)

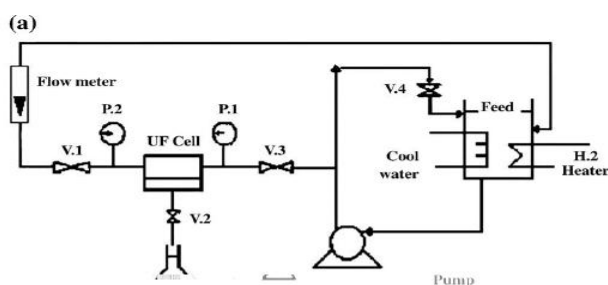
จากงานวิจัยนี้จึงพบว่าค่า isoelectric point มีผลต่อการลดลงพลา๊กซ์ในการกรองน้ำของเมมเบรน และลักษณะการเกิดการอุดตันที่บริเวณเมมเบรน จึงอาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองของ Hermia มีความแม่นยำและถูกต้องซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงสามารถนำแบบจำลองนี้มาประยุกต์ใช้ในการอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อใช้เมมเบรนกรองน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันได้

Salahi และคณะ (2010) ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดันที่ผ่านเมมเบรน ความเร็วของน้ำเสียเข้าและ พีเอชที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่ Tehran โดยออกแบบตัวแปรตามความเหมาะสมดังนี้

- อุณหภูมิ : 25 37.5 และ 50 องศาเซลเซียส

- ความดัน (TMP) : 1.5 3 และ 4.5 บาร์
- อัตราเร็ว (CFV) : 0.25 0.75 และ 1 เมตร/วินาที
- พีเอช : 4 7 และ 10

เมมเบรนที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด polyacrylonitrile (PAN) ที่มีขนาดรูพรุน 20,000 ดาลตัน โดยเดินระบบแบบไหลตามขวาง (Crossflow Filtration) ศึกษากลไกในการเกิดการอุดตัน (fouling) โดยใช้ทฤษฎีและแบบจำลองการเกิดการอุดตันของ Hermia มาใช้ในการอธิบายการเกิดการอุดตันของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยออกแบบการทดลองตามภาพที่ 2-28

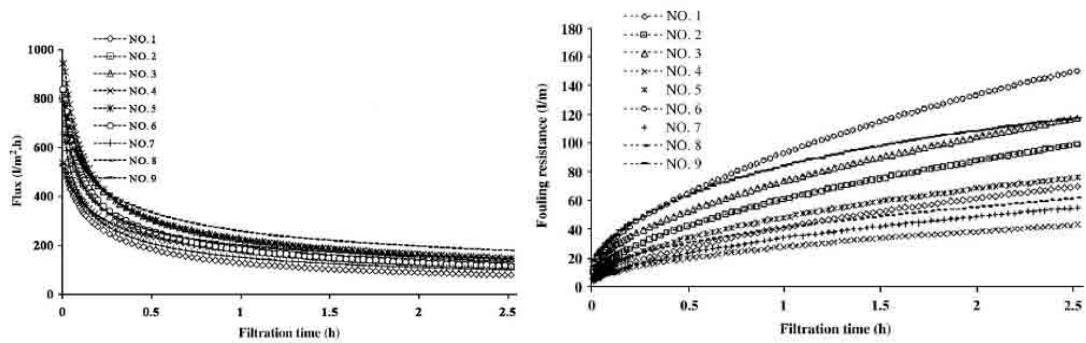


ภาพที่ 2-28 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง (Salahi และคณะ, 2010)

จากผลการทดลองพบว่า การให้ความดันที่สูงที่สุด (3 บาร์) ใช้อัตราเร็วที่ต่ำสุด (0.25 เมตร/วินาที) อุณหภูมิ 37.5 องศาเซลเซียส พีเอชเท่ากับ 7 จะทำให้เกิดแรงต้านทานการเกิดการอุดตันที่มากที่สุดและให้ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำสูงสุดเท่ากับ 950 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง แต่การให้ความดันที่ต่ำสุด (1.5 บาร์) ใช้อัตราเร็วเท่ากับ 0.75 เมตร/วินาที อุณหภูมิ 37.5 องศาเซลเซียส พีเอชสูงสุดเท่ากับ 10 จะทำให้เกิดแรงต้านทานการเกิดฟาวลิงน้อยที่สุด แต่ให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำต่ำสุดเท่ากับ 530 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ดังภาพที่ 2-29 และพบว่าหลังจากใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน จะทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดีขึ้น สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 100 ความขุ่นร้อยละ 98 สามารถบำบัดน้ำมันได้ถึงร้อยละ 99 และ COD ลดลงร้อยละ 60

จากการทดลองการอธิบายเพอมีเอทฟลักซ์โดยการควบคุมระบบโดยใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน (อุณหภูมิ ความเร็ว ความดัน และพีเอช) ที่ส่งผลต่อการเกิดการอุดตัน จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองของ Hermia มาใช้ในการพยากรณ์การเกิดการอุดตันพบว่า แบบจำลองที่มีความแม่นยำที่สุดคือแบบจำลองการเกิดชั้นเค้ก รองลงมาคือแบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งทำให้สามารถอธิบายได้ว่าการกรองน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้กระบวนการอัลตรา-

ฟิลเตรชันในครั้งนี้ การอุดตันของเมมเบรนมีลักษณะเป็นแบบการเกิดชั้นเค้กชั้นที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งสามารถทำความสะอาดได้โดยใช้สารเคมีในการทำความสะอาดเพื่อช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรน

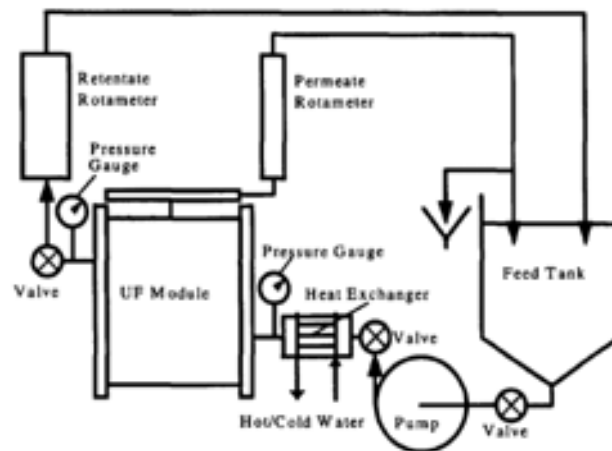


ภาพที่ 2-29 ฟลักซ์ที่ลดลงตามเวลาและแรงต้านทานการเกิดการอุดตันเมื่อเดินระบบ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน (Salahi และคณะ, 2010)

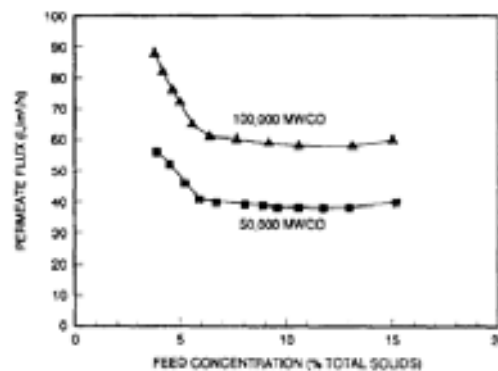
Sayed Razavi และคณะ (1996) ศึกษาการเกิดฟาวลิงและวิธีการทำความสะอาดอัลตรา-ฟิลเตรชันเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียที่มาจากการสกัดถั่วเหลือง โดยใช้เมมเบรนชนิด polysulfone ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ 50,000 และ 100,000 ดาลตัน ขนาดพื้นที่ผิว 2.25 ตารางเมตร เดินระบบแบบไหลตามขวาง โดยออกแบบการทดลองดังภาพที่ 2-30 จากนั้นศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงโดยการนำเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานแล้วมาส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) และการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารทำความสะอาดดังนี้

- น้ำสะอาด
- Sodium Hydroxide (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร
- Hydrochloric acid (HCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร
- สารลดแรงตึงผิว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเมมเบรนเกิดการอุดตัน จะเกิดชั้นเค้กที่มีความหนา 0.4 ไมโครเมตร ชั้นที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 100,000 ดาลตัน และเกิดชั้นเค้กที่มีความหนา 0.2 ไมโครเมตร ชั้นที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 50,000 ดาลตัน ทำให้พบว่าชั้นเค้กที่เกิดขึ้นมีส่วนช่วยในการบำบัดเบื้องต้น ซึ่งพบว่า เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 100,000 ดาลตัน จะให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำสูงกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 50,000 ดาลตัน ดังภาพที่ 2-31



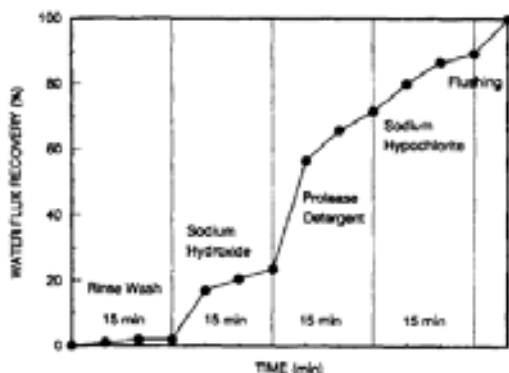
ภาพที่ 2-30 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง (Sayed Razavi และคณะ ,1996)



ภาพที่ 2-31 ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำของเมมเบรนทั้ง 2 ขนาด (Sayed Razavi และคณะ ,1996)

จากการใช้สารเคมีทำความสะอาดเมมเบรนพบว่า เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวทำความสะอาดเมมเบรน จะสามารถทำให้ฟลักซ์ที่เกิดการอุดตันกลับมาใช้งานใหม่ได้ถึงร้อยละ 42 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยากับสารที่อุดตันเมมเบรนเท่ากับ 15 นาที ส่วนสารที่มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเมมเบรนรองลงมา คือ Sodium Hydroxide สามารถทำให้ฟลักซ์ที่เกิดการอุดตันกลับมาใช้งานใหม่ได้ถึงร้อยละ 18 แต่จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเมมเบรนยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงได้มีการใช้สารเคมีหลายชนิดมาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนในครั้งเดียวกัน โดยขั้นตอนแรกล้างเมมเบรนด้วยน้ำสะอาด จากนั้นตามด้วย Sodium Hydroxide สารลดแรงตึงผิว และ Sodium Hypochlorite ตามลำดับ โดยใช้เวลาดังกล่าว 15

นาที่ หลังจากนั้นล้างย้อนด้วยน้ำสะอาด ดังภาพที่ 2-32 ซึ่งพบว่า สามารถทำให้ฟลักซ์ที่เกิดการอุดตันกลับมาใช้งานใหม่ได้ถึงร้อยละ 90



ภาพที่ 2-32 ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำเมื่อใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ทำความสะอาดเมมเบรน (Sayed Razavi และคณะ ,1996)

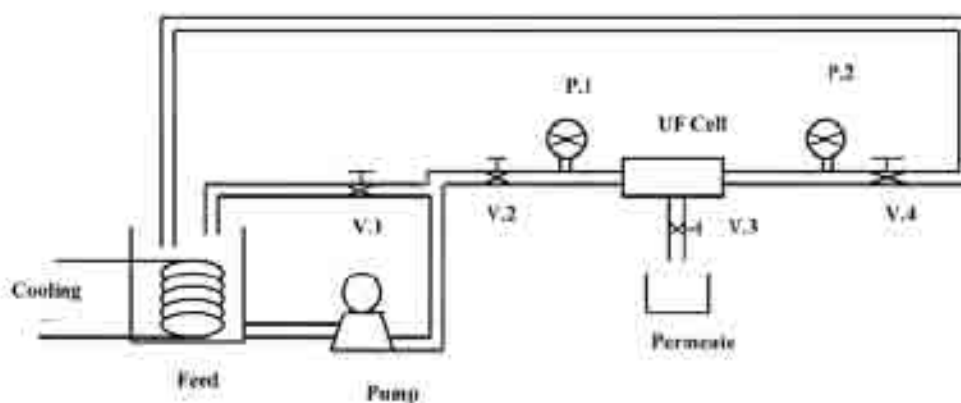
Kazemimoghadam and Mohammadi (2007) ศึกษาผลของการใช้สารเคมีที่แตกต่างกัน ในการทำความสะอาดเมมเบรน โดยใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด polysulfone ที่มีขนาด รูพรุน 30,000 ดาลตัน กรองน้ำเสียที่ปนเปื้อนนม ซึ่งใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ ใน Tehran และเดินระบบแบบไหลตามขวาง ใช้ความดัน 3 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดย ออกแบบการทดลองตามภาพที่ 2-33 เดินระบบจนกระทั่งเมมเบรนเกิดการอุดตัน จะเกิดขึ้นแค้กที่ บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน จากนั้นใช้สารเคมีที่มีชนิดที่แตกต่างกันทำความสะอาดเมมเบรน ซึ่ง ได้แก่ Hydrochloric acid (HCl) Nitric acid (HNO₃) Sodium Hydroxide (NaOH) Sodium-dodecylsulfate (SDS) และ EDTA ซึ่งสามารถอธิบายได้จากค่า RR และ FR ดังสมการ

$$RR = \left(\frac{R_f - R_c}{R_f} \right) \times 100 \quad (2-36)$$

- เมื่อ RR = แรงต้านทานของเมมเบรนที่กำจัดได้ (ร้อยละ)
 Rf = แรงต้านทานของเมมเบรนหลังจากเมมเบรนเกิดการอุดตัน
 Rc = แรงต้านทานของเมมเบรนหลังจากผ่านการทำความสะอาด

$$FR = \left(\frac{J_{wc} - J_{ww}}{J_{wi} - J_{ww}} \right) \times 100 \quad (3-37)$$

- เมื่อ FR = ฟลักซ์ที่สามารถฟื้นฟูได้ (ร้อยละ)
 J_{wc} = ฟลักซ์การไหลของน้ำกลั่นเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี
 J_{ww} = ฟลักซ์การไหลของน้ำกลั่นเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำสะอาด
 J_{wi} = ฟลักซ์การไหลของน้ำกลั่นเมื่อเดินระบบ 10 นาที



ภาพที่ 2-33 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง
 (Kazemimoghadam and Mohammadi, 2007)

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดเมมเบรนสามารถอธิบายได้โดยใช้ค่า RR และ FR อธิบายประสิทธิภาพของสารเคมี ดังตารางที่ 2-3

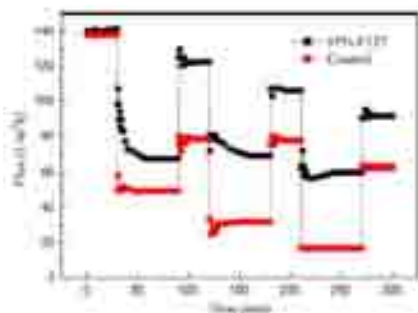
ตารางที่ 2-3 ประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรน (Kazemimoghadam และ Mohammadi, 2007)

Chemical agents	FR (%)	RR (%)
HCl	9	14
HNO ₃	2	5
NaOH	10	30
NaClO	40	58
EDTA	8	13
SDS	27	35
EDTA+NaOH	52	89
EDTA+SDS+NaOH	100	100

จากตารางที่ 2-3 เมื่อใช้สาร Sodium Hydroxide (NaOH) Sodium dodecylsulfate (SDS) และ EDTA ร่วมกันจะสามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้ดีที่สุด เนื่องจาก SDS ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว EDTA ทำหน้าที่เป็น Chelating agent และ NaOH เป็นสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรน

Chen และคณะ (2009) ศึกษาการแยกอนุภาคของน้ำมันออกจากน้ำโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กรองน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำมันพืชร่วมกับสารลดแรงตึงผิว (Sodium dodecylsulfate, SDS) และใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด polyethersulfone ที่ถูกปรับปรุงมาจากเมมเบรนชนิด Fluronic รุ่น F127 ที่มีขนาดรูพรุน 29,000 ดาลตัน ใช้ความเข้มข้นของ Fluronic F127 ร้อยละ 0 – 20 ในการสร้างเมมเบรนชนิด polyethersulfone โดยศึกษาการอุดตันของเมมเบรนและการฟื้นฟูเมมเบรนเมื่อเกิดการอุดตัน

จากการทดลองพบว่าการสร้างเมมเบรนชนิด polyethersulfone โดยใช้ความเข้มข้นของ Fluronic F127 ร้อยละ 0 – 20 จะสามารถให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำตั้งแต่ 42.77 – 82.98 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง หลังจากเมมเบรนเกิดการอุดตัน จะทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้น้ำสะอาดในการล้างเมมเบรน ทำให้พบว่าฟลักซ์ในการกรองน้ำลดลง เนื่องจากน้ำสะอาดจะไปรวมตัวกับหยดน้ำมัน ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจนไปอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนส่งผลให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำลดลง ดังนั้นจึงใช้สารลดแรงตึงผิว (Sodium dodecylsulfate, SDS) ทำความสะอาดเมมเบรน ซึ่งสามารถทำให้ฟลักซ์ที่เกิดการอุดตันกลับมาใช้งานใหม่ได้ถึงร้อยละ 93.33 ดังภาพที่ 2-34



ภาพที่ 2-34 ความสามารถในการทำให้ฟลักซ์ที่เกิดการอุดตันกลับมาใช้งานใหม่เมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารลดแรงตึงผิว (Sodium dodecylsulfate, SDS) (Chen และคณะ, 2009)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่าในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางกายภาพเคมี ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างกัน และพบว่ากระบวนการเมมเบรน เป็นกระบวนการทางกายภาพเคมีวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยส่วนใหญ่เลือกใช้เมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน เนื่องจากมีขนาดที่เหมาะสมที่สามารถแยกอนุภาคของน้ำมันออกจากเฟสน้ำได้ โดยมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง จึงได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน แต่กระบวนการเมมเบรนยังพบปัญหาที่สำคัญได้แก่ เมมเบรนเกิดการอุดตันได้ง่ายส่งผลให้เมมเบรนมีอายุการใช้งานสั้น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงลักษณะการเกิดการอุดตันของเมมเบรน และศึกษาการยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนโดยใช้การล้างทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารเคมีชนิดต่างๆ

ในปัจจุบันพบว่าในประเทศไทยยังมีข้อจำกัดในการนำกระบวนการเมมเบรนมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน เนื่องจากต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบสูง และต้องอาศัยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญในการเดินระบบ อีกทั้งยังพบปัญหาในเรื่องของข้อจำกัดทางด้านอายุการใช้งานของเมมเบรน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เกิดปัญหาในประเทศไทยได้แก่ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการเพื่อนำไปใช้ในการเดินระบบที่เหมาะสมและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด อีกทั้งยังศึกษาปัญหาการอุดตันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายมาอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังมีการใช้สารเคมีในการทำความสะอาดเมมเบรน และนำเมมเบรนกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรนให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น เพื่อช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบอีกทางหนึ่ง

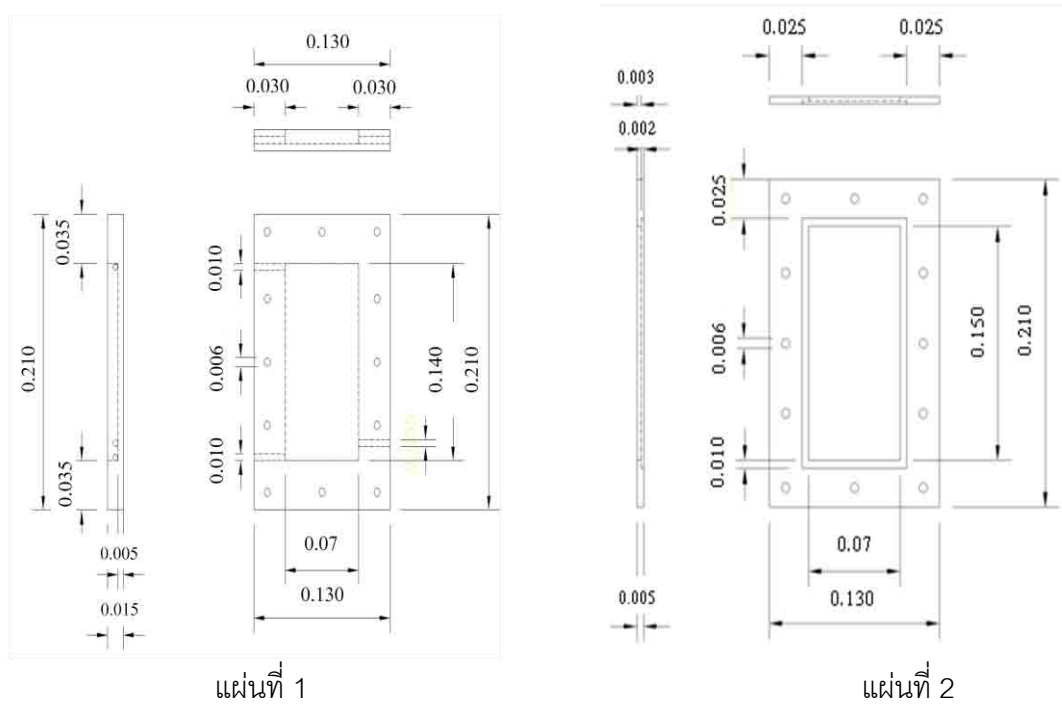
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

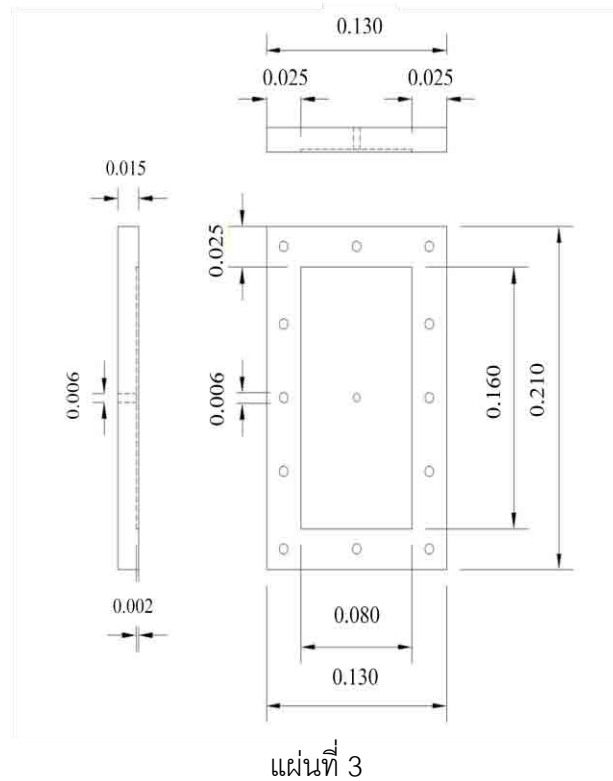
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์อัลตราฟิเตรชัน

ชุดอุปกรณ์อัลตราฟิเตรชันที่ใช้ในการทดลองทำด้วยวัสดุอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 3 แผ่น โดยรายละเอียดของชุดอุปกรณ์อัลตราฟิเตรชันดังแสดงในภาพที่ 3-1





รูปที่ 3-1 แผ่นอะคริลิกใสสำหรับใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

เมื่อนำแผ่นอะคริลิกใสดังภาพที่ 3-1 มาประกอบกัน จะได้ถังปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันที่มีขนาด กว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 21 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ถังปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

2. อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ลักษณะของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะแสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ลักษณะของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่ใช้

เมมเบรน	ลักษณะ
วัสดุ	Regenerated Cellulose
ขนาดรูพรุน	30,000 ดาลตัน
พื้นที่ผิว	98 ตารางเซนติเมตร
ความชอบน้ำ (Hydrophobicity)	ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic)
ช่วงการทนพีเอช	2-13

3. ถังเก็บน้ำพลาสติกที่มีความจุ 100 ลิตร

เนื่องจากขนาดพื้นที่ผิวของเมมเบรนมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงอาจจะสมมุติได้ว่าความเข้มข้นของน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันซึ่งจะถูกวนกลับสู่ถังเก็บน้ำอีกครั้งจะมีความเข้มข้นคงที่โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

4. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Water flow Meter) ยี่ห้อ NEW FLOW รุ่น FAC201 อัตราการไหล 2-20 ลิตร/นาที

5. เครื่องปั่นกวนน้ำ (Motor stirrer) บริษัท เบคไทย (ประเทศไทย) จำกัด ยี่ห้อ IKA LABORTECHIK

6. เครื่องสูบน้ำชนิดหยอชิง (Centrifugal Pump)

การป้อนน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์เข้าสู่ชุดอุปกรณ์ จะใช้เครื่องสูบน้ำชนิดหยอชิง (Centrifugal Pump) ยี่ห้อ LUCKY PRO ขนาดกำลังไฟเท่ากับ 0.746 กิโลวัตต์ อัตราการไหลเท่ากับ 140 ลิตร/นาที และเฮดของเครื่องสูบน้ำ (Pump head) เท่ากับ 3.3 บาร์

7. เครื่องชั่งดิจิตอลแบบละเอียด

8. อุปกรณ์วัดแรงดัน ยี่ห้อ SUMO (0 – 4 บาร์) จำนวน 2 ชุด

9. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100A

10. อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี

- หลอดทดสอบวัดค่าซีไอดี ขนาด 16x150 มิลลิเมตร พร้อมฝาจากเกลียว

- ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น 600
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- ปิเปต (Pipet) ขนาด 1 5 10 และ 25 มิลลิลิตร

11. อุปกรณ์หาค่าปริมาณน้ำมัน

- กรวยแยกขนาด 250 มิลลิลิตร มีฝาปิดชนิดเทฟลอน
- ขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 มิลลิลิตร
- ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น 600
- กระดาษกรอง (Whatman NO.40)

3.1.2 สารเคมี

1. น้ำมันตัด (Cutting Oil)

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของน้ำมันตัด รุ่น 3810150 บริษัท BP-Castrol (ประเทศไทย จำกัด)

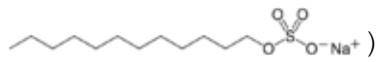
ชนิดของน้ำมัน	น้ำมันตัด
ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	~1
ความหนืด (cP)	0.935
แรงตึงผิว (mN/m)	47.02

2. น้ำมันปาล์ม บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ จำกัด มหาชน ซึ่งมีลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์ม

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	10.82
ค่าความหนืด (cP) @21°C	88.6
ค่าความหนาแน่น (g/ml) @21°C	0.898
ค่าความร้อน (kJ/kg)	39,550

3. สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ได้แก่ Sodium lauryl sulphate (SLS หรือ SDS) ของบริษัท Carlo Erba Co., Ltd ซึ่งมีลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-4 ตารางที่ 3-4 ลักษณะสมบัติของ Sodium lauryl sulphate

IUPAC name	Sodium dodecyl sulfate
Other names	Sodium monododecyl sulfate; Sodium lauryl sulfate; Sodium monolauryl sulfate; Sodium dodecanesulfate; dodecyl alcohol, hydrogen sulfate, sodium salt; n-dodecyl sulfate sodium; Sulfuric acid monododecyl ester sodium salt;
Molecular formula	$C_{12}H_{25}SO_4Na$ ()
Molar mass	288.38 g mol ⁻¹
Density	1.01 g/cm ³
Melting point	206 °C
CMC	The critical micelle concentration in pure water at 25°C is 0.0082 M

4. สารละลายมาตรฐาน Potassium Dichromate Digestion ($K_2Cr_2O_7$) ของบริษัท Carlo Erba

5. กรดไฮโดรคลอริก ความบริสุทธิ์ 93 % (Hydrochloric Acid, HCl) บริษัท J.T. Baker

6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความบริสุทธิ์ 93 % (Sodium Hydroxide, NaOH) บริษัท J.T. Baker

7. สารละลายมาตรฐาน Disodium ethylenediaminetetraacetate dehydrate (EDTA) บริษัท J.T. Baker

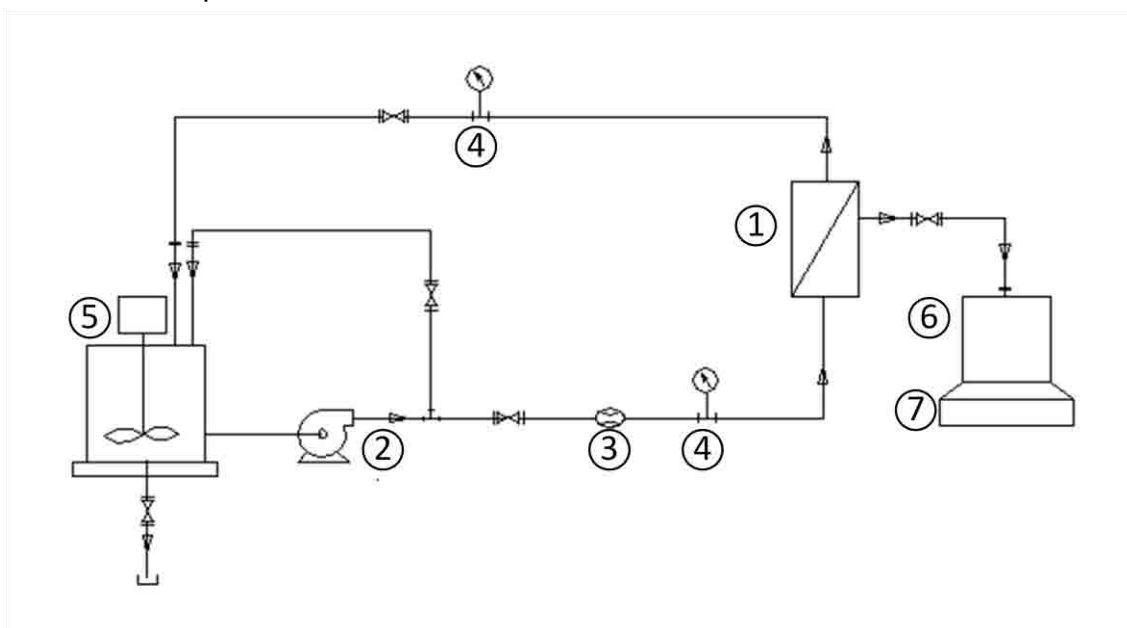
8. สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulfate ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) บริษัท J.T. Baker

9. เฮกเซน (n-Hexane) บริษัท J.T. Baker

10. โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate)

11. น้ำกลั่น

3.2 การติดตั้งชุดการทดลองของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน



การติดตั้งชุดการทดลองของระบบอัลตราฟิลเตรชัน ประกอบด้วย

1. ชุดอุปกรณ์อัลตราฟิลเตรชัน
2. เครื่องสูบน้ำ (Centrifugal Pump)
3. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Flow meter)
4. เครื่องวัดความดัน (Pressure Gauge)
5. ชุดเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
6. ถังเก็บน้ำที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน
7. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

ภาพที่ 3-3 การติดตั้งชุดการทดลอง

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้จะทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 1 10 กรัม/ลิตร และ 20 กรัม/ลิตร (ธนันท์เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) และน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม โดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร เติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Sodium Dodecyl Sulphate, SDS) ที่ 1 CMC มีค่า

ความเข้มข้นเท่ากับ 0.008 โมล/ลิตร (ประจักษ์ ศาสตร์เวช, 2551) ทำการปั่นกรองน้ำตัวอย่างที่ 125 รอบ/นาที นาน 30 นาที เพื่อนำไปใช้สำหรับการทดลองในการศึกษานี้แบ่งเป็น 4 การทดลอง คือ

การทดลองที่ 1 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทางกายภาพเคมีจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ความขุ่น บีไอดี ทีไอซี และปริมาณน้ำมันและไขมัน (oil and grease)

การทดลองที่ 2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำมันตัดจำนวน 3 ความเข้มข้น ความดัน และความเร็วที่ใช้ในการเดินระบบที่แตกต่างกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ และความเร็วของน้ำเสีย ที่ใช้ในการเดินระบบ โดยทำการเปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ ความดันและความเร็วที่ใช้ในการเดินระบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ความขุ่น บีไอดี ทีไอซี และปริมาณน้ำมันและไขมัน (oil and grease)

การทดลองที่ 3 การศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งแบบเป็น 2 ส่วนดังนี้

การทดลองที่ 3-1 ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia โดยใช้ข้อมูลจากความสัมพันธ์ของฟลักซ์ที่ได้จากการกรองน้ำกับเวลาที่ใช้ในการเดินระบบที่ได้จากการศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมาอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรน

การทดลองที่ 3-2 ศึกษากลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยประยุกต์ใช้สมการการกรองที่ผิวหน้าเพื่ออธิบายความต้านทานจำเพาะของฟิลเตอร์เค้ก (specific cake resistance: α) และแรงต้านทานของฟาวลิง (Fouling Resistance) ทำโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน มาอธิบายกลไกการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้น

การทดลองที่ 3-3 ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนโดยวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope) เพื่ออธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้นจากการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันกรองน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

การทดลองที่ 3-4 ศึกษาสมบัติของชั้นแค้กที่สะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน โดยใช้แบบจำลองการลดลงของเพอมีเอทของ Hong และคณะ (1997) เพื่อพิจารณาค่าความพรุน (E) และความหนา (δ) ของชั้นแค้กที่สะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันที่อยู่บนผิวหน้าของเมมเบรน

การทดลองที่ 4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยศึกษาผลของปริมาณและชนิดสารละลายที่เหมาะสมสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยใช้สารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ Sodium hydroxide, Sodiun dodecylsulfate (SDS) และ EDTA ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยพิจารณาค่าฟลักซ์ที่สามารถฟื้นฟูได้ (FR) และค่าประสิทธิภาพการกำจัดแรงต้านทานของ เมมเบรน (RR)

ขั้นตอนในการเดินระบบ

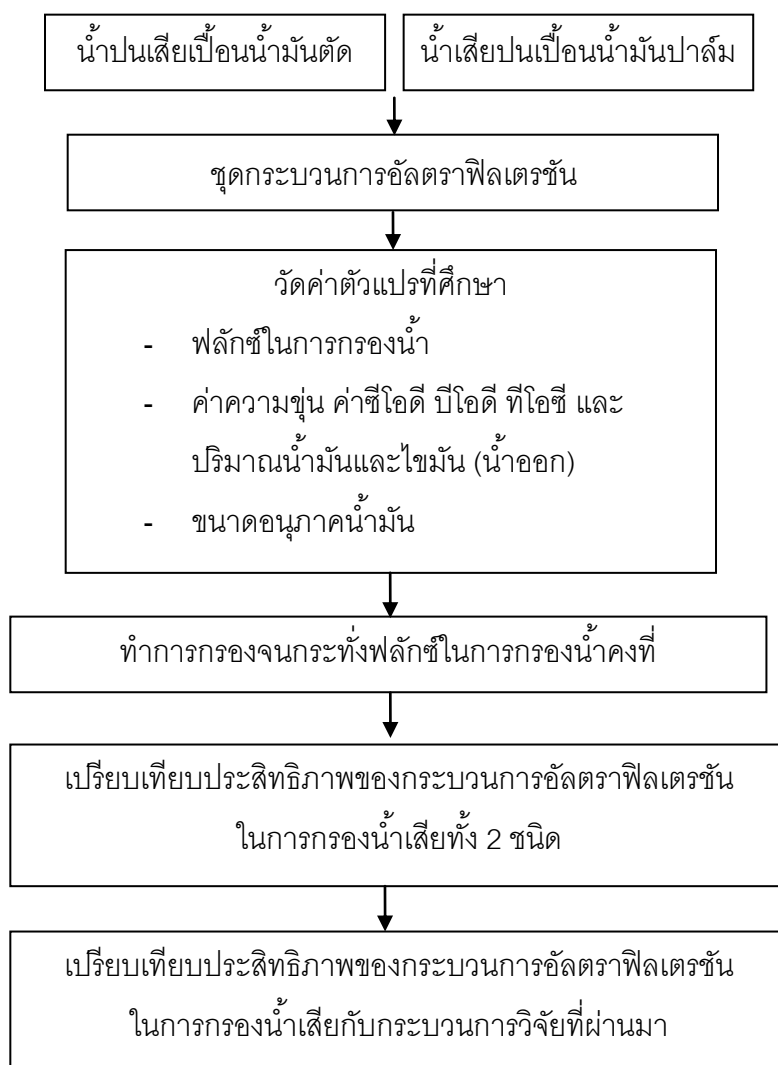
1. เริ่มเดินระบบการกรองโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันโดยทำการกวนน้ำตัวอย่างในถังเตรียมน้ำตัวอย่างตลอดการทดลองจากนั้นสูบน้ำเข้าสู่ชุดอัลตราฟิลเตรชัน
2. เดินระบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยควบคุมความเร็วของน้ำเสียเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที ความดันลดเท่ากับ 2.5 บาร์
3. เดินระบบเพื่อทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ ความดันลดและความเร็วตามขวางตามค่าตัวแปรอิสระ
4. การเดินระบบโดยเก็บตัวอย่างน้ำ วัดปริมาตรน้ำที่กรองตามเวลา และวิเคราะห์ค่าตัวแปรตาม จนกระทั่งฟลักซ์ของการกรองน้ำคงที่ จึงทำการหยุดเดินระบบ
5. นำเมมเบรนที่อุดตันมาทำความสะอาดโดยใช้สารเคมีตามค่าตัวแปรอิสระล่างที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน จากนั้นทำการเดินระบบใหม่จนกระทั่งเมมเบรนเกิดการอุดตันเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของสารทำความสะอาด
6. รวบรวมข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่กรองได้ ได้แก่ ฟลักซ์ในการกรองน้ำ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ซีไอดี บีไอดี ทีไอซี และน้ำมันไขมัน (oil and grease) ของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ตารางที่ 3-5 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
ความดันลวดของน้ำเสีย	อุปกรณ์วัดแรงดัน (Pressure gauge)
ปริมาณของน้ำมันและไขมัน	การสกัดด้วยกรวยแยก (AWWA., 2005)
ขนาดอนุภาคน้ำมัน (d_{oil})	กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)
ค่าซีไอดี	Dichromate Close Reflux Method (AWWA., 2005)
ค่าทีไอซี	เครื่องมือวัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
ค่าบีไอดี	เครื่องวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ
ค่าความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น
ปริมาตรน้ำที่กรองได้	ชั่งน้ำหนักน้ำด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลแบบละเอียด

3.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับกระบวนการทางกายภาพเคมีอื่นๆ

การทดลองที่ 1: ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ในการกรองน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร และน้ำมันปาล์มความเข้มข้น โดยใช้ความเร็วน้ำเสียเท่ากับ เท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที ความดันลดเท่ากับ 2.5 บาร์ ดำเนินการกรองจนกระทั่งฟลักซ์ในการกรองน้ำคั่งที่ โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-6 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

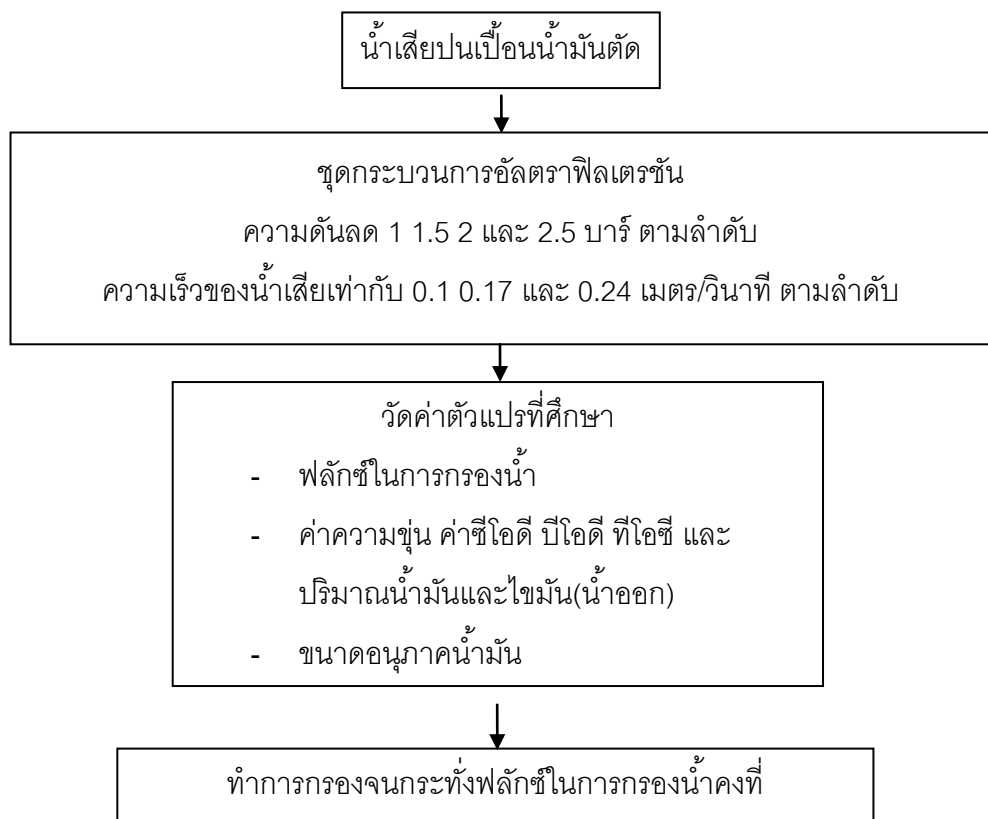
ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของชุดอัลตราฟิลเตรชัน	กว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 21 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร
2. ลักษณะเมมเบรน	วัสดุ Regenerated Cellulose ขนาดรูพรุน 30,000 ดาลตัน พื้นที่ผิว 98 ตารางเซนติเมตร ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ช่วงการทนพีเอช = 2 - 13
3. ความเร็วของน้ำเสีย	0.1 เมตร/วินาที
4. ความดันลด	2.5 บาร์
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวอย่างน้ำ	1. น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 2. น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	ความขุ่น (Turbidity) ค่าซีโอดี (COD) ค่าบีโอดี (บีโอดี) ค่าทีโอดี (TOC) ปริมาณน้ำมันและไขมัน ขนาดของหยดน้ำมัน
2. ค่าฟลักซ์ของการกรองน้ำ	ปริมาตรน้ำที่กรองได้ต่อเวลาในการกรองต่อพื้นที่ผิวของเมมเบรน

3.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

การทดลองที่ 2: ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ในการกรองน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจำนวน 3 ความเข้มข้นได้แก่ 1 10 และ 20 กรัม/ลิตร โดยใช้ความดันลด 1 1.5 2 และ 2.5 บาร์ ตามลำดับ และความเร็วของน้ำเสียเท่ากับ 0.1 0.17 0.24 เมตร/

วินาที ตามลำดับ ดำเนินการกรองจนกระทั่งฟลักซ์ในการกรองน้ำคงที่ โดยตัวแปรในการศึกษา แสดงดังตารางที่ 3-7 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

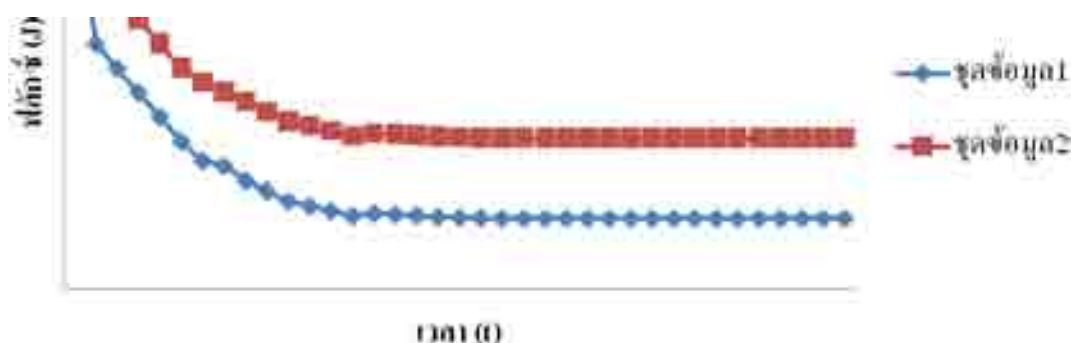
ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของชุดอัลตราฟิลเตรชัน	กว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 21 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร
2. ลักษณะเมมเบรน	วัสดุ Regenerated Cellulose ขนาดรูพรุน 30,000 ดาลตัน พื้นที่ผิว 98 ตารางเซนติเมตร ชนิดชอบน้ำ (Hydrophillic) ช่วงการทนพีเอช = 2 - 13

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (ต่อ)

ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมันตัด	1 10 และ 20 กรัม/ลิตร ตามลำดับ
2. ความเร็วของน้ำเสีย	0.1 0.17 0.24 เมตร/วินาที
3. ความดันลด	1 1.5 2 และ 2.5 บาร์ ตามลำดับ
ตัวแปรตาม	อุปกรณ์ที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	ความขุ่น (Turbidity) ค่าซีโอดี (COD) ค่าบีโอดี (บีโอดี) ค่าทีโอดี (TOC) ปริมาณน้ำมันและไขมัน ขนาดของหยดน้ำมัน
2. ค่าฟลักซ์ของการกรองน้ำ	ปริมาณน้ำที่กรองได้ต่อเวลาในการกรองต่อพื้นที่ผิวของเมมเบรน

ค่าฟลักซ์ของการกรองน้ำสามารถอธิบายได้จากการวัดปริมาณน้ำที่กรองได้ ณ ระยะเวลาในการกรองใดๆ ต่อพื้นที่ผิวของเมมเบรน ซึ่งเมื่อรู้ค่าตัวแปรต่างๆจากการทดลองจะสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ของการกรองน้ำกับเวลาได้ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 ความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ของการกรองน้ำกับเวลา

3.3.3 ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

การทดลองที่ 3-1: ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia มาใช้ในการอธิบายลักษณะการเกิดการอุดตันของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นเค้กที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

จากการทดลอง เมื่อรู้ค่าตัวแปรตามต่างๆ ที่ทำการตรวจวัด พบว่าสามารถนำมาใช้ในการหาค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะการเกิดฟาวลิงของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันได้โดย โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการอุดตันของเมมเบรนซึ่งถูกพัฒนาโดย Hermia (1982) ซึ่งมีภาพแบบดังนี้

1. Complete pore blocking model แบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์
ค่าฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ 3-1

$$\ln(J) = \ln(J_0) - K_b t \quad (3-1)$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ของเพอมีเอทที่เวลาใดๆ (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร.วินาที)
 J_0 = ฟลักซ์ของเพอมีเอทเริ่มต้น (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร.วินาที)
 t = เวลา (วินาที)
 k_b = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์ (วินาที⁻¹)
 จากสมการที่ 3-1 เมื่อนำมา Plot graph ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(J)$ กับ t ทำให้สามารถหาค่า k_b และค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear regression coefficient, R^2) ได้

2. Standard pore blocking model แบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา สมการที่เป็นไปตามแบบจำลองนี้สามารถเสนอได้คือ

$$1/J^{1/2} = 1/J_0^{1/2} + K_s t \quad (3-2)$$

เมื่อ k_s = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา (วินาที⁻¹)

จากสมการที่ 3-2 เมื่อนำมา Plot graph ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/J^{1/2}$ กับ t ทำให้สามารถหาค่า k_s และค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear regression coefficient, R^2) ได้

3. Intermediate pore blocking model แบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ ค่าพลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการดังนี้

$$1/J = 1/J_0 + K_t t \quad (3-3)$$

เมื่อ k_t = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (วินาที⁻¹)
จากสมการที่ 3-3 เมื่อนำมา Plot graph ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/J$ กับ t ทำให้สามารถหาค่า k_t และค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear regression coefficient, R^2) ได้

4. Cake formation model แบบจำลองการเกิดชั้นเค้ก สมการที่เป็นไปตามแบบจำลองนี้สามารถเสนอได้คือ

$$1/J^2 = 1/J_0^2 + K_c t \quad (3-4)$$

เมื่อ k_c = ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิงตามแบบจำลองการเกิดชั้นเค้ก (วินาที⁻¹)
จากสมการที่ 3-4 เมื่อนำมา Plot graph ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/J^2$ กับ t ทำให้สามารถหาค่า k_c และค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear regression coefficient, R^2) ได้

นำค่า r^2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 แบบมาเปรียบเทียบกันเพื่อวิเคราะห์รูปแบบของการอุดตัน ถ้าค่าใดใกล้เคียง 1 มากกว่า จะสามารถอธิบายได้ว่าแบบจำลองชนิดนั้นมีความใกล้เคียงกับภาพแบบการอุดตันของเมมเบรนมากที่สุด ซึ่งทำให้สามารถอธิบายได้ว่าเมมเบรนมีรูปแบบของการอุดตันตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว

การทดลองที่ 3-2: ศึกษาลักษณะการเกิดการอุดตันบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน โดยประยุกต์ใช้สมการการกรองที่ผิวหน้าเพื่ออธิบายความต้านทานจำเพาะของฟิลเตอร์เค้ก (specific cake resistance: α) และแรงต้านทานของฟาวลิง (Fouling Resistance) โดยใช้สมการการกรองที่ผิวหน้าตามสมการที่ 3-5 เมื่อกรองด้วยความดันคงที่ (สาวิตรี จันทรานุกรักษ์, 2546)

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu\alpha C_s}{A^2(-\Delta p)} V + \frac{\mu}{A(-\Delta p)} R = K_p V + B \quad (3-5)$$

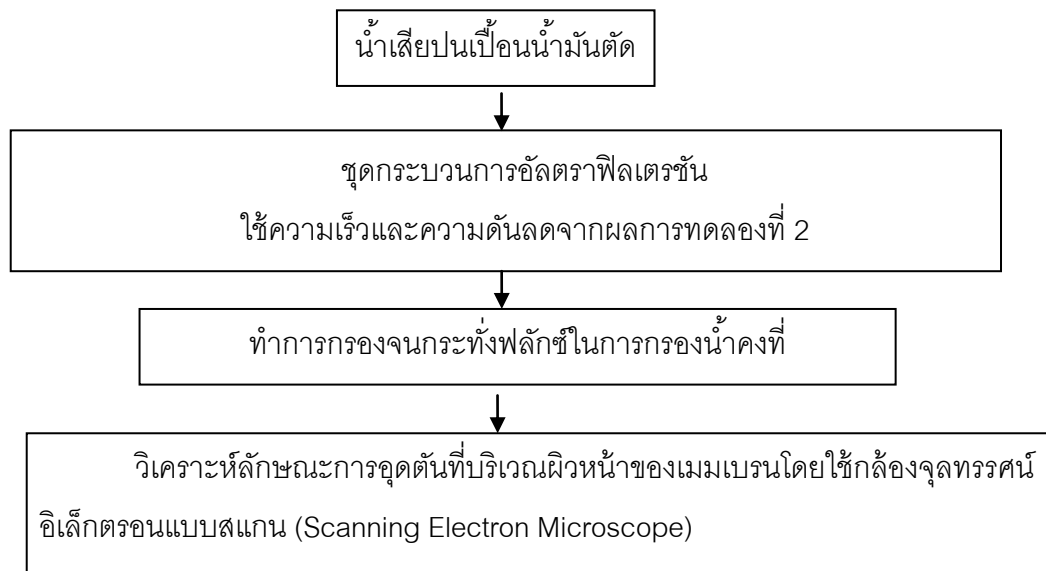
เมื่อ

$$K_p = \frac{\mu\alpha C_s}{A^2(-\Delta p)}$$

$$B = \frac{\mu R}{A(-\Delta p)}$$

จากสมการที่ 3-5 เมื่อนำมา plot graph หาความสัมพันธ์ระหว่าง t/V กับ V จะทำให้สามารถหาค่า R_m และค่า α ได้

การทดลองที่ 3.3: ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน วิเคราะห์ลักษณะการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ สแกน (Scanning electron microscope) เพื่อศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้นจากการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันกรองน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยตัวแปรในการศึกษาแสดง ดังแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 แผนผังการศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

การทดลองที่ 3.4: ศึกษาสมบัติของชั้นเค้กที่สะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน โดยใช้แบบจำลองการลดลงของเพอมีเททของ Hong และคณะ (1997) เพื่อพิจารณาหาค่าความพรุน (ϵ) และความหนา (δ) ของชั้นเค้กที่สะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันที่อยู่บนผิวหน้าของเมมเบรน ได้ดังสมการที่ 3-6 และ 3-8 ตามลำดับ

$$K_0 = -\frac{1}{J_{wi}} \frac{dJ_f}{dt} = \frac{27}{2} \frac{A_s (\theta_{max}) C_0 \Delta P \mu}{R_m^2 a_p^2} \quad (3-6)$$

เมื่อ	J_f	=	ฟลักซ์ในการกรองน้ำของน้ำเสีย (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)
	J_{wi}	=	ฟลักซ์ในการกรองน้ำบริสุทธิ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)
	k	=	ค่าคงที่ของ Boltzmann (เท่ากับ 1.38×10^{-23} กิโลกรัม ตารางเมตร/วินาที ² เคลวิน)
	T	=	อุณหภูมิสมบูรณ์ (เคลวิน)
	A_s	=	ค่าปรับแก้ที่เกิดจากอนุภาคข้างเคียงในชั้นเค้กซึ่งหาได้จากแบบจำลองของ Happel
	θ_{max}	=	ค่า θ สูงสุดเมื่ออนุภาคจัดเรียงตัวแบบมีความพรุนต่ำสุด
	C_0	=	สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคที่เข้าระบบ (Feed particle volume fraction)
	ΔP	=	ความดันลด (นิวตัน/ตารางเมตร)
	a_p	=	รัศมีของอนุภาค (เมตร)
	R	=	μR_m (นิวตันวินาที/เมตร ³), R_m = แรงต้านทานเมมเบรน (เมตร ⁻¹)
	D	=	$\frac{kT}{6\pi(\mu a_p)}$ เมื่อ μ = ความหนืดของน้ำ (นิวตัน วินาที/ตารางเมตร)

สำหรับชั้นเค้กที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันจะเกิดเป็นชั้นเค้กที่สามารถอัดตัวได้ (Compressible Cake) ดังนั้น ค่า $\theta = \theta_{max}$ ค่า ϵ คือค่าความพรุนที่น้อยที่สุดของชั้นเค้ก ซึ่งสามารถหาค่า θ_{max} ได้ดังสมการที่ 4-1

$$A_s = \frac{1 + \frac{2}{3}\theta^5}{1 - \frac{3}{2}\theta + \frac{3}{2}\theta^5 - \theta^6} \quad (3-7)$$

เมื่อ $\theta = (1 - \varepsilon)^{1/3}$, ε = ความพรุนของชั้นเค้ก

Hong และคณะ (1997) ได้อธิบายถึงความหนาของชั้นเค้ก (δ_c) ว่ามีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-13

$$\delta_c = \frac{\pi 4 a_p^3 D}{3 C_c k T A_s (\theta_{\max})} \left(\frac{\Delta P - J_f R_m}{J_f} \right) \quad (3-8)$$

เมื่อแทน $D = \frac{kT}{6\pi(\mu a_p)}$ ในสมการที่ 4-13 จะสามารถหาความหนาของชั้นเค้กได้ดังสมการที่ 4-14

$$\delta_c = \frac{2}{9} \frac{a_p^2}{C_c \mu A_s (\theta_{\max})} \left(\frac{\Delta P - J_f R_m}{J_f} \right) \quad (4-14)$$

3.3.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

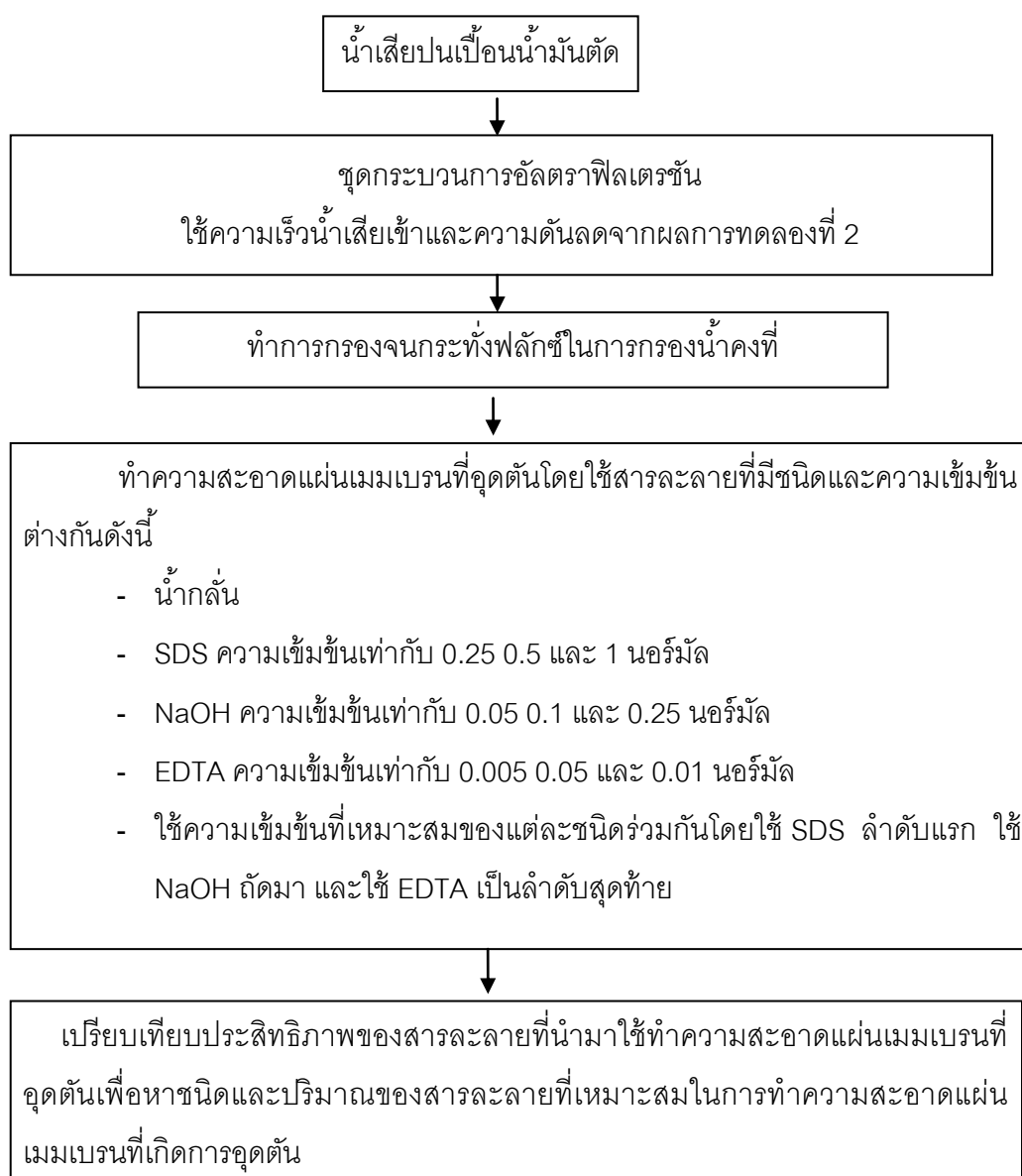
การศึกษความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยศึกษาผลการล้างผิวหน้าของเมมเบรนด้วยสารเคมีที่แตกต่างกันจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ Sodium hydroxide (NaOH) Sodium dodecylsulfate (SDS) และ EDTA และการนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรน

การทดลองที่ 4: ศึกษาผลของปริมาณและชนิดสารละลายที่เหมาะสมสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยใช้สารละลาย 3 ชนิดที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันดังนี้

- น้ำกลั่น
- SDS ความเข้มข้นเท่ากับ 0.25 0.5 และ 1 นอร์มัล
- NaOH ความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 0.1 และ 0.25 นอร์มัล
- EDTA ความเข้มข้นเท่ากับ 0.005 0.05 และ 0.01 นอร์มัล

นำสารละลายใส่ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และนำเมมเบรนผ่านการเดินระบบในสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 จนกระทั่งเกิดการอุดตันมาแช่ลงในสารละลาย

นาน 30 นาที เตินระบบจนอุดตัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสารละลายแต่ละชนิด นำสารเคมีที่มีชนิดและปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง มาศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยพิจารณาค่าฟลักซ์ที่สามารถฟื้นฟูได้ (FR) และค่าประสิทธิภาพการกำจัดแรงต้านทานของเมมเบรน (RR) โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-8 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 แผนผังการทดสอบหาชนิดและปริมาณของสารละลายที่เหมาะสม
สำหรับการทำความสะอาดเมมเบรน

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการศึกษาเพื่อทดสอบหาชนิดและปริมาณของสารละลายที่เหมาะสม
สำหรับการทำความสะอาดเมมเบรน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของชุดอัลตราฟิลเตรชัน 2. ลักษณะเมมเบรน 3. ความเร็วน้ำเสียเข้า 4. ความดันลด	กว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 21 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร วัสดุ Regenerated Cellulose ขนาดรูพรุน 30,000 ดาลตัน พื้นที่ผิว 98 ตารางเซนติเมตร ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ช่วงการทนพีเอช = 2 - 13 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวอย่างน้ำ 2. ชนิดและปริมาณสารละลายที่ใช้ในการ ทำความสะอาดเมมเบรน	1. น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 2. น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 1. น้ำกลั่น 2. SDS ความเข้มข้น 0.25 0.5 และ 1 นอร์มัล 3. NaOH ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.25 นอร์มัล 4. EDTA ความเข้มข้น 0.005 0.05 และ 0.01 นอร์มัล 5. ใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของ SDS NaOH และ EDTA ร่วมกัน
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
ประสิทธิภาพของสารที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรน	1. ค่าฟลักซ์การกรองน้ำ 2. ค่าฟลักซ์ที่สามารถฟื้นฟูได้ (FR) 3. ค่าประสิทธิภาพการกำจัดแรงต้านทานของเมมเบรน (RR)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้จะศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพประสิทธิภาพการบำบัดและสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว รวมทั้งศึกษา ลักษณะของการเกิดฟาวลิง (Fouling) หรือการอุดตันของเมมเบรนโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia (1982) และประยุกต์ใช้สมการการกรองที่ผิวหน้า (Surface filtration equation) ในการอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรน เพื่อเข้าใจถึงกลไกการอุดตันของเมมเบรนตลอดจนศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารเคมี (Chemical washing) เพื่อลดการอุดตันและเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรนจากการนำกลับมาใช้ใหม่

4.1 การศึกษาน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและการประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ในส่วนนี้ เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil) และน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (Palm oil) เพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะโดยทั่วไป และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด เพื่อใช้ในการออกแบบการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

4.1.1 การศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cuttingoil)

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์ที่จะใช้ในการศึกษา จะใช้น้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 1 10 และ 20 กรัม/ลิตร เมื่อผสมน้ำมันตัดกับน้ำประปาจะเกิดเป็นอิมัลชันของน้ำมันตัดที่มีความคงตัว (Stabilized oily emulsion) และทำการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียดังกล่าว โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ (COD) ค่าบีโอดี (BOD) ค่าทีโอซี (TOC) ค่าความหนืด (Viscosity) พีเอช (pH) และขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ซึ่งจะใช้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) เป็นตัวแทน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) สามารถคำนวณได้จากสมการ 4-1

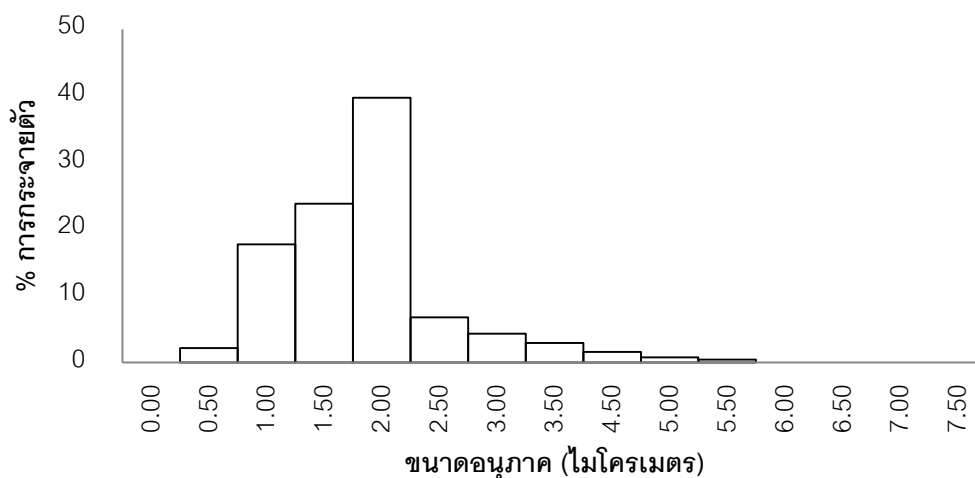
$$D_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (4-1)$$

โดย D_i = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน
 n = จำนวนอนุภาคน้ำมัน

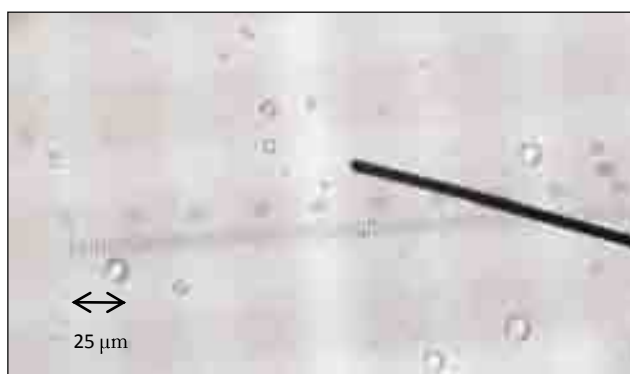
ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-1 และเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของน้ำมันแสดงดังภาพที่ 4-1 จากภาพถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า ลักษณะของอนุภาคน้ำมันแสดงดังภาพที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์		
		1 g/l	10 g/l	20 g/l
ซีโอดี	mg/l	3,914	38,830	51,789
บีโอดี	mg/l	2,542	24,730	32840
ทีโอดี	mg/l	619	5,545	16,780
ความขุ่น	NTU	1,386	12,480	25,420
พีเอช	-	8.02	9.60	9.68
ความหนืด	CP	5.25	5.74	5.91
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean})	μm	1.5	1.5	1.5



ภาพที่ 4-1 เปร็เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์



ภาพที่ 4-2 ภาพถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร

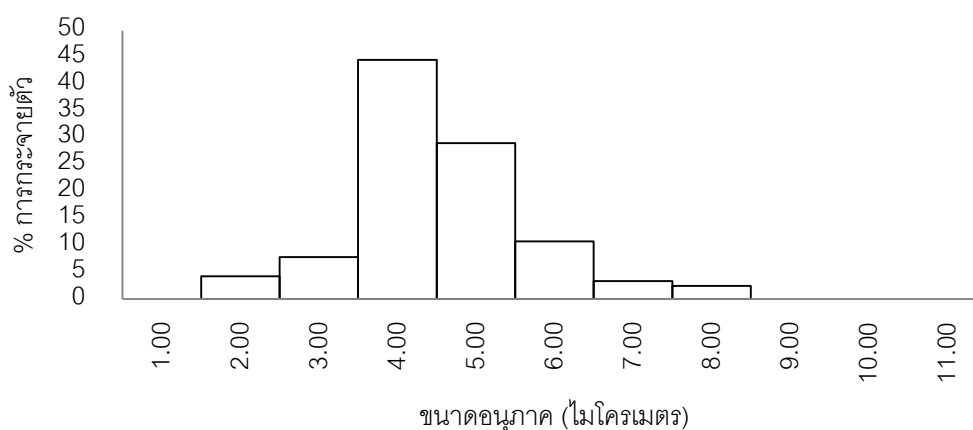
4.1.2 การศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (Palmoil)

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์สามารถเตรียมโดยใช้ น้ำมันปาล์ม ความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร (Ahmad และคณะ, 2006) ร่วมกับ ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ความเข้มข้น 0.008 โมล/ลิตร (กชกร, 2552) เป็นสารลดแรงตึงผิว ประจุลบ เพื่อสร้างอิมัลชันของน้ำมันที่มีความคงตัว (Stabilized oily emulsion) จากนั้นศึกษา ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ โดยศึกษา ค่าซีโอดี (COD) ค่าบีโอดี (BOD) ค่าทีโอซี (TOC) ค่าความหนืด (Viscosity) พีเอช (pH) และขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-2

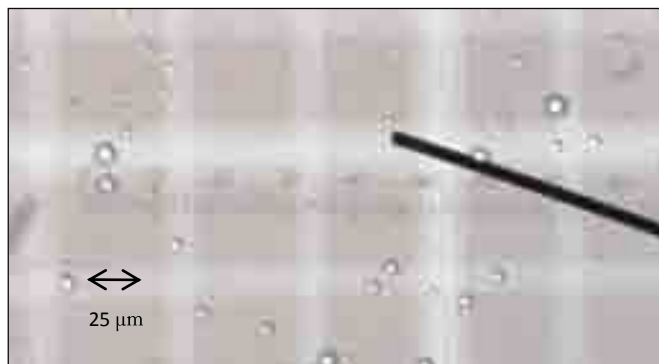
ตารางที่ 4-2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์มสังเคราะห์ ความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร
ซีไอดี	mg/l	21,639
บีไอดี	mg/l	12,289
ทีไอซี	mg/l	985
ความขุ่น	NTU	2938
พีเอช	-	7.4
ความหนืด	CP	19.70
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean})	μm	3.6

เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของน้ำมันแสดงดังภาพที่ 4-3 และจากการถ่ายภาพอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่าพบว่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีอนุภาคขนาด 4 ไมโครเมตรอยู่ถึง 50% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย โดยลักษณะของอนุภาคน้ำมันแสดงดังภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-3 เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์



ภาพที่ 4-4 ภาพถ่ายอนุภาคน้ำมันปาล์มในน้ำเสียความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร

จากการศึกษาสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิดพบว่า เป็นน้ำเสียที่มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีเสถียรภาพสูงทำให้เป็นอิมัลชันชั้นสอง (Secondary emulsion) ส่งผลให้ยากต่อการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพทั่วไป เช่นการตกตะกอนโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก (Aurelle, 1985) จากตารางที่ 4-3 พบว่าการใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้มีประสิทธิภาพสูง แต่พบปัญหาคือ มีกลิ่นเหม็นและใช้เวลาในการเดินระบบนาน ส่วนกระบวนการบำบัดทางกายภาพเคมี เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงถึง 90% แต่มักพบปัญหาเกี่ยวกับสารเคมีตกค้างในระบบ โดยที่การประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรนพบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำกระบวนการเมมเบรนมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรได้ ใช้พื้นที่น้อย และประหยัดเวลาในการเดินระบบ

ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้กระบวนการต่างๆมาใช้น้ำบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ผู้วิจัย	กระบวนการ	ผลการศึกษา
Perez และคณะ (2007)	การหมักอุณหภูมิต่ำ แบบฟูอิคไดซ์ (anaerobic thermophilicfluidizedbed reactor: AFBR)	เมื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดย ใช้ระยะเวลาในการเดินระบบนาน 92 วัน สามารถบำบัดชีโอดีในน้ำเสีย ปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ 67.1 %
Portela และคณะ (2001)	การสังเคราะห์ผลึกสารประกอบ ด้วยสารละลายน้ำภายใต้ อุณหภูมิ และความดันสูง (Hydrothermal synthesis)	การใช้อุณหภูมิต่ำ 300 – 500 องศาเซลเซียส ในการเดินระบบ สามารถบำบัดค่าที่ไอซี ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ 90%
Rios และคณะ (1998)	โคแอกกูเลชัน (Coagulation) โดยเติม $AlCl_3$ และ $CaCl_2$ เป็น สารโคแอกกูแลนต์	การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดย ใช้กระบวนการดังกล่าว พบว่าสามารถ กำจัดความขุ่นได้ 80%
Bensadok และคณะ (2007)	โค แอ ค ก ลู เล ชั น ร ่วม กั บ กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศ ละลาย(coagulation and dissolved air flotation)	การใช้กระบวนการดังกล่าวร่วมกัน บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด สามารถกำจัดความขุ่นได้ 71%และ สามารถบำบัดชีโอดีได้ 29%.
Al-Jeshi และคณะ (2008)	เมมเบรนชนิดรีเวิร์สออสโมซิส ทำจากวัสดุ polyamide	การใช้กระบวนการเมมเบรนบำบัดน้ำเสีย ปนเปื้อนน้ำมัน พบว่ามีประสิทธิภาพใน การบำบัด 99%

4.1.3 การศึกษาชนิดและสมบัติของเมมเบรนเพื่อใช้ในการเดินระบบ

จากผลการศึกษาสมบัติของน้ำเสียตัวอย่างพบว่าน้ำเสียมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1 – 5 ไมโครเมตร และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดของเสียต่างๆ เช่น ไพรตีน อนุภาคของคอลลอยด์ น้ำมัน เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 4-4 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ทำจากวัสดุ Regenerated Cellulose ชนิดชอบน้ำ (Hydrophillic) ทนพีเอชได้ในช่วง 2- 13 และมีขนาดรูพรุน 0.12 ไมโครเมตร ทำให้สามารถกักอนุภาคของน้ำเสียตัวอย่างไม่ให้ผ่านลงไปสู่น้ำเพอมีเททได้

ตารางที่ 4-4 การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ผู้วิจัย	วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน	ขนาดรูพรุน ของเมมเบรน	ชนิดของเสีย ที่นำมาบำบัด
Cho และคณะ (2000)	regenerated cellulose	0.2 ไมโครเมตร	อินทรีย์วัตถุ
Mimoune และคณะ (2007)	Polyethersulfone	0.06 ไมโครเมตร	สารประกอบเชิงซ้อนที่ อยู่ในสารละลายไวนิล คลอไรด์
Hoyo และคณะ (2007)	Polyethersulphone และ Polypropylene	0.4 ไมโครเมตร	เม็ดเลือดในสัตว์
Katsoufidou และคณะ (2008)	regenerated cellulose	0.1-0.2 ไมโครเมตร	กรมฮิวมิค
Kennedy และคณะ (2008)	cellulose acetate	0.45 ไมโครเมตร	อินทรีย์วัตถุที่เป็น คอลลอยด์ (Colloidal organic matter)

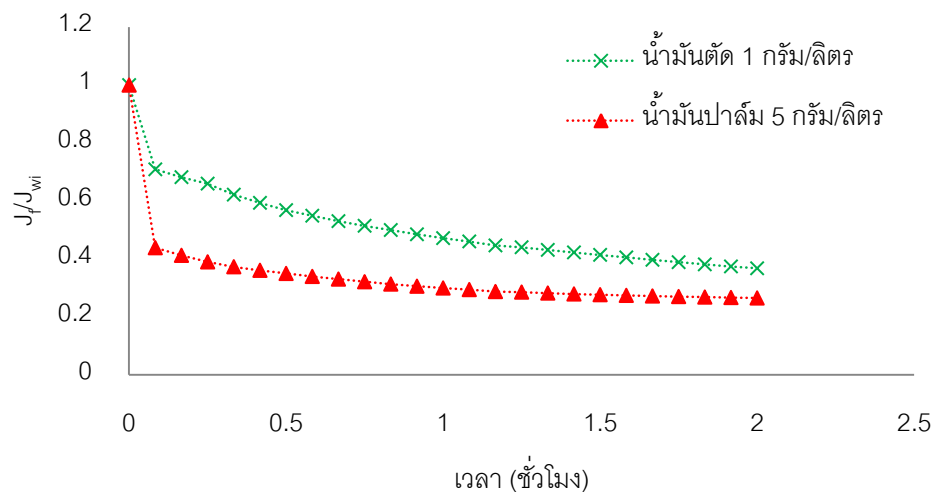
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคของน้ำมันแตกต่างกัน โดยใช้ค่าพลาซึนในการไหลของน้ำเพอเมอที่ผ่านเมมเบรน ความขุ่น ซีไอดี ประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดี ทีไอซี ปริมาณน้ำมันไขมันและขนาดของอนุภาคน้ำมันเป็นตัวแปรในการศึกษา

การศึกษาทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร เริ่มต้นระบบโดยกวนน้ำตัวอย่างในถังเตรียมน้ำตัวอย่างด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที ตลอดการทดลอง จากนั้นเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันโดยควบคุมความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.1 เมตร/นาที ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ ดำเนินการทดลองจนกระทั่งเมมเบรนเกิดการอุดตัน โดยสังเกตได้จากพลาซึนในการกรองน้ำเริ่มคงที่ จากนั้นดำเนินการทดลองต่อจนครบเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำ

การศึกษาฟลักซ์ในการกรองน้ำของเมมเบรนได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ในการกรองน้ำของน้ำเสีย (J_f) กับ ฟลักซ์ในการกรองน้ำบริสุทธิ์ (J_{wi}) เทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ จากผลการทดลองซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-5 พบว่า ฟลักซ์ในการกรองน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในเวลา 15 นาที จากนั้นจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งคงที่ในเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากเมมเบรนเกิดการอุดตัน เมื่อเปรียบเทียบฟลักซ์ในการกรองน้ำของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มพบว่า ให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสูงกว่า เนื่องจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีความหนืดสูงกว่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดส่งผลให้ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำต่ำกว่าเมื่อค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำ (J) สามารถหาได้จากสมการที่ 4-2



ภาพที่ 4-5 ฟลักซ์ในการกรองน้ำของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m} = \frac{V}{t \cdot A} \quad (4-2)$$

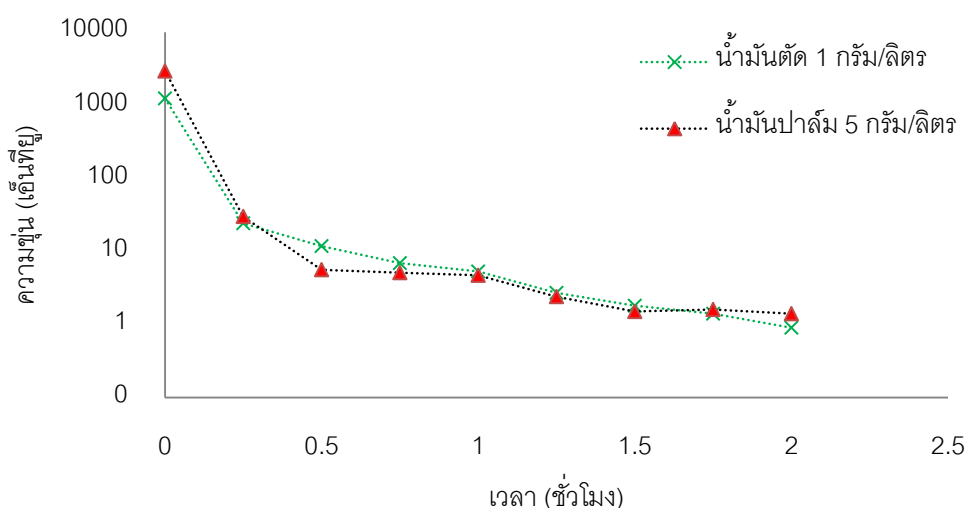
เมื่อ	ΔP	=	ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน (บาร์)
	μ	=	ความหนืด (ปาสคาล.วินาที)
	R_m	=	ความต้านทานของเมมเบรน (เมตร ⁻¹)
	V	=	ปริมาตรของน้ำที่กรองได้ (ลูกบาศก์เมตร)
	t	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (ชั่วโมง)

A = พื้นที่ผิวของเมมเบรน (ตารางเมตร)

4.2.2 การกำจัดความขุ่น

ผลการศึกษาการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มแสดงดังภาพที่ 4-6 จากการศึกษาพบว่าค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลง ตามระยะเวลาในการกรอง โดยในช่วงเริ่มต้นน้ำที่ผ่านการกรองจะมีความขุ่นประมาณ 20 – 30 เอน์ทียูจนกระทั่งเวลาในการเดินระบบผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมง น้ำที่ผ่านการกรองจะเริ่มมีความขุ่นคงที่อยู่ในช่วง 1 – 2 เอน์ทียูซึ่งได้ค่าผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอน์ทียู (World Health Organization, 2006)

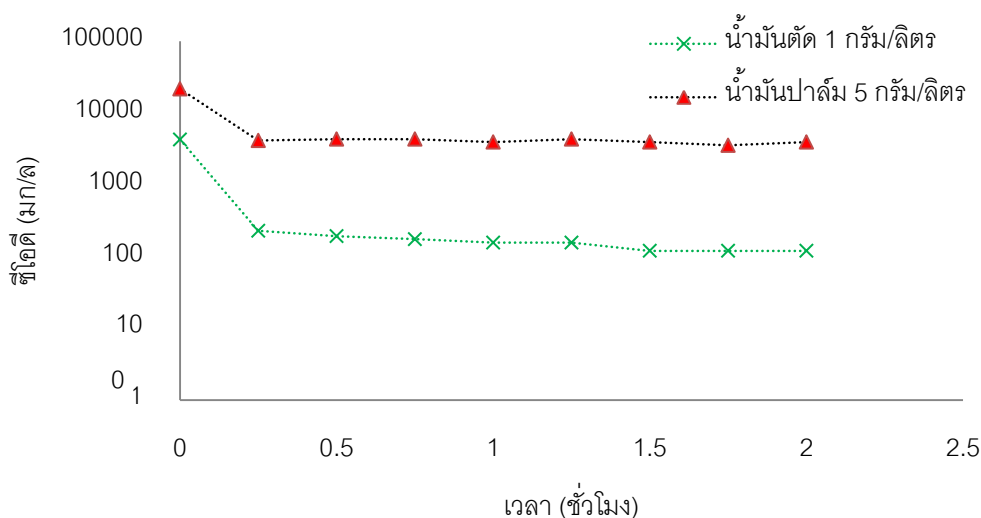
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นระหว่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดพบว่า น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่า เนื่องจากมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าทำให้อนุภาคของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มถูกกักอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนอนุภาคไม่สามารถทะลุผ่านลงสู่ น้ำที่กรองได้ ส่วนอนุภาคน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดมีขนาดเล็ก เมื่อใช้ความดันในการเดินระบบสูง จะทำให้อนุภาคเกิดการบีบอัดตัวและมีโอกาสผ่านเมมเบรนลงสู่ น้ำที่กรองได้ ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจึงต่ำกว่าเล็กน้อย



ภาพที่ 4-6 ความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

4.2.3 การกำจัดซีไอดี

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม พบว่า มีแนวโน้มลดลงในช่วง 15 นาที และเริ่มคงที่ในเวลา 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4-7

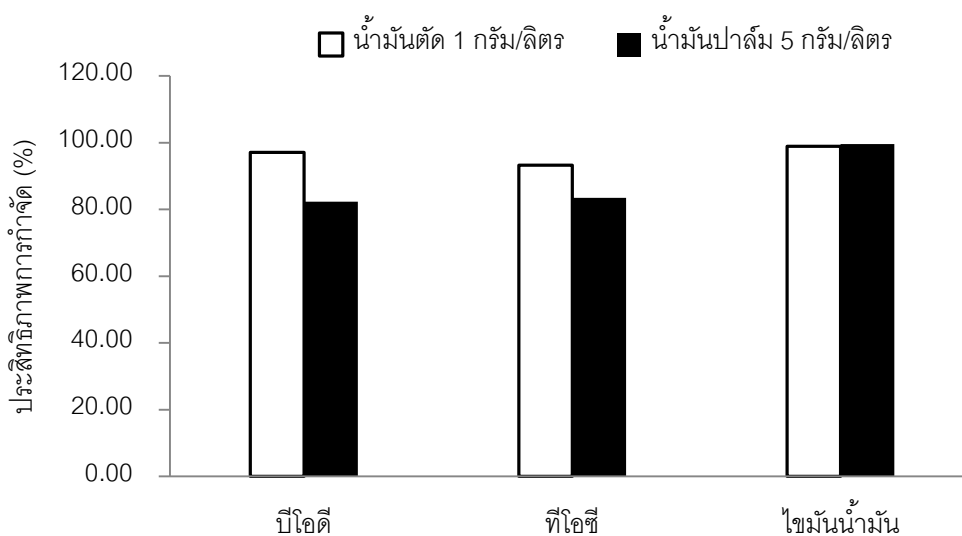


ภาพที่ 4-7 ซีไอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดีพบว่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีสูงกว่าโดยเมื่อใช้ระยะเวลากรอง 2 ชั่วโมงน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจะมีค่าซีไอดีเท่ากับ 120 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีค่าซีไอดีประมาณ 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) เนื่องจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีการเติมสารลดแรงตึงผิว (SDS) ความเข้มข้น 0.008 โมล/ลิตร ลงไปในกระบวนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อสร้างอิมัลชันของน้ำมันที่มีความคงตัว (Stabilized oily emulsion) ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีของ SDS พบว่า SDS มีค่าซีไอดีประมาณ 3500 มิลลิกรัม/ลิตร ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าค่าซีไอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนการบำบัดที่มีค่าสูง น่าจะเป็นผลมาจาก SDS ไหลผ่านเมมเบรนลงสู่น้ำที่กรองได้ทำให้เกิดการปนเปื้อนขึ้นส่งผลให้ค่าซีไอดีสูงขึ้นดังที่กล่าวข้างต้น

4.2.4 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ทีโอดี และปริมาณน้ำมันไขมัน

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ทีโอดี และปริมาณน้ำมันไขมันซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-8 พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า 80% เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีและทีโอดีระหว่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม จะเห็นว่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า เนื่องจากน้ำที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีอนุภาคของ SDS เจือปนอยู่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่า แต่จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันไขมันระหว่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มพบว่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า เนื่องจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมีโอกาสหลุดลอดผ่านรูพรุนของเมมเบรนสูงน้ำที่ผ่านการกรองได้มากกว่าอนุภาคของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันและไขมันมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม เล็กน้อย



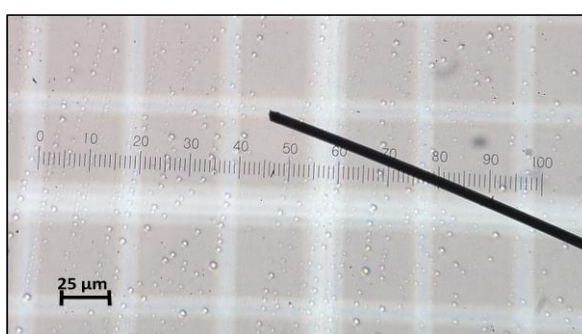
ภาพที่ 4-8 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ทีโอดี และปริมาณไขมันและน้ำมันของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

4.2.5 ขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

จากการศึกษาขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่กรองได้จากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดพบว่า มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.6 ไมโครเมตร และมีปริมาณหยดน้ำมัน 1.54×10^6 หยด/มิลลิลิตร แสดงดังภาพที่ 4-9 ส่วนขนาดอนุภาคน้ำมันของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มเท่ากับ 1 ไมโครเมตร และมีปริมาณหยดน้ำมันเท่ากับ 5.1×10^5 หยด/มิลลิลิตร ดังภาพที่ 4-10 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่ามีอนุภาคของน้ำมันขนาด 0.5 – 1 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนหลุดลอดจากรูพรุนของเมมเบรนลงสู่ท่อเพอมิเอท เนื่องจากเมื่อเดินระบบโดยใช้ความดันสูง จะส่งผลให้อนุภาคของน้ำมันเกิดการอัดตัวและหลุดลงสู่ท่อเพอมิเอท (Belkacem และคณะ, 1993) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม



ภาพที่ 4-9 ภาพถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเพอมิเอทที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน



ภาพที่ 4-10 ภาพถ่ายอนุภาคน้ำมันปาล์มในน้ำเพอมิเอทที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

จากการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดอนุภาคของน้ำมันได้

มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากอนุภาคของหยดน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 และ 3.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรน (0.12 ไมโครเมตร) แต่ไม่สามารถกำจัดอนุภาคของสารลดแรงตึงผิว (SDS) ที่เติมลงไปในการให้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ได้ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีประสิทธิภาพต่ำกว่าจริง

นอกจากนี้จากการศึกษาฟลักซ์ในการกรองน้ำพบว่าเมื่อระยะเวลาในเดินระบบเพิ่มขึ้น ฟลักซ์จะลดลงจนเกิดการอุดตันทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในส่วนของการฟื้นฟูระบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมในการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของฟลักซ์ในการกรองน้ำและลดปัญหาการเกิดการอุดตันของเมมเบรนทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูระบบได้ ซึ่งจะทำให้การศึกษาในหัวข้อถัดไป

4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อระบบอัลตราฟิลเตรชัน ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ ความดันและความเร็วที่ใช้ในการเดินระบบ โดยใช้ค่าฟลักซ์ในการไหลของน้ำเพอมีเอทที่ผ่านเมมเบรน ความขุ่น ซีไอดี ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ทีไอซี และปริมาณน้ำมันไขมัน เป็นตัวแปรในการศึกษา ทั้งนี้จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม พบว่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมี SDS เป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่าจริงและอาจส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์กลไกการทำงานและการทำความสะอาดกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึงเลือกใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเป็นตัวอย่งในการศึกษาเพียงชนิดเดียว

4.3.1 ศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

การทดลองนี้ทำโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันจำนวน 3 ความเข้มข้นได้แก่ 1 10 และ 20 กรัม/ลิตร เริ่มต้นระบบโดยกวนน้ำตัวอย่างในถังเตรียมน้ำตัวอย่างด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที ตลอดการทดลอง จากนั้นเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

โดยใช้ความดันที่แตกต่างกันจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 1 1.5 2 และ 2.5 บาร์ โดยควบคุมความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.1 เมตร/นาที่ ดำเนินการทดลองโดยใช้ระยะเวลาเท่ากับ 2 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการศึกษาศึกษาสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.3.1.1 ค่าพลักซ์ในการกรองน้ำ

ผลการศึกษาพลักซ์ในการกรองน้ำโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่ใช้ในการเดินระบบที่เหมาะสม แสดงดังภาพที่ 4-11 จากการศึกษาพบว่าเมื่อเริ่มเดินระบบพลักซ์ในการกรองน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ และคงที่ในเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากอนุภาคของน้ำเสียเกิดการสะสมตัวบนผิวหน้าของเมมเบรนส่งผลให้พลักซ์ในการกรองน้ำลดลงจนกระทั่งคงที่

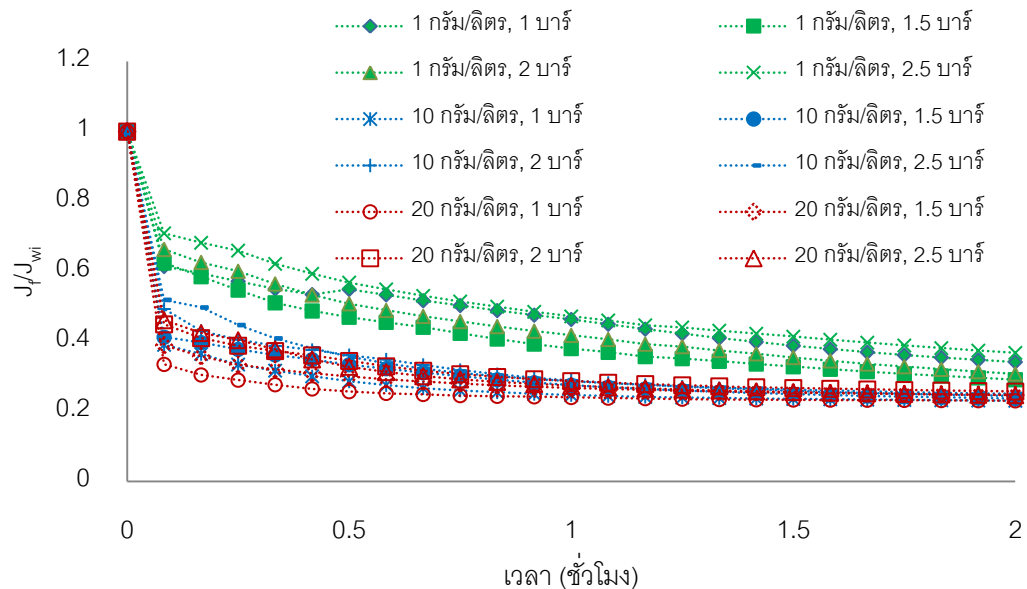
เมื่อเปรียบเทียบพลักซ์ในการกรองน้ำโดยใช้สภาวะการเดินระบบที่แตกต่างกัน พบว่า การเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะทำให้พลักซ์ในการกรองน้ำมีค่าสูงสุด ส่วนการเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร และความดันเท่ากับ 1 บาร์ จะทำให้พลักซ์ในการกรองน้ำมีค่าต่ำสุด ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่า ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าส่งผลต่อพลักซ์ในการกรองน้ำ โดยที่เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าต่ำจะทำให้พลักซ์ในการกรองน้ำสูงกว่าการใช้ความเข้มข้นสูง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อนุภาคของหยดน้ำมันเกิดการสะสมตัวและเกิดเป็นชั้นเค้กที่ผิวหน้าของเมมเบรนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้พลักซ์ในการกรองน้ำลดลงซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4-3 (Hong และคณะ, 1997)

$$\frac{J_f}{J_{wi}} = \left(1 + \frac{3kT A_s (\theta_{\max}) C_0 \Delta P}{2\pi (a_p^3) D R^2} t \right)^{-1/2} \quad (4-3)$$

เมื่อ	J_f	=	พลักซ์ในการกรองน้ำของน้ำเสีย (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)
	J_{wi}	=	พลักซ์ในการกรองน้ำบริสุทธิ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)
	k	=	ค่าคงที่ของ Boltzmann (เท่ากับ 1.38×10^{-23} กิโลกรัม ตารางเมตร/วินาที ² เควิน)
	T	=	อุณหภูมิสมบูรณ์ (เควิน)

A_s	=	ค่าปรับแก้ที่เกิดจากอนุภาคข้างเคียงในชั้นแค้กซึ่งหาได้จากแบบจำลองของ Happel
θ_{\max}	=	ค่า θ สูงสุดเมื่ออนุภาคจัดเรียงตัวแบบมีความพรุนต่ำสุด
C_0	=	สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคที่เข้าระบบ (Feed particle volume fraction)
ΔP	=	ความดันลด (นิวตัน/ตารางเมตร)
a_p	=	รัศมีของอนุภาค (เมตร)
D	=	$\frac{kT}{6\pi(\mu a_p)}$ เมื่อ μ = ความหนืดของน้ำ (นิวตัน วินาที/ตารางเมตร)
R	=	μR_m (นิวตันวินาที/เมตร ³), R_m = แรงต้านทานเมมเบรน (เมตร ⁻¹)

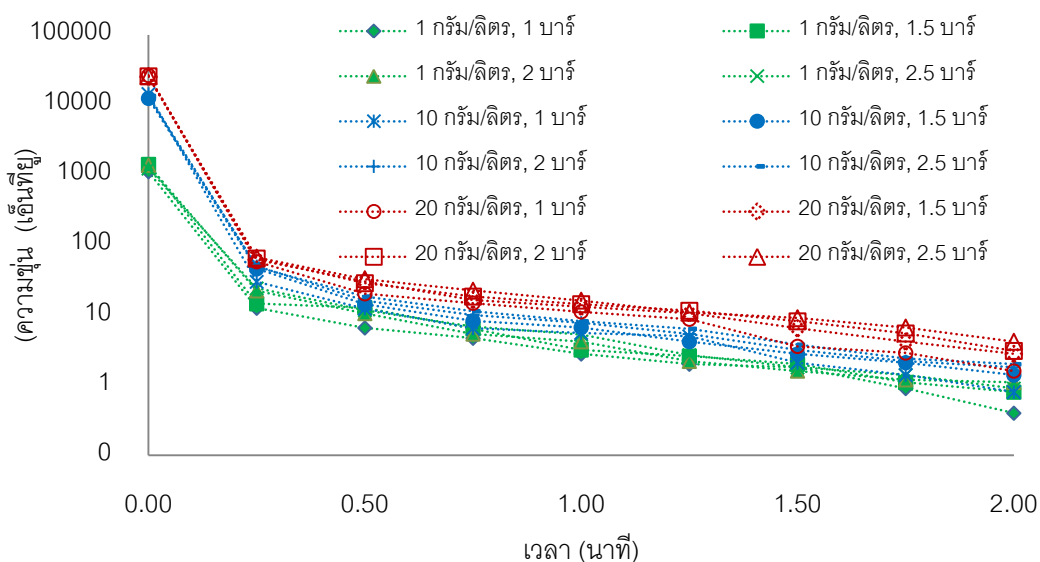
นอกจากนี้เมื่อความดันที่ใช้ในการเดินระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มแรงขับดัน (Driving force) ให้กับระบบ และจากความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ในการกรองน้ำกับความดันดังแสดงในสมการที่ 4-2 พบว่า เมื่อความดันที่ใช้ในการเดินระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-11 ฟลักซ์ในการกรองน้ำเมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

4.3.1.2 การกำจัดความขุ่น

การศึกษากำจัดความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมื่อเดินระบบโดยใช้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าและความดันที่แตกต่าง พบว่า ความขุ่นมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วดังแสดงในภาพที่ 4-12 และพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นมากกว่า 95% เนื่องจากอนุภาคของหยดน้ำมันถูกกักเก็บและสะสมตัวไว้ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ส่งผลให้ น้ำที่กรองได้มีความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู



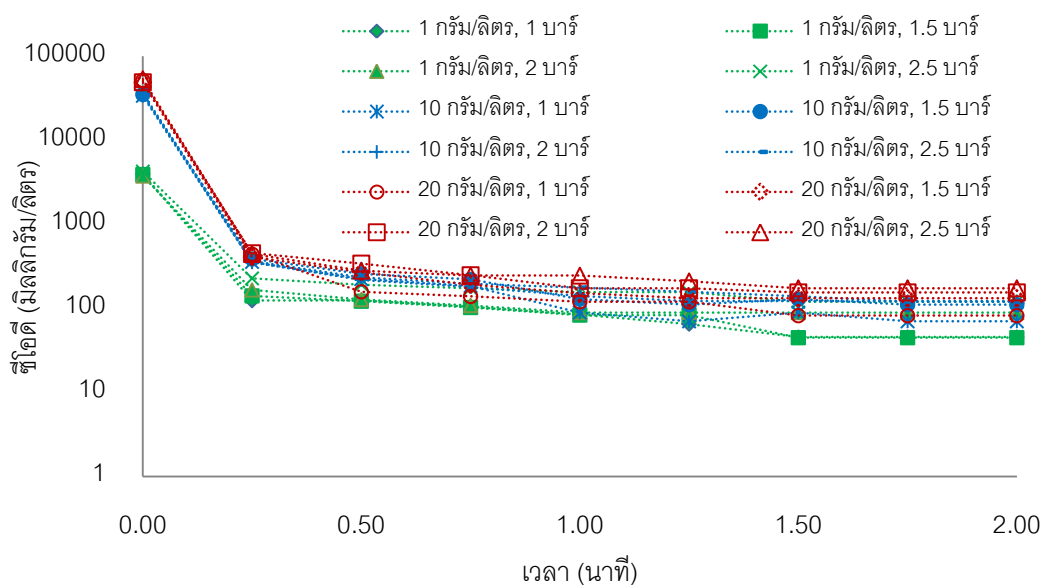
ภาพที่ 4-12 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

การเปรียบเทียบการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 1 บาร์ จะสามารถกำจัดความขุ่นได้สูงที่สุดคือเท่ากับ 0.4 เอ็นทียู และเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะสามารถกำจัดความขุ่นได้ต่ำที่สุด 4.2 เอ็นทียู ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นลดลงเล็กน้อยเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคของหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กหลุดผ่านเมมเบรน

มากขึ้น แต่จากการทดลองพบว่าระบบอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดความขุ่นมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความดันที่ใช้ในการเดินระบบพบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำที่กรองได้มีความขุ่นสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคเกิดการอัดตัวที่ผิวหน้าของเมมเบรน และเกิดการบีบอัดตัวหลุดผ่านรูพรุนของเมมเบรน ทำให้น้ำที่กรองได้มีความขุ่นสูงขึ้น แต่จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความดันน้ำที่กรองได้จะมีความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่ใช้ในการเดินระบบในงานวิจัยนี้ไม่มีอิทธิพลต่อการกำจัดความขุ่นอย่างชัดเจน

4.3.1.3 การกำจัดซีโอติ

การเปรียบเทียบการกำจัดซีโอติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าและความดันที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4-13 จากภาพพบว่าการกำจัดซีโอติมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้เวลาในการเดินระบบ 15 นาที หลังจากนั้นการกำจัดซีโอติจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งคงที่



ภาพที่ 4-13 การกำจัดซีโอติในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

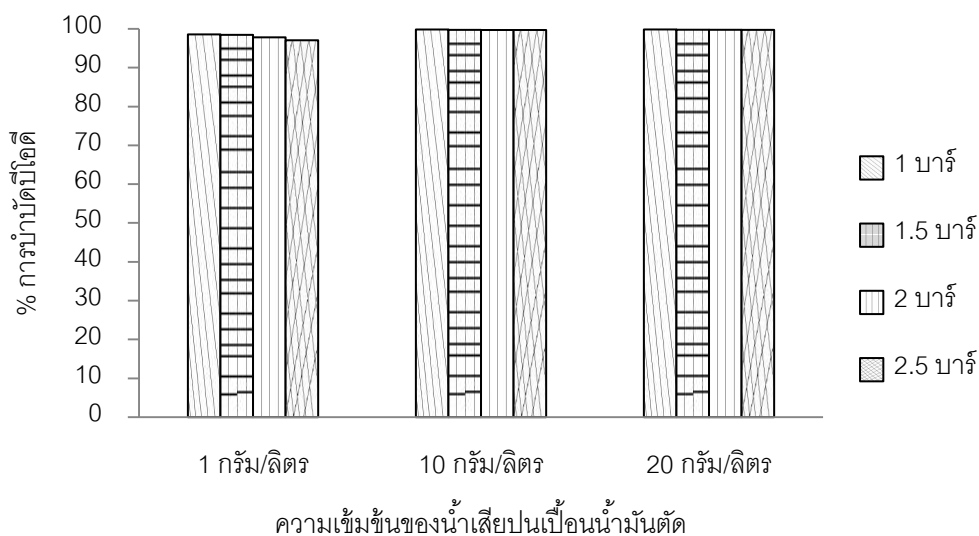
ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน

เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของน้ำเสียที่ใช้ในการเดินระบบ พบว่าเมื่อเดินระบบ โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 1 บาร์ จะสามารถกำจัดซีโอดีได้สูงที่สุดคือเท่ากับ 46 มิลลิกรัม/ลิตร และเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะสามารถกำจัดซีโอดีได้ต่ำที่สุดคือเท่ากับ 174 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้ น้ำที่กรองได้มีค่าซีโอดีเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กหลุดไปกับน้ำที่กรองได้มากขึ้น ทำให้น้ำที่กรองได้มีค่าซีโอดีสูงกว่าน้ำเสียเข้าระบบที่มีความเข้มข้นต่ำ นอกจากนี้เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำที่กรองได้มีค่าซีโอดีเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้ความดันเพิ่มขึ้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สะสมตัวอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนเกิดการอุดตัน และหลุดออกมากับน้ำที่กรองได้ทำให้ค่าซีโอดีเพิ่มสูงขึ้นนอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้นคือเท่ากับ 90 นาที ค่าซีโอดีของน้ำที่กรองได้จะมีค่าลดลงจนผ่านมาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากอนุภาคของหยดน้ำมันจะเกิดการสะสมตัวของอนุภาคที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนจนเกิดเป็นชั้นเค้กทำให้อนุภาคผ่านลงไปใต้น้ำที่กรองได้ลดลงเนื่องจากเกิดกลไกการกรองขึ้นที่ชั้นเค้กซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอาจทำให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำมีค่าลดลงเนื่องจากชั้นเค้กเกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของน้ำเสียและความดันที่ใช้ในการเดินระบบในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อค่าการกำจัดซีโอดีเมื่อใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

4.3.1.4 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าและความดันที่แตกต่างกันพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมากกว่า 95% ดังแสดงในภาพที่ 4-14 และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบและความดันที่ใช้ในการเดินระบบพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 1 บาร์ จะสามารถบำบัดบีโอดีได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับ 99.83 % และเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะสามารถบำบัดบีโอดีได้ประสิทธิภาพต่ำที่สุดเท่ากับ 97.05%

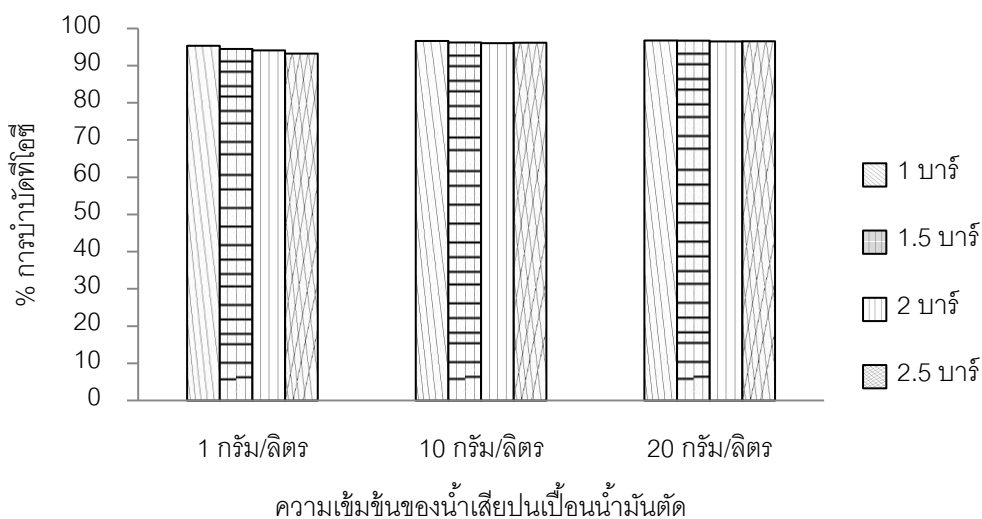


ภาพที่ 4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดปิโตรเลียมในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำและความดันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดปิโตรเลียมจะลดลงเล็กน้อยแต่สูงกว่า 95% ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบกับความดันที่ใช้ในการเดินระบบในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปิโตรเลียม เนื่องจากเมมเบรนที่เลือกใช้สามารถกักเก็บอนุภาคของหยดน้ำมันไม่ให้ทะลุผ่านลงสู่พื้นที่กรองได้ เพราะฉะนั้นการบำบัดปิโตรเลียมจึงมีประสิทธิภาพสูง

4.3.1.5 ประสิทธิภาพการบำบัดที่โอซี

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่โอซีในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าและความดันที่ใช้ในการเดินระบบต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4-15

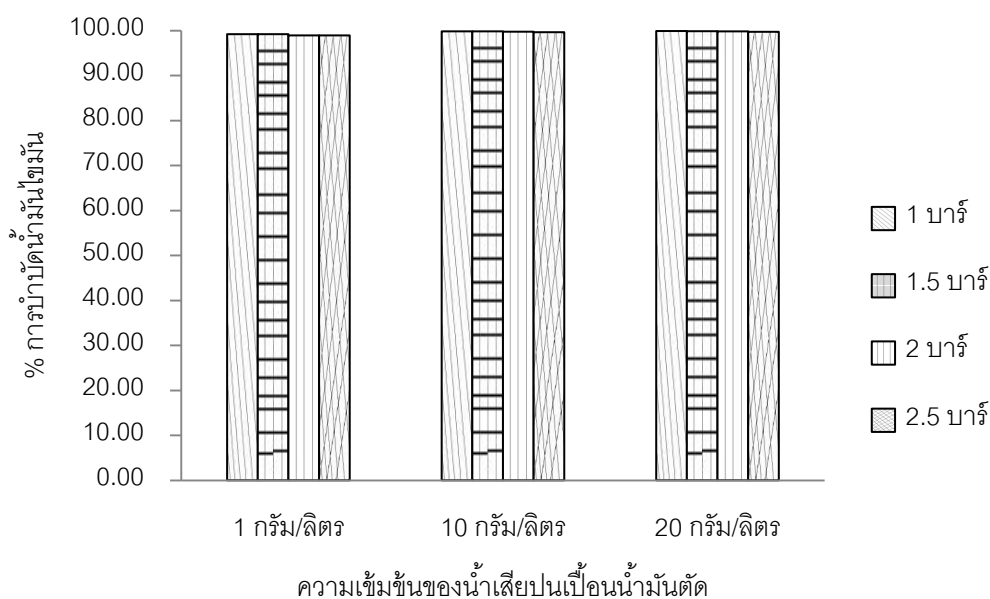


ภาพที่ 4-15 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไอซีในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดประสิทธิภาพที่ไอซีต่ำสุดเท่ากับ 93.21% ส่วนเมื่อเดินระบบโดยใช้ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร และความดันเท่ากับ 1 บาร์ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดประสิทธิภาพที่ไอซีต่ำสุดเท่ากับ 96.73% แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่ไอซีสูงกว่า 95% ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าและความดันที่ใช้ในการเดินระบบไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่ไอซี เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคที่มีของหยดน้ำมันสะสมตัวอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำให้ที่ไอซีที่อยู่บนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้

4.3.1.6 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันไขมัน

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าและความดันที่ใช้ในการเดินระบบต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันไขมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร และใช้ความดันในการเดินระบบ 2 และ 2.5 บาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำที่สุดเท่ากับ 98.91% และเมื่อเดินระบบโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตรและใช้ความดันในการเดินระบบ 1 บาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุดเท่ากับ 99.84% เนื่องจาก เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของเมมเบรนเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำมันและไขมันหลุดลอดผ่านเมมเบรนลงมาได้น้อย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันไขมันของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันไขมันไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของหยดน้ำมันเกิดการบีบอัดตัวและปนเปื้อนลงสู่ น้ำที่กรองได้ แต่ปริมาณการเพิ่มขึ้นจากหยดน้ำมันมีเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำมันไขมันในช่วงเริ่มต้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความดันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันไขมัน

จากผลการศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพ
ฟลักซ์ในการกรองน้ำ	107 ลิตร/ชั่วโมง ตารางเมตร
การกำจัดความขุ่น	99%
การกำจัดซีไอดี	99%
การบำบัดบีไอดี	97%
การบำบัดทีไอซี	93%
การบำบัดน้ำมันและไขมัน	99%

โดยสรุปจากการศึกษาพบว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ แต่ต้องใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมคือมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าขนาดอนุภาคของหยดน้ำมัน นอกจากนี้เมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ชั้นเค้กที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันเกิดการอุดตัน ส่งผลให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาความเร็วที่เหมาะสมต่อการเดินระบบเพื่อเป็นการลดการอุดตันของเมมเบรน ซึ่งจะศึกษาในหัวข้อถัดไป

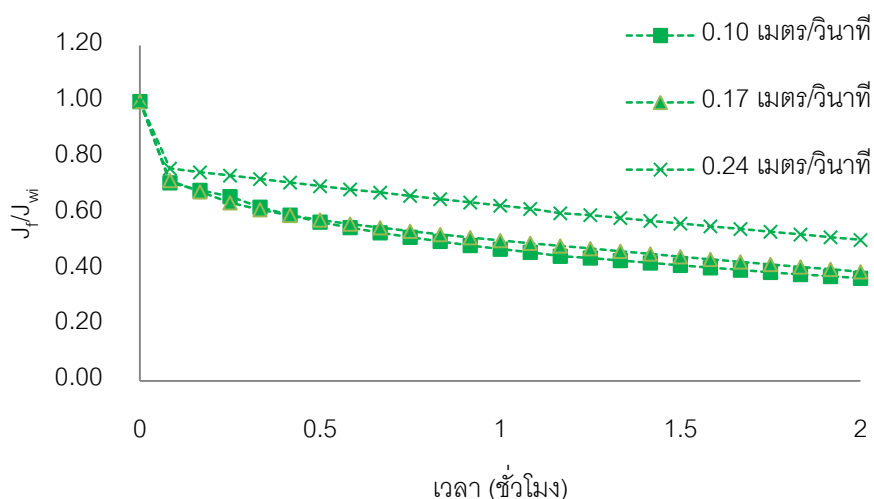
4.3.2 ศึกษาความเร็วตามขวาง (Cross-flow velocity) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

การทดลองนี้ทำโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร เริ่มต้นระบบโดยกวนน้ำตัวอย่างในถังเตรียมน้ำตัวอย่างด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาทีตลอดการทดลอง จากนั้นเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันใช้ควบคุมความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และใช้ความเร็ว

ตามขวางที่ต่างกันจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 0.1 0.17 และ 0.24 เมตร/วินาที ดำเนินการทดลองโดยใช้ระยะเวลาเท่ากับ 2 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการศึกษาศึกษาสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.3.2.1 ค่าพลักซ์ในการกรองน้ำ

ผลการศึกษาค่าพลักซ์ของความเร็วตามขวางที่เหมาะสมต่อพลักซ์ในการกรองน้ำจากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันแสดงดังภาพที่ 4-17 จากการศึกษาพบว่าพลักซ์ในการกรองน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้เวลาในการเดินระบบ 15 นาที หลังจากนั้นพลักซ์ในการกรองน้ำจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากอนุภาคของหยดน้ำมันเกิดการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนทำให้น้ำสามารถผ่านไปได้อย่างยากและเกิดการอุดตันส่งผลให้พลักซ์ในการกรองน้ำคงที่เวลา 2 ชั่วโมง



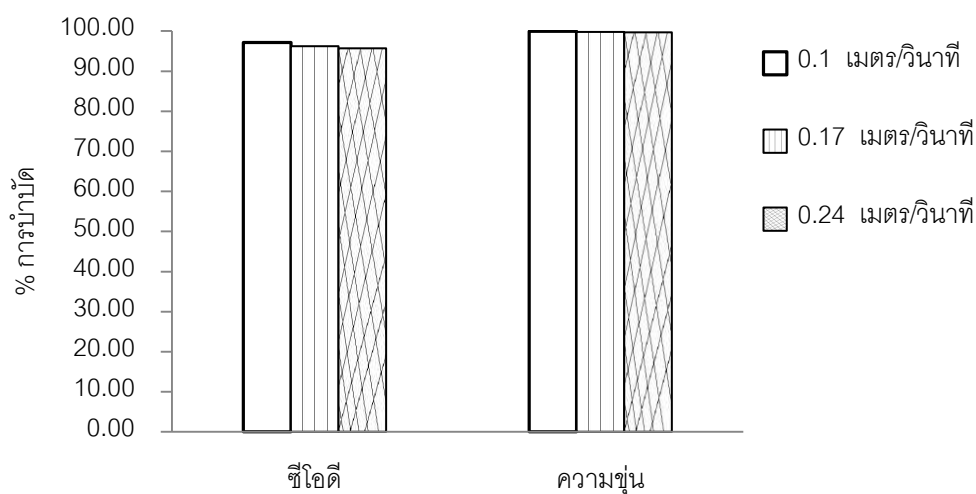
ภาพที่ 4-17 พลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

จากการศึกษาความเร็วที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที จะทำให้พลักซ์ในการกรองน้ำมีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที จะทำให้พลักซ์ในการ

กรองน้ำมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลเข้าระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Belkacem, M. และคณะ (1993) ได้ศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณความสมดุลของฟลักซ์ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.01 ไมโครเมตร พบว่า เมื่อความเร็วสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของเมมเบรนมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาสมการที่ 4-2 พบว่า เมื่อค่าความต้านทานของเมมเบรนลดลงจะทำให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำจึงมีค่าสูงขึ้น

4.3.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และความขุ่น

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4-18



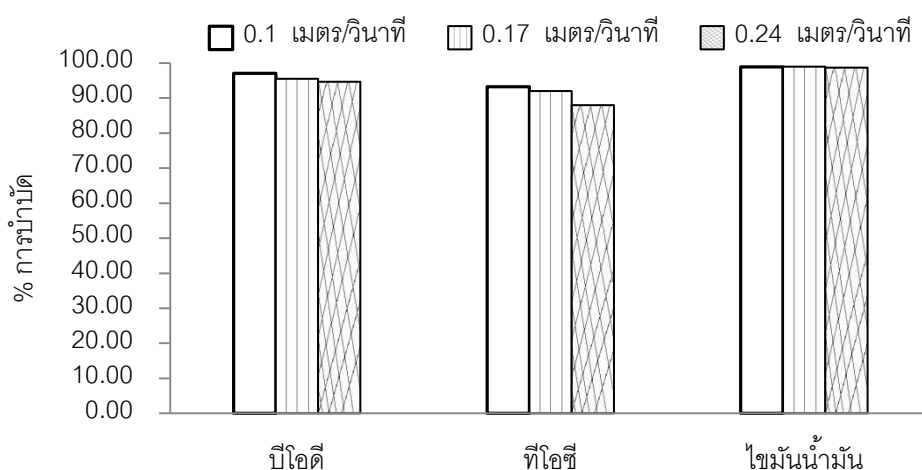
ภาพที่ 4-18 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและความขุ่นในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

จากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ความเร็วในการเดินระบบเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีสูงที่สุดเท่ากับ 97.18% ส่วนเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็ว

เท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีต่ำที่สุดเท่ากับ 95.67% นอกจากนี้จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นเมื่อใช้ความเร็วในการเดินระบบต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเท่ากับ 99% เนื่องจากเมมเบรนสามารถกักเก็บอนุภาคของหยดน้ำมันไม่ให้หลุดผ่านเมมเบรนมาได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเร็วที่ใช้ในการเดินระบบอาจไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและความขุ่น

4.3.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดีทีไอซีและน้ำมันไขมัน

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดี ทีไอซี และน้ำมันไขมันของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4-19 จากการศึกษาพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วตามช่วงเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดบีไอดี ทีไอซี และน้ำมันไขมันสูงที่สุดเท่ากับ 97.05% 93.21% และ 98.91% ตามลำดับ ส่วนเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วตามช่วงเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดบีไอดี ทีไอซี และน้ำมันไขมันต่ำที่สุดเท่ากับ 94.64% 87.93% และ 98.64% ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณอนุภาคของหยดน้ำมันไหลเข้าระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้หยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กที่สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนหลุดลงสู่น้ำ ที่กรองได้ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (Belkacem และคณะ, 1993)



ภาพที่ 4-19 ประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดี ทีไอซีและน้ำมันไขมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

โดยสรุปจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ ความดันและความเร็วตามขวางที่ใช้ในการเดินระบบที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็วเท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ในการศึกษาี้ควรเลือกใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบอัลตราฟิลเตรชันต่ำ เดินระบบโดยใช้ความดันและความเร็วสูงจะทำให้ระบบอัลตราฟิลเตรชันสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และในกรณีที่น้ำเสียที่เข้าระบบมีความเข้มข้นสูงมากจะทำให้ระบบเกิดการอุดตันได้ง่าย ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ และฟลักซ์ในการกรองน้ำต่ำ จึงควรมีการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ก่อนที่จะนำน้ำเสียเข้าระบบ เพื่อเป็นการลดปัญหาการอุดตันของเมมเบรนและเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของระบบอัลตราฟิลเตรชัน

นอกจากนี้จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนจนก่อตัวเกิดเป็นชั้นเค้ก (Cake Formation) จะช่วยดักจับอนุภาคของน้ำมันที่มีขนาดเล็กทำให้ลดการหลุดลอดลงสู่น้ำที่บำบัดได้ แต่พบว่าชั้นเค้กที่เกิดขึ้นจะทำให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำลดลง และเกิดการอุดตันเร็วขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการเกิดฟาวลิง (Fouling) เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการอุดตันของเมมเบรนตลอดจนนำมาเป็นแนวทางในการศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนในการศึกษาขั้นต่อไป

4.4 ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

ในส่วนนี้ เป็นการวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia อธิบายลักษณะการอุดตัน รวมทั้งประยุกต์ใช้สมการการกรองที่ผิวหน้า (Surface Filtration Equation) เพื่อศึกษากลไกการอุดตันของเมมเบรน ได้แก่ ความต้านทานจำเพาะของฟิลเตอร์เค้ก (Specific cake resistance: α) และแรงต้านทานของฟาวลิง (Fouling Resistance) ตลอดจนวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM) เพื่ออธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้นจากการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันกรองน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

4.4.1 การศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia

การศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia ทำโดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากความสัมพันธ์ของฟลักซ์ที่ได้จากการกรองน้ำกับเวลาที่ใช้ในการเดินระบบที่ได้จากการศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ในหัวข้อที่ 4.3 มาอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนซึ่งแบ่งลักษณะการอุดตันเป็น 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia (Hermia, 1982)

สมการ	แบบจำลอง
$\ln(J_f) = \ln(J_{wi}) - K_b t$	การอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Complete pore blocking)
$1/J_f^{1/2} = 1/J_{wi}^{1/2} + K_s t$	การอุดตันแบบธรรมดา (Standard pore blocking)
$1/J_f = 1/J_{wi} + K_t t$	การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (Intermediate pore blocking)
$1/J_f^2 = 1/J_{wi}^2 + K_c t$	การเกิดชั้นเค้ก (Cake formation)

เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้กับสมการจากตารางที่ 4-6 จากนั้นหาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear regression coefficient, R^2) จากแต่ละชุดการทดลอง และเมื่อนำค่า r^2 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 แบบมาเปรียบเทียบกัน โดยที่ถ้าค่าใดใกล้เคียง 1 มากกว่า จะสามารถอธิบายได้ว่าแบบจำลองชนิดนั้นมีความใกล้เคียงกับภาพแบบการอุดตันของเมมเบรนมากที่สุด ซึ่งทำให้สามารถอธิบายได้ว่าเมมเบรนมีรูปแบบของการอุดตันตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว

4.4.1.1 ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงเมื่อเดินระบบด้วยความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่แตกต่างกันโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia

การศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อเดินระบบภายใต้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน ทำโดยใช้ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาฟลักซ์ในการกรองน้ำเมื่อผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1

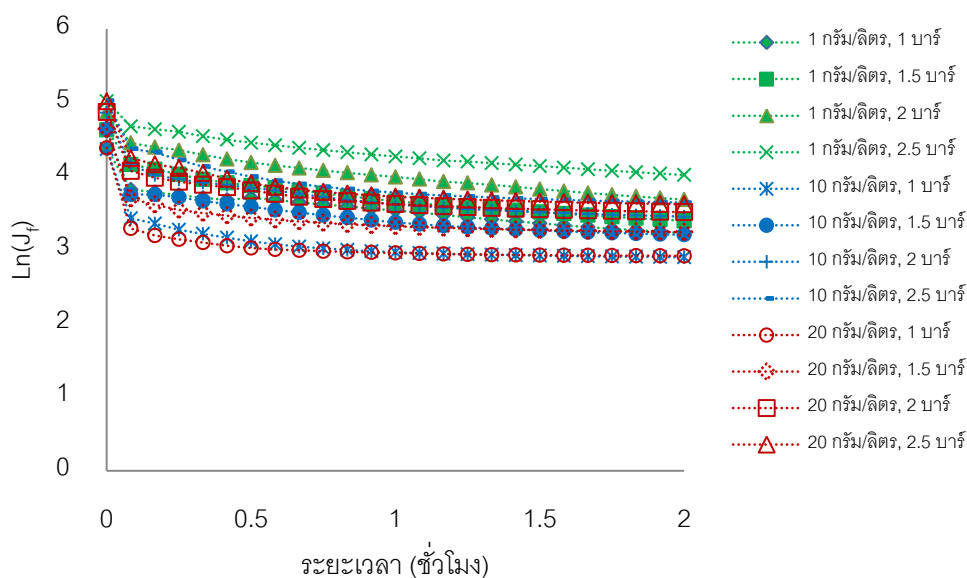
เมตร/วินาที ดังแสดงในภาพที่ภาพที่ 4-11 มาวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia ทั้ง 4 ชนิด ซึ่งสามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 การเปรียบเทียบค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองของ Hermia อธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

ความเข้มข้นของ น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความดัน (บาร์)	ค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองของ hermia ทั้ง 4 แบบ			
		Complete pore blocking	Standard pore blocking	Intermediate pore blocking	Cake formation
1 กรัม/ลิตร	1	0.830	0.895	0.938	<u>0.968</u>
	1.5	0.853	0.916	0.958	<u>0.994</u>
	2	0.892	0.942	0.974	<u>0.993</u>
	2.5	0.895	0.937	0.967	<u>0.994</u>
10 กรัม/ลิตร	1	0.494	0.595	0.687	<u>0.816</u>
	1.5	0.662	0.774	0.860	<u>0.956</u>
	2	0.697	0.798	0.874	<u>0.960</u>
	2.5	0.697	0.782	0.849	<u>0.932</u>
20 กรัม/ลิตร	1	0.335	0.414	0.497	<u>0.645</u>
	1.5	0.456	0.557	0.654	<u>0.805</u>
	2	0.593	0.695	0.782	<u>0.897</u>
	2.5	0.618	0.708	0.787	<u>0.890</u>

- แบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Complete pore blocking model)

แบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์จะใช้อธิบายลักษณะการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนค้างอยู่บริเวณผิวของเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณทางเข้ารูพรุนแบบไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งการอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนด้วยแบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์ จะทำโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่าโดยใช้สมการของแบบจำลองตามตารางที่ 4-6 จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(J_t)$ กับ t หาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นและวิเคราะห์หาค่า R^2 ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4-20



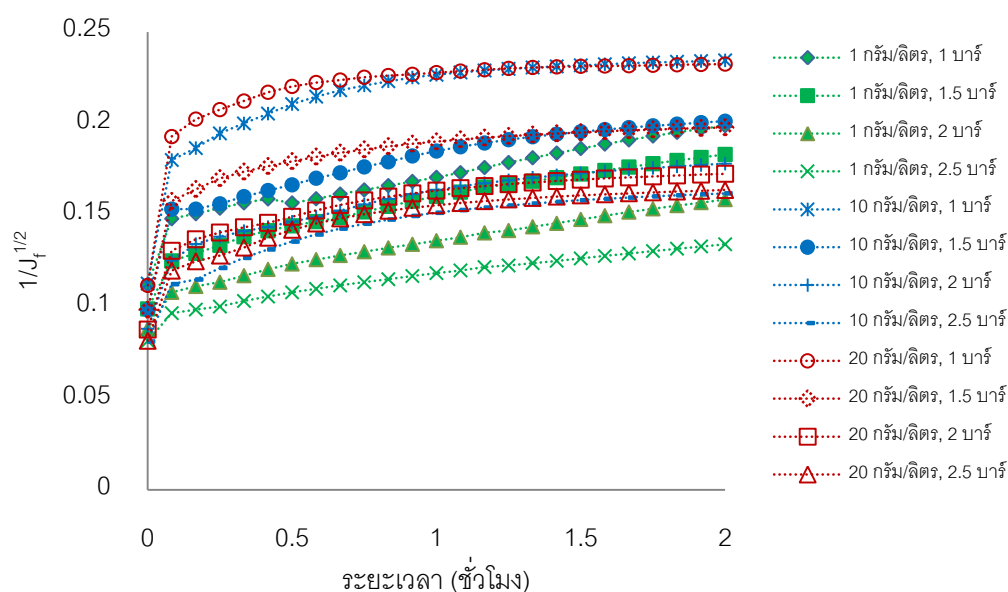
ภาพที่ 4-20 การวิเคราะห์หาค่าการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองกับการใช้แบบจำลองในการอธิบายการลดลงของฟลักซ์พบว่าโดยการอุดตันอย่างสมบูรณ์เกิดจากการที่อนุภาคของหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนค้างอยู่บริเวณผิวของเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณทางเข้ารูพรุนทำให้น้ำไม่สามารถผ่านได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าฟลักซ์ในการกรองน้ำจะลดลงจนคงที่ ดังนั้นจึงพบว่าแบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์ไม่สามารถใช้ในการอธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการอุดตันอย่างสมบูรณ์ได้ เนื่องจากเมื่อเมมเบรนเกิดการอุดตันแต่ฟลักซ์ในการกรองน้ำยังคงไหลได้แบบคงที่ นอกจากนี้จากตารางที่ 4-7 พบว่า เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะมีค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.895 ดังนั้นจึงอาจสามารถอธิบายได้ว่า

เมื่อใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำและเดินระบบโดยใช้ความดันสูง อาจทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอนุภาคของหยดน้ำมันที่สะสมตัวที่ผิวหน้าของเมมเบรน จะเกิดการบีบอัดตัวแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำลดลง

- แบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา (Standard pore blocking model)

การศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนด้วยแบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา ซึ่งแสดงการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจาก มีอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน ผ่านรูพรุนได้ แต่มีบางส่วนที่ตกค้างและถูกดูดซับด้วยเมมเบรน ทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนเพียงเท่านั้น แต่ไม่เกิดการสะสมบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน จะทำโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่าโดยใช้สมการของแบบจำลองตามตารางที่ 4-6 จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง $1/J_f^{1/2}$ กับ t หาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นและวิเคราะห์ค่า R^2 ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4-21



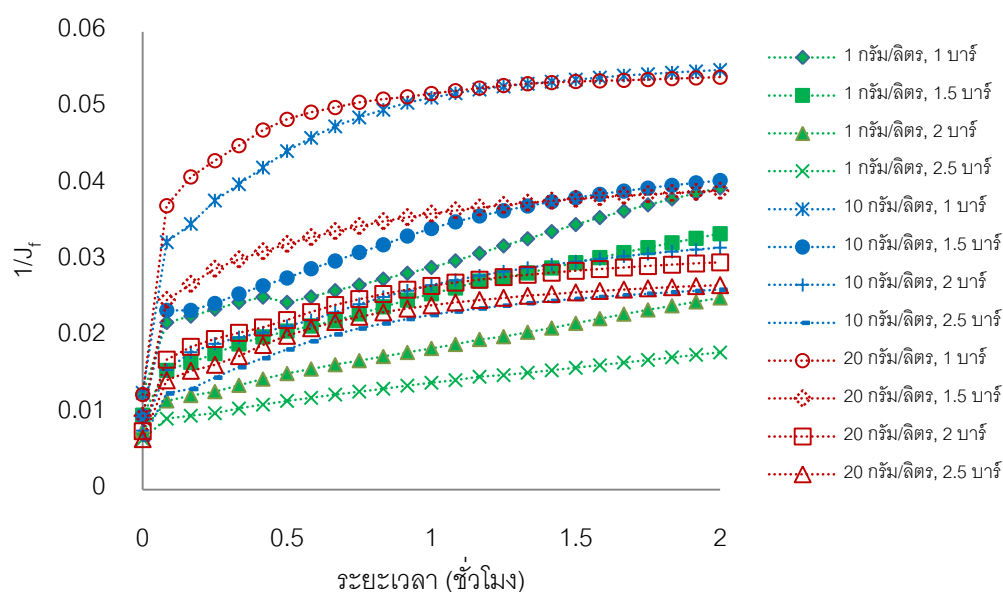
ภาพที่ 4-21 การวิเคราะห์หลักเกณฑ์การอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการอุดตันแบบธรรมดา

การอุดตันแบบธรรมดาจะเกิดขึ้นเนื่องจากมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนหลุดลอดผ่านรูพรุนไปได้ แต่มีบางส่วนที่ตกค้างและถูกดูดซับด้วยเมมเบรน ทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนเพียงเท่านั้น แต่ไม่เกิดการสะสมบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนส่งผลให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำมีค่าลดลง แต่จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคของน้ำมันมีขนาดใหญ่กว่า

ขนาดรูพรุนของเมมเบรนจึงทำให้แบบจำลองชนิดนี้อาจไม่สามารถนำมาใช้อธิบายลักษณะการอุดตันที่เกิดขึ้นได้ดีนักและจากตารางที่ 4-7 พบว่า เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 2 บาร์ จะมีค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.942 ดังนั้นจึงอาจสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำและเดินระบบโดยใช้ความดันสูง อาจมีโอกาทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Salahi และคณะ, 2010) เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอนุภาคของหยดน้ำมันอาจเกิดการอัดตัวจนทำให้อนุภาคของหยดน้ำมันเสียสภาพเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนส่งผลให้อนุภาคเข้าไปติดค้างภายในรูพรุนของเมมเบรน

- แบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (Intermediate pore blocking model)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยแบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์แสดงการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากเกิดการสะสมของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนในระยะเวลาสั้นหรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งอนุภาคสามารถซ้อนทับกันได้ แสดงดังภาพที่ 4-22 ซึ่งสามารถทำโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่าโดยใช้สมการของแบบจำลองตามตารางที่ 4-6 จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง $1/J_t$ กับ t เพื่อหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นและวิเคราะห์ค่า R^2



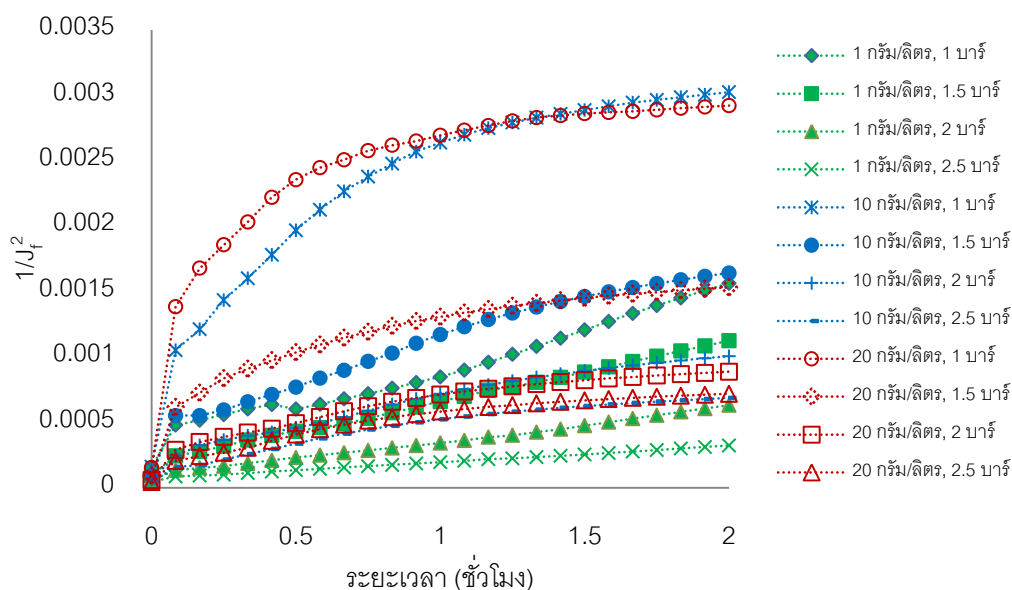
ภาพที่ 4-22 การวิเคราะห์การอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์

การอธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์พบว่าอาจไม่สามารถใช้อธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้นจากการใช้เมมเบรนบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีนักแต่อาจมีความใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองการอุดตันแบบสมบูรณ์ เพราะการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคของหยดน้ำมันที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุนของเมมเบรน เกิดการสะสมในระยะเวลาอันยาวนานหรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งอนุภาคสามารถซ้อนทับกันได้

จากตารางที่ 4-7 พบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 2 บาร์ จะมีค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.974 ทำให้อาจสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำและเดินระบบโดยใช้ความดันสูง อาจมีโอกาสทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอนุภาคของหยดน้ำมันอาจเกิดการอัดตัวจนทำให้อนุภาคของหยดน้ำมันเสียสภาพเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนส่งผลให้อนุภาคและเมมเบรนไม่สามารถกักอนุภาคของหยดน้ำมันได้ ทำให้อนุภาคของหยดน้ำมันหลุดสู่น้ำที่กรองได้ส่งผลให้ฟลักซ์ในการกรองน้ำมีค่าลดลง

- แบบจำลองการการเกิดขึ้นเค้ก (Cake formation model)

การศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยแบบจำลองการอุดตันแบบชั้นเค้กเค้ก ซึ่งแสดงการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้ ทำให้เกิดขึ้นฟิล์มขึ้น แสดงดังภาพที่ 4-23 ซึ่งสามารถทำได้โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่าโดยใช้สมการของแบบจำลองตามตารางที่ 4-6 จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง $1/J_f^2$ กับ t เพื่อหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นและวิเคราะห์ค่า R^2



ภาพที่ 4-23 การวิเคราะห์หกลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการเกิดชั้นเค้ก

การอธิบายกลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการเกิดชั้นเค้ก พบว่าสามารถใช้อธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้เหมาะสมมากกว่าแบบอื่นเนื่องจาก แบบจำลองชนิดนี้ได้อธิบายกลไกการเกิดการอุดตันแบบชั้นเค้กว่าเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคของหยดน้ำมันมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรน ทำให้หยดน้ำมันไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้ และจากตารางที่ 4-7 พบว่า เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะมีค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.994 ทำให้อาจสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำและเดินระบบโดยใช้ความดันสูง จึงทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันแบบชั้นเค้ก เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อแรงต้านทางการเกิดชั้นฟิล์มคือ การเสียสภาพของอนุภาคหยดน้ำมันและการบีบอัดตัวของชั้นฟิล์มเนื่องจากความหนา โดยที่การเสียสภาพของหยดน้ำมันจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของชั้นเค้กทำให้ความต้านทานในชั้นเค้กสูงขึ้นและฟลักซ์ในการกรองน้ำลดลง (Hong และคณะ, 1997)

โดยสรุปจากการวิเคราะห์หกลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia อธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที พบว่าการอุดตันของเมมเบรนเป็นแบบการเกิดชั้นเค้ก ซึ่งเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคเกิดการสะสมตัวอยู่

ที่บริเวณผิวหนังของเมมเบรนมากขึ้น ส่งผลให้การอุดตันของเมมเบรนมีลักษณะเป็นแบบชั้นเค้ก ทำให้สามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้ง่าย เนื่องจากการอุดตันแบบชั้นเค้ก เกิดจากการที่อนุภาคสะสมตัวอยู่ที่ผิวหนังของเมมเบรน สามารถทำความสะอาดได้โดยวิธีการล้างผิวหนังของเมมเบรนได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกรวดเร็ว (Kazemimoghadam และ Mohammadi, 2007)

4.4.1.2 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วที่ส่งผลต่อลักษณะการเกิดฟาวลิงของเมมเบรน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia

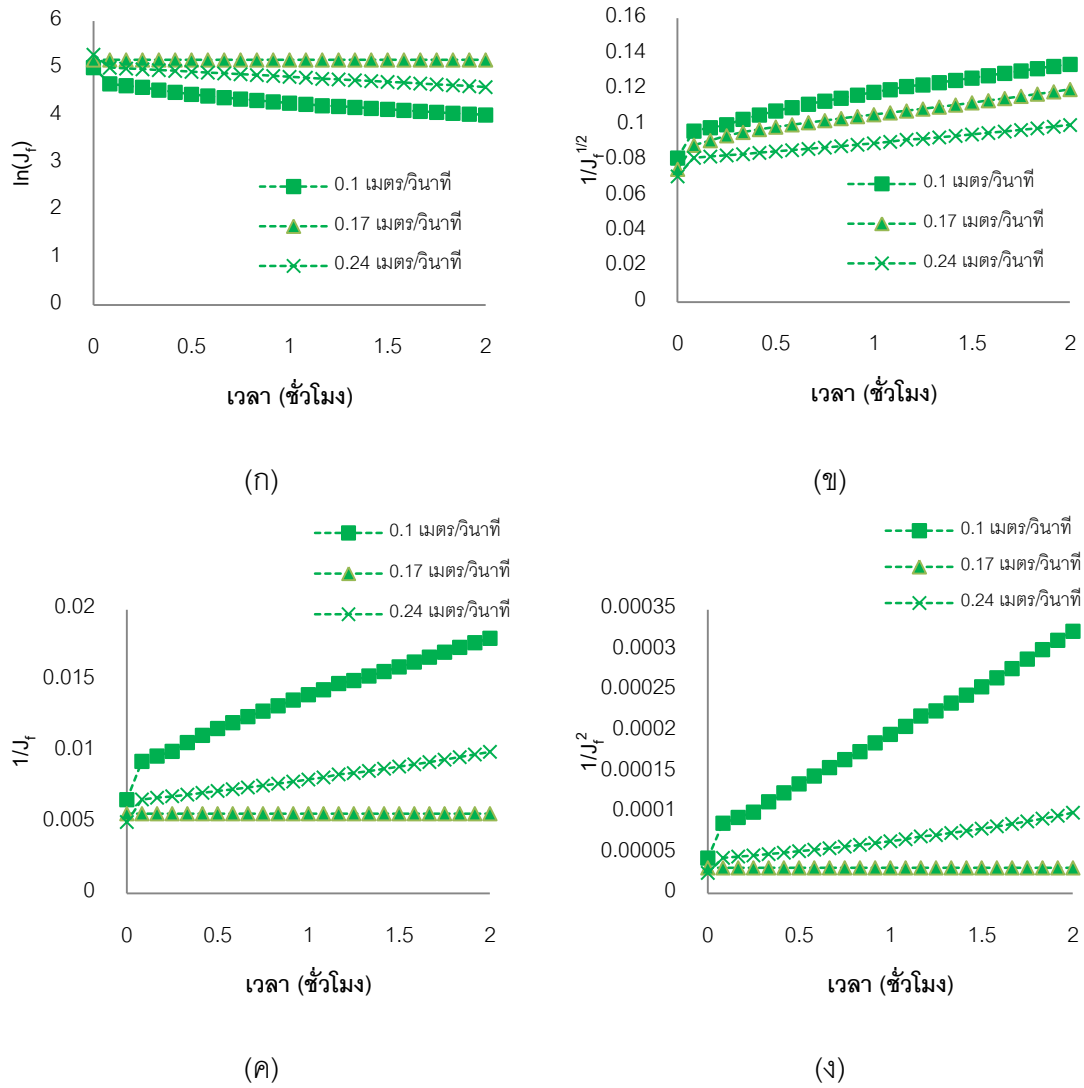
การศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อเดินระบบภายใต้ความเร็วตามขวางที่แตกต่างกันทำโดยใช้ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาฟลักซ์ในการกรองน้ำเมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ ดังแสดงในภาพที่ 4-17 มาวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia ทั้ง 4 ชนิด โดยนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นในแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4-6 (ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-24) เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้มากที่สุดและนำค่าดังกล่าวมาหาค่าคงที่ของแบบจำลองการเกิดการอุดตัน โดยตัดสินจากค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear regression coefficient, R^2) ซึ่งสามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 การเปรียบเทียบค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองของ Hermia อธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัด ภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

ความเร็ว (เมตร/นาที่)	ค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองของHermiaทั้ง 4 แบบ			
	Complete pore blocking	Standard pore blocking	Intermediate pore blocking	Cake formation
0.1	0.895	0.937	0.967	<u>0.994</u>
0.17	0.874	0.919	0.952	<u>0.983</u>
0.24	0.905	0.933	0.953	<u>0.973</u>

ผลการวิเคราะห์การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia อธิบายอิทธิพลของความเร็วที่ส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความดัน 2.5 บาร์ ใช้ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร และใช้ความเร็วที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.1 0.17 และ 0.24 เมตร/วินาที แสดงดังภาพที่ 4-24 และวิเคราะห์ค่า R^2 ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-8 จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับการอุดตันที่เกิดจากการทดลองมากที่สุดคือแบบจำลองการเกิดชั้นเค้กโดยเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วเท่ากับ 0.1 0.17 และ 0.24 เมตร/วินาที จะมีค่า R^2 ของแบบจำลองการเกิดชั้นเค้กสูงที่สุด คือเท่ากับ 0.994 0.983 และ 0.973 ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าเมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้นการอุดตันยังคงเป็นการอุดตันแบบการเกิดชั้นเค้ก เนื่องจากเมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มปริมาณอนุภาคของหยดน้ำมันที่เข้าระบบจะส่งผลให้อนุภาคของหยดน้ำมันเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของเมมเบรน อัตราการแพร่กลับของอนุภาคจะลดลง ทำให้เกิดชั้นเค้กขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้น พลั๊กซีในการกรองน้ำในช่วงท้ายมีค่าสูงชันกว่าเมื่อใช้ความเร็วตามขวางต่ำ เนื่องจากเมื่อความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคที่เกิดการสะสมตัวเกิดการเคลื่อนที่ส่งผลให้การสะสมของอนุภาคลดลงและความต้านทานการไหลลดลง ทำให้พลั๊กซีในการกรองน้ำมีค่าสูงชันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4-2 อย่างไรก็ตามอนุภาคของหยดน้ำมันอาจจะเกิดการอุดตันเป็นแบบธรรมดาหรือแบบไม่ธรรมดาได้ตามค่า R^2 ที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นจึงควรควบคุมความเร็วตามขวางให้มีค่าที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการทำความสะอาด อีกทั้งยังเป็น การลดการหลุดลอกของอนุภาคของหยดน้ำมันทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น



ภาพที่ 4-24 การวิเคราะห์กลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลอง (Salahi และคณะ, 2010)

- (ก) การอุดตันอย่างสมบูรณ์
- (ข) การอุดตันแบบธรรมดา
- (ค) การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์
- (ง) การเกิดชั้นเค้ก

จากผลการศึกษากลไกการอุดตันของเมมเบรนที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ ความดัน และความเร็วตามขวางที่แตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia ทั้ง 4 ชนิด พบว่ากลไกการอุดตันของเมมเบรนเป็นการอุดตันแบบชั้นเค้ก เนื่องจากเมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าขนาดของอนุภาคหยดน้ำมัน ส่งผลให้อนุภาคของหยดน้ำมันถูกกักเก็บและสะสมตัวอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนทำให้เกิดเป็นชั้นเค้กขึ้น ซึ่งการอุดตันชนิดนี้สามารถฟื้นฟูเมมเบรนให้กลับมาใช้งานใหม่ได้ง่ายกว่าการอุดตันชนิดอื่น โดยที่วิธีการทำความสะอาดอาจใช้น้ำสะอาดหรือสารเคมีในการล้างทำความสะอาด ซึ่งจะทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป

4.4.2 การศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงโดยประยุกต์ใช้สมการการกรองที่ผิวหน้า

การศึกษากลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยประยุกต์ใช้สมการการกรองที่ผิวหน้าเพื่ออธิบายความต้านทานจำเพาะของฟิลเตอร์เค้ก (specific cake resistance: α) และแรงต้านทานของฟาวลิง (Fouling Resistance) ทำโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ในหัวข้อที่ 4.3 มาอธิบายกลไกการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้น ซึ่งทำโดยการนำข้อมูลมาคำนวณวิเคราะห์หาค่า α และ ความต้านทานรวม (R) โดยใช้สมการการกรองที่ผิวหน้าตามสมการที่ 4-4 เมื่อกรองด้วยความดันคงที่ (สาวิตรี จันทรานุรักษ์, 2546)

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu\alpha C_s}{A^2(-\Delta p)} V + \frac{\mu}{A(-\Delta p)} R = K_p V + B \quad (4-4)$$

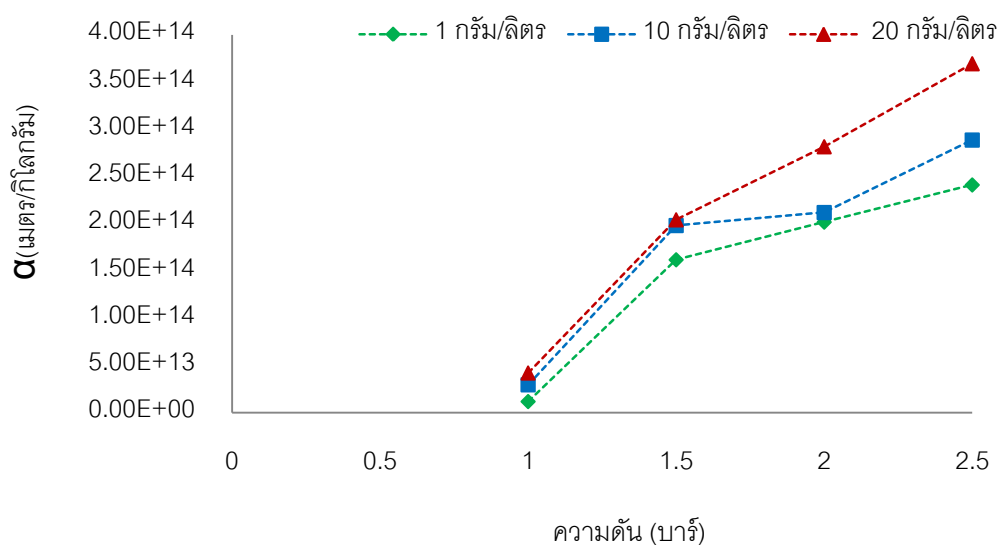
เมื่อ
$$K_p = \frac{\mu\alpha C_s}{A^2(-\Delta p)}$$

$$B = \frac{\mu R}{A(-\Delta p)}$$

จากสมการที่ 4-4 เมื่อนำมา plot graph หาความสัมพันธ์ระหว่าง t/V กับ V จะทำให้สามารถหาค่า R_m และค่า α ได้

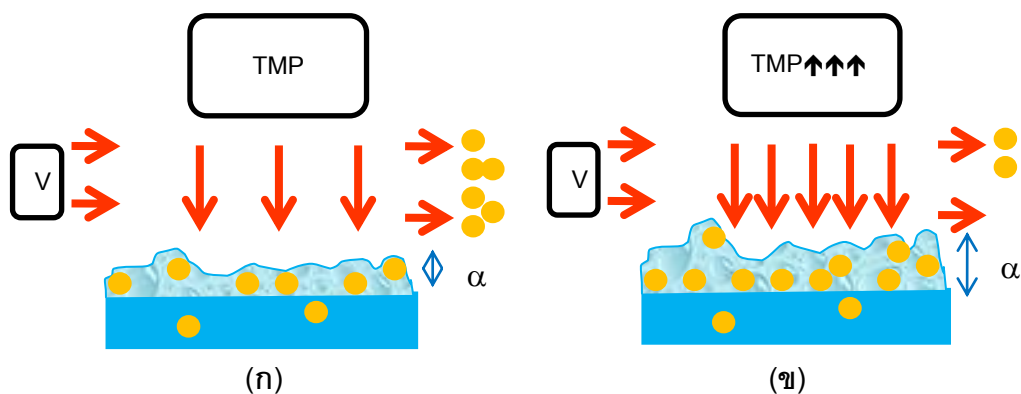
4.4.2.1 ความต้านทานจำเพาะของฟิลเตอร์เค้ก (specific cake resistance: α)

ผลการวิเคราะห์ของค่า α แสดงดังภาพที่ 4-25 จากการศึกษพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร ใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะทำให้ค่า α มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3.7×10^{14} เมตร/กิโลกรัม และเมื่อเดินระบบโดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ใช้ความดันเท่ากับ 1 บาร์ จะทำให้ค่า α มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.2×10^{13} เมตร/กิโลกรัม ดังนั้นจากผลการศึกษสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความดันและความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า α เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของหยดน้ำมันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของหยดน้ำมันเกิดการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้นทำให้ชั้นเค้กมีความหนามากขึ้น ส่งผลให้ค่า α เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

นอกจากนี้เมื่อความดันที่ใช้ในการเดินระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคของหยดน้ำมันที่สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนเกิดการบีบอัดตัวเนื่องจากมีแรงอัดมากกระทำส่งผลให้มีรูปร่างเปลี่ยนไป ทำให้มวลอนุภาคที่เกาะกันอยู่นั้นแตกออก และอนุภาคเป็ดตัวเข้าซิดกันมากขึ้นดังภาพที่ 4-26



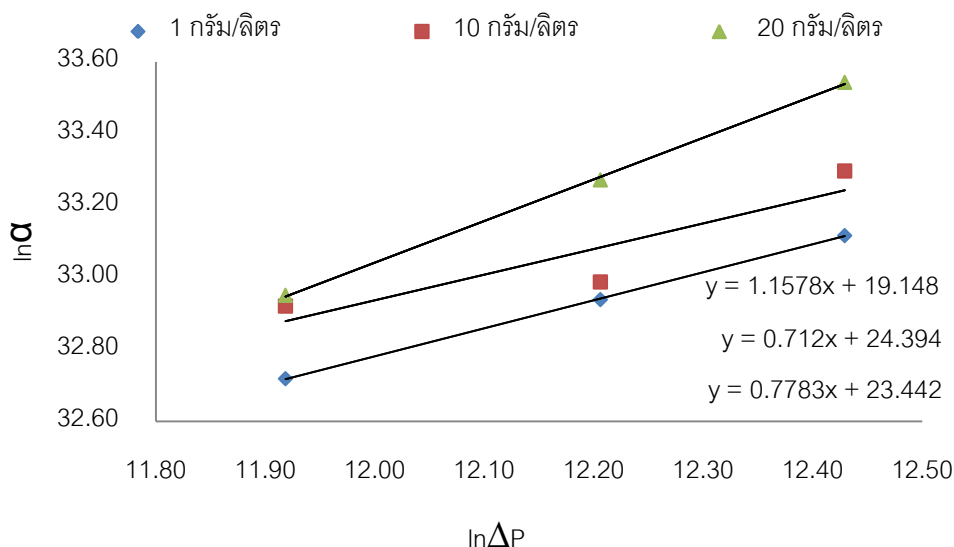
ภาพที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α ความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน
(ก) เมื่อเดินระบบโดยใช้ความดันต่ำ (ข) เมื่อเดินระบบโดยใช้ความดันสูง

จากผลการศึกษาพบว่าชั้นเค้กที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเมมเบรนเป็นเค้กที่อัดตัวได้ (Compressible Cake) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัดที่กระทำต่อชั้นเค้กอาจจะทำให้อนุภาคมีรูปร่างเปลี่ยนไป ทำให้มวลอนุภาคที่เกาะกันอยู่นั้นแตกออก และอนุภาคเบียดตัวเข้าชิดกันและกันมากขึ้นโดยที่ค่า α จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของความดันที่เพิ่มขึ้น (สาวิตรี จันทรานุกรักษ์, 2546) ดังสมการที่ 4-5 เมื่อ α_0 และ S_0 เป็นความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้กที่ไม่ขึ้นกับความดันโดยรวมของระบบ (Reynolds, 1996)

$$\alpha = \alpha_0 (\Delta P)^{S_0} \quad (4-5)$$

เมื่อ α_0 = ความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้กที่สภาวะเริ่มต้น
 S = สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวได้ (compressibility coefficient) ของชั้นเค้ก
 ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้น ถ้าเค้กอัดตัวได้ง่ายขึ้น โดยที่สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวนี้จะมีค่าเป็น 0 สำหรับสำหรับชั้นเค้กที่อัดตัวไม่ได้ และมีค่าเข้าสู่ 1 เมื่อการอัดตัวมีค่าสูงขึ้น

เมื่อเทค ln ที่สมการที่ 4-4 จะได้ความสัมพันธ์คือ $\ln \alpha = S \ln(\Delta P) + \ln \alpha_0$ จากนั้นนำมา plot graph หาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ ΔP จะได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 4-27 และทำให้สามารถหาค่า α_0 และ S จากความชันของกราฟ และจุดตัดแกน y ตามลำดับซึ่งค่า α_0 และ S ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-9



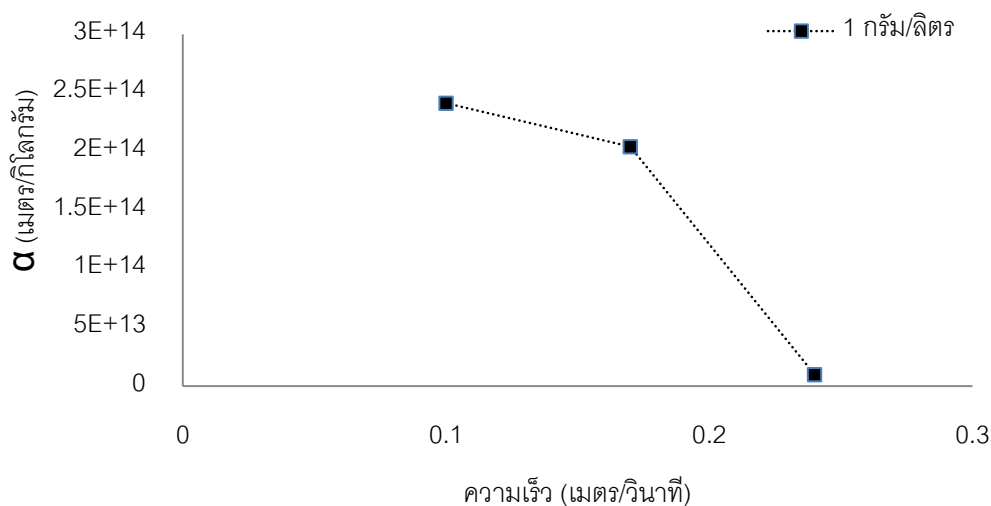
ภาพที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\alpha$ กับ $\ln\Delta P$ ที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ตารางที่ 4-9 ความสัมพันธ์ของค่า α_0 และ S

ความเข้มข้นของน้ำเสีย	S	$\ln\alpha_0$	α_0	สมการความสัมพันธ์
น้ำมันตัด 1 กรัม/ลิตร	0.78	23.44	1.51×10^{10}	$\alpha = 1.51 \times 10^{10} (\Delta P)^{0.78}$
น้ำมันตัด 10 กรัม/ลิตร	0.71	24.39	3.91×10^{10}	$\alpha = 3.91 \times 10^{10} (\Delta P)^{0.71}$
น้ำมันตัด 20 กรัม/ลิตร	1.2	19.14	2.05×10^8	$\alpha = 2.05 \times 10^8 (\Delta P)^{1.2}$

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร ชั้นเค้กจะอัดตัวได้สูงที่สุด คือมีค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวได้เท่ากับ 1.2 ส่วนเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 1 และ 10 กรัม/ลิตร ชั้นเค้กจะอัดตัวได้ต่ำที่สุด คือมีค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวได้ประมาณ 0.7 ดังนั้นจากผลการศึกษาทำให้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบสูงขึ้นจะทำให้ชั้นเค้กอัดตัวได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบสูงขึ้นจะทำให้อนุภาคของหยดน้ำมันเกิดการสะสมตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการอัดตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้นและจากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวได้มีค่ามากกว่า 0 ดังนั้น จึงสามารถได้ว่าอนุภาคของหยดน้ำมันที่สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนเป็นชั้นเค้กที่สามารถอัดตัวได้ (Compressible cake) โดยมีค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้กที่สภาวะเริ่มต้นอยู่ในช่วง $2.05 \times 10^8 - 1.51 \times 10^{10}$ เมตร/กิโลกรัม

นอกจากนี้จากผลการศึกษาของ Hong และคณะ (1997) ซึ่งได้ทำการศึกษาศมการการลดลงของเพอมีเอทฟลักซ์เมื่อใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันโดยเดินระบบแบบไหลตามขวาง (Crossflow) กรองน้ำเสียที่มีความขุ่นจาก SiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 0.1 ไมโครเมตร โดยใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด Zirconia tubular ceramic ขนาดรูพรุน 0.02 ไมโครเมตรพบว่าค่า α ที่ได้อยู่ในช่วง $4.7 \times 10^{13} - 10.1 \times 10^{14}$ เมตร/กิโลกรัมค่า α มีค่าสูงเนื่องจากอนุภาคของน้ำที่มีความขุ่นมีความหนาแน่นมาก (2.27 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่บนผิวหน้าเมมเบรนได้มากและมีค่า α_0 เท่ากับ 1.17×10^{11} เมตร/กิโลกรัมและ ค่า S เท่ากับ 0.58 ซึ่งพบว่าค่า α ซึ่งพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้



ภาพที่ 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับความเร็วตามขวางที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

เมื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วที่มีผลต่อค่า α ซึ่งทำโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3.2 มาวิเคราะห์หาค่า α ตามสมการที่ 4-3 จากการศึกษาพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที จะทำให้ค่า α มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.41×10^{14} เมตร/กิโลกรัม ส่วนเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที จะทำให้ค่า α มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 9.98×10^{12} เมตร/กิโลกรัม ดังภาพที่ 4-28 ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าค่า α มีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเวียนน้ำเสียกลับได้มากขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มการเคลือบที่ของอนุภาคหยดน้ำมันที่สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรน เป็นผลให้ชั้นเคลือบมีความหนาแน่นลดลง ส่งผลให้ค่า α มีค่าลดลง (Hong และคณะ, 1997)

4.4.2.2 ความต้านทานการเกิดฟาวลิง (Fouling Resistance)

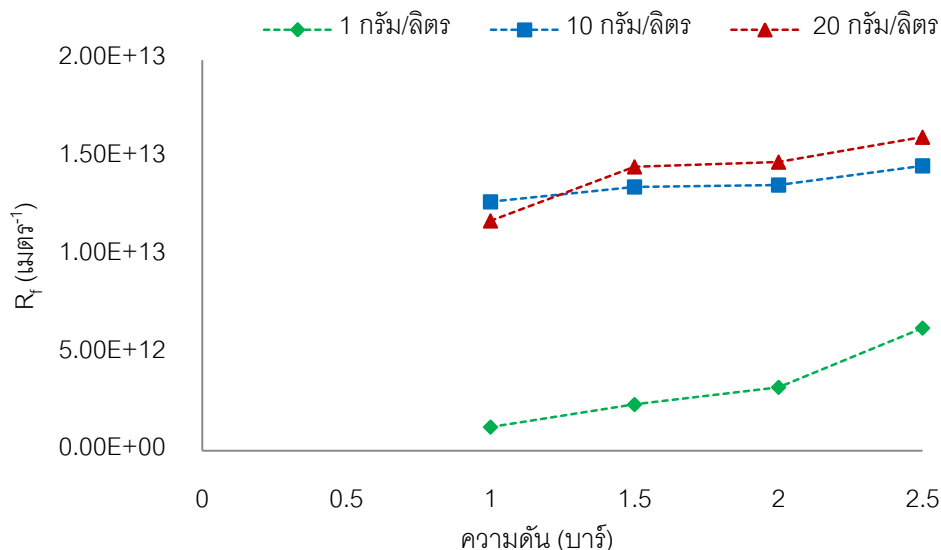
การวิเคราะห์หาค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงทำโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามหัวข้อที่ 4.3.2 มาคำนวณหาค่าความต้านทานตามสมการที่ 4-4 ซึ่งค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงสามารถหาได้จากสมการที่ 4-6

$$R = R_m + R_f \quad (4-6)$$

เมื่อ R = ความต้านทานรวม (เมตร⁻¹) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-4
เมื่อใช้น้ำเสียในการเดินระบบ

R_m = ความต้านทานของเมมเบรน (เมตร⁻¹) สามารถหาได้จากสมการที่ 4-4
เมื่อใช้น้ำบริสุทธิ์ในการเดินระบบ

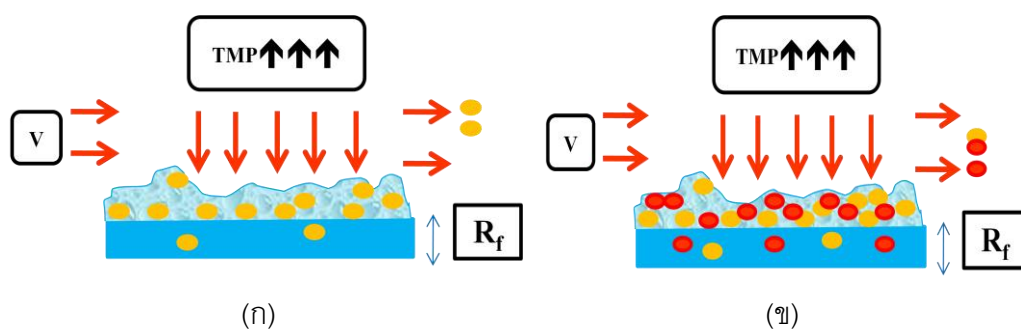
$$R_f = \text{ความต้านทานการเกิดฟาวลิง (เมตร}^{-1}\text{)} = R - R_m$$



ภาพที่ 4-29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงกับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

จากการศึกษาค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงพบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร ใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ จะทำให้ค่าความต้านทาน

การเกิดฟาวลิงมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.61×10^{13} เมตร⁻¹ ส่วนเมื่อเดินระบบโดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ใช้ความดันเท่ากับ 1 บาร์ จะทำให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.22×10^{12} เมตร⁻¹ ดังภาพที่ 4-29 และการศึกษาพบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความดันจะส่งผลให้อนุภาคของหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กถูกแรงดันอัดตัวเพิ่มขึ้นจนสามารถเข้าไปสะสมตัวอยู่ภายในเมมเบรนได้มากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคของหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กมีจำนวนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสะสมตัวภายในเมมเบรนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานเมมเบรนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงมาก (ความเข้มข้นสูงกว่า 10 กรัม/ลิตร) จะพบว่าความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าจะไม่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงเนื่องจากที่ผิวหน้าของเมมเบรนมีปริมาณอนุภาคหยดน้ำมันสะสมตัวอยู่หนาแน่นทำให้อนุภาคที่เข้ามาใหม่ไม่สามารถแทรกตัวลงสู่รูพรุนของเมมเบรนได้อีก จึงทำให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงมีค่าคงที่ ดังภาพที่ 4-30

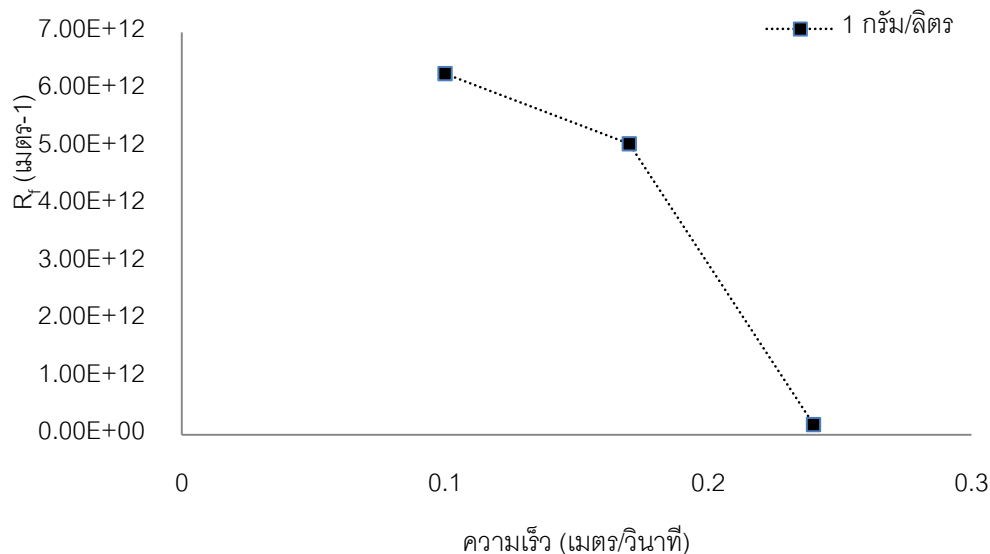


ภาพที่ 4-30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงและความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

- (ก) เมื่อเดินระบบโดยใช้ความดันสูงแต่ความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำ
 (ข) เมื่อเดินระบบโดยใช้ความดันและความเข้มข้นของน้ำเสียสูง

ในส่วนของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงกับความเร็วตามขวางที่ใช้ในการเดินระบบ พบว่าเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที จะทำให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 6.28×10^{12} เมตร⁻¹ ส่วนเมื่อเดินระบบโดยใช้ความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.24 เมตร/วินาทีจะทำให้ค่าความต้านทานการเกิด

ฟาวลิงมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.78×10^{11} เมตร⁻¹ ดังแสดงในภาพที่ 4-31 ซึ่งทำให้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคของหยดน้ำมันที่สะสมตัวอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนเกิดการเคลื่อนที่ จึงทำให้โอกาสที่อนุภาคจะเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรนมีปริมาณลดลง เป็นผลให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงมีค่าลดลง



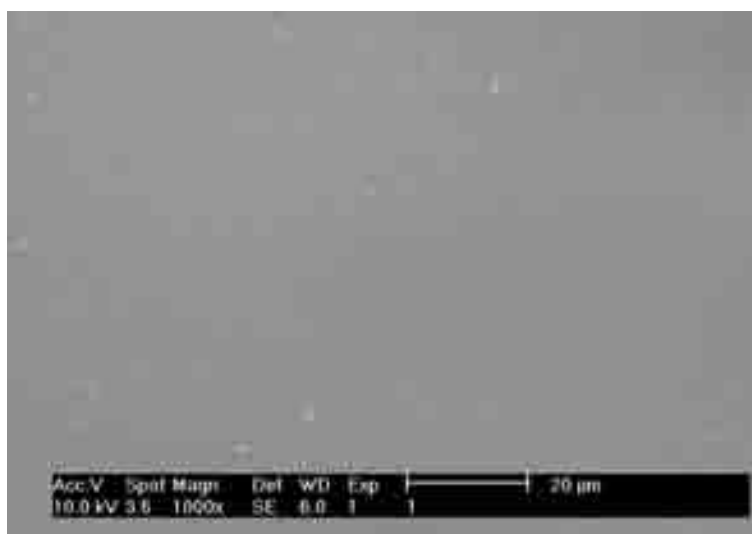
ภาพที่ 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิง กับความเร็วตามขวางที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

โดยสรุปจากการศึกษาพบว่าเมื่อความเร็วตามขวางที่เข้าระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า α และ R_f มีค่าลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของน้ำมัน และง่ายต่อการทำความสะอาด ดังนั้นในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน จึงควรเลือกใช้ความเร็วตามขวางที่มีค่าสูง

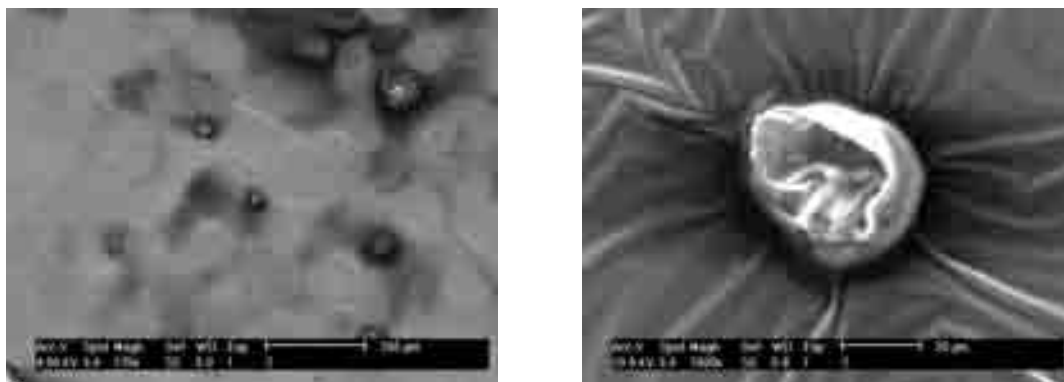
4.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope)

การศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรน ทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ Philips รุ่น XL 30 เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของเมมเบรนก่อนและหลังใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 4-32 และ 4-33 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเมมเบรนเกิดการอุดตัน อนุภาคของหยดน้ำมันจะเกิดการสะสมตัวขึ้นที่ผิวหน้าของเมมเบรนจนเกิดการรวมตัวและอัดตัวเกิดเป็นอนุภาคของหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน การอุดตันลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงดันทำให้อนุภาคของหยดน้ำมันเกิดอัดตัวจนกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่สะสมตัวจนทำให้เกิดเป็นชั้นแค้กขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia



ภาพที่ 4-32 SEM ของเมมเบรนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-33 SEM ของเมมเบรนที่เกิดการอุดตัน

(ก) กำลังขยายเท่ากับ 125 เท่า (ข) กำลังขยายเท่ากับ 1,000 เท่า

4.4.4 ศึกษาสมบัติของชั้นแค้กที่สะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

Hong และคณะ (1997) ศึกษาสมการการลดลงของเพอมีเอทฟลักซ์เมื่อใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันโดยเดินระบบแบบไหลตามขวาง (Crossflow) กรองน้ำเสียที่มีความขุ่นจาก SiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 0.1 ไมโครเมตร โดยใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด Zirconia tubular ceramic ขนาดรูพรุน 0.02 ไมโครเมตร เมื่ออนุภาคที่สะสมบนชั้นแค้กเข้าสู่สมดุลโดยใช้ระยะเวลาสั้น เมื่อการลดลงของเพอมีเอทฟลักซ์ในช่วงเริ่มต้นเป็นผลมาจากอัตราการไหลตามขวาง และแรงต้านทานของเมมเบรน (R_m) ไม่ได้ลดลงตามเวลา ซึ่งในช่วงเริ่มต้นระบบสามารถอธิบายความสัมพันธ์ทั้งหมดได้ดังสมการที่ 4-9

$$\frac{J_f}{J_{wi}} = 1 - \frac{3kTA_s(\theta_{\max})C_0\Delta P}{\pi 4(a_p^3)DR_m^2} t \quad (4-9)$$

เมื่อ	J_f	=	ฟลักซ์ในการกรองน้ำของน้ำเสีย (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)
	J_{wi}	=	ฟลักซ์ในการกรองน้ำบริสุทธิ์ (ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง)
	k	=	ค่าคงที่ของ Boltzmann (เท่ากับ 1.38×10^{-23} กิโลกรัม ตารางเมตร/วินาที ² เคลวิน)
	T	=	อุณหภูมิสมบูรณ์ (เคลวิน)
	A_s	=	ค่าปรับแก้ที่เกิดจากอนุภาคข้างเคียงในชั้นแค้กซึ่งหาได้จากแบบจำลองของ Happel

$$\begin{aligned}
\theta_{\max} &= \text{ค่า } \theta \text{ สูงสุดเมื่ออนุภาคจัดเรียงตัวแบบมีความพรุนต่ำสุด} \\
C_0 &= \text{สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคที่เข้าระบบ (Feed particle volume fraction)} \\
\Delta P &= \text{ความดันลด (นิวตัน/ตารางเมตร)} \\
a_p &= \text{รัศมีของอนุภาค (เมตร)} \\
R &= \mu R_m \text{ (นิวตันวินาที/เมตร}^3\text{)}, R_m = \text{แรงต้านทานเมมเบรน (เมตร}^{-1}\text{)} \\
D &= \frac{kT}{6\pi(\mu a_p)} \text{ เมื่อ } \mu = \text{ความหนืดของน้ำ (นิวตัน วินาที/ตารางเมตร)}
\end{aligned}$$

เมื่อ differential สมการที่ 4-9 จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของฟลักซ์ตามเวลาได้ดังสมการที่ 4-10

$$K_0 = -\frac{1}{J_{wi}} \frac{dJ_f}{dt} = \frac{3kTA_s(\theta_{\max})C_0\Delta P}{\pi 4(a_p^3)DR_m^2} \quad (4-10)$$

K_0 คือ อัตราการลดลงของฟลักซ์ในการกรองน้ำ เมื่อนำสมการที่ 4-10 มาจัดรูปใหม่จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-11

$$K_0 = -\frac{1}{J_{wi}} \frac{dJ_f}{dt} = \frac{27}{2} \frac{A_s(\theta_{\max})C_0\Delta P\mu}{R_m^2 a_p^2} \quad (4-11)$$

เมื่อใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยการเดินระบบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็วตามขวาง (Cross flow velocity) เท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที ดังนั้นจากสมการที่ 4-11 เมื่อรู้ค่าตัวแปรต่างๆ จะทำให้สามารถหาค่า $A_s(\theta_{\max})$ ได้เท่ากับ 187.04

จากการศึกษาพบว่าชั้นเค้กที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันจะเกิดเป็นชั้นเค้กที่สามารถอัดตัวได้ (Compressible Cake) ดังนั้น ค่า $\theta = \theta_{\max}$ ค่า ϵ คือค่าความพรุนที่น้อยที่สุดของชั้นเค้ก ซึ่งสามารถหาค่า θ_{\max} ได้ดังสมการที่ 4-12

$$A_s = \frac{1 + \frac{2}{3}\theta^5}{1 - \frac{3}{2}\theta + \frac{3}{2}\theta^5 - \theta^6} \quad (4-12)$$

เมื่อ $\theta = (1 - \varepsilon)^{1/3}$, ε = ความพรุนของชั้นเค้ก

จากสมการที่ 4-12 จะทำให้สามารถคำนวณหาค่า θ_{\max} ได้เท่ากับ 0.88 และสามารถหาค่าความพรุนของชั้นเค้ก (ε) ที่สะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันที่อยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนได้เท่ากับ 0.32

นอกจากนี้ Hong และคณะ (1997) ได้อธิบายถึงความหนาของชั้นเค้ก (δ_c) ว่ามีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-13

$$\delta_c = \frac{\pi 4 a_p^3 D}{3 C_c k T A_s (\theta_{\max})} \left(\frac{\Delta P - J_f R_m}{J_f} \right) \quad (4-13)$$

เมื่อแทน $D = \frac{kT}{6\pi(\mu a_p)}$ ในสมการที่ 4-13 จะสามารถหาความหนาของชั้นเค้กได้ดังสมการที่ 4-14

$$\delta_c = \frac{2}{9} \frac{a_p^2}{C_c \mu A_s (\theta_{\max})} \left(\frac{\Delta P - J_f R_m}{J_f} \right) \quad (4-14)$$

เมื่อรู้ค่าตัวแปรต่างๆที่เกิดจากการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยการเดินระบบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็วตามขวาง (Cross flow velocity) เท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที จะทำให้สามารถหาความหนาของชั้นเค้กที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันได้เท่ากับ 3.14 ไมโครเมตร

ดังนั้นจากการใช้สมการของ Hong และคณะศึกษาสมบัติของชั้นเค้กที่เกิดจากการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยการเดินระบบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็วตามขวาง (Cross flow velocity) เท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที ทำให้สามารถหาความพรุนของชั้นเค้กที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันบนผิวหน้าของเมมเบรนได้เท่ากับ 0.32 และพบว่าชั้นเค้กที่เกิดขึ้นนี้มีความหนาเท่ากับ 3.14 ไมโครเมตร

จากการวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia สมการการกรองที่ผิวหน้า ตลอดจนการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน สามารถสรุปได้ว่าการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดจากการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเป็นการอุดตันที่มีลักษณะแบบการเกิดชั้นเค้ก (Cake formation) โดยมีค่าความพรุนของชั้นเค้กที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันบนผิวหน้าของเมมเบรนได้เท่ากับ 0.32 และพบว่าชั้นเค้กที่เกิดขึ้นนี้มีความหนาเท่ากับ 3.14 ไมโครเมตรดังนั้นจึงสามารถฟื้นฟูเมมเบรนโดยการทำความสะอาดผิวหน้าได้ แต่เนื่องจากอนุภาคของน้ำมันไม่สามารถรวมตัวกับน้ำได้ (Aurelle, 1985) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีในการทำทำความสะอาดเพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนซึ่งจะทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป

4.5 ศึกษาความเป็นไปได้ในการทำทำความสะอาดและเพิ่มอายุการใช้งานของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการทำทำความสะอาดและเพิ่มอายุการใช้งานของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนซึ่งจะทำการทดลองโดยใช้สภาวะการเดินระบบที่ทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตัน ซึ่งได้แก่ ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าเท่ากับ 10 กรัม/ลิตร (เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าเท่ากับ 20 กรัม/ลิตร อาจเป็นความเข้มข้นที่สูงเกินไป ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าเท่ากับ 10 กรัม/ลิตร แทน) ใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และใช้ความเร็วตามขวางเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที หลังจากเมมเบรนเกิดการอุดตันแล้ว จะนำเมมเบรนมาศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรน โดยนำเมมเบรนมาทำความสะอาดด้วยสารเคมี จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพของชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ Sodium dodecyl sulfate (SDS) Sodium hydroxide (NaOH) และ EDTA ซึ่งการวิธีการทำความสะอาดทำได้โดยนำสารละลายใส่ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำเมมเบรนที่เกิดการอุดตันมาแช่ลงในสารละลายนาน 30 นาที หลังจากนั้นเดินระบบอีกครั้งจนอุดตันเพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพในการทำทำความสะอาดของสารละลายแต่ละชนิด และในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดจะใช้ค่าฟลักซ์ที่สามารถฟื้นฟูได้ (Flux Removal, FR) และประสิทธิภาพการกำจัดแรงต้านทานของเมมเบรน (Resistance Removal, RR) ซึ่งสามารถคำนวณค่า FR และ RR ได้ดังสมการที่ 4-7 และ 4-8 ตามลำดับ (Kazemimoghadam และ Mohammadi, 2007) ซึ่งค่า FR เป็น

ค่าที่ใช้ในการอธิบายประสิทธิภาพการฟื้นฟูฟลักซ์ ถ้าค่า FR มีค่าสูง แสดงว่าสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนมีประสิทธิภาพสูงทำให้สามารถฟื้นฟูฟลักซ์ได้สูง ส่งผลให้เมมเบรนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีขึ้น ส่วนค่า RR เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายประสิทธิภาพการกำจัดความต้านทานการเกิดฟาวลิงที่ผิวหน้าของเมมเบรน ถ้าค่า RR มีค่าสูงจะสามารถอธิบายได้ว่าสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนมีประสิทธิภาพในการกำจัดความต้านทานการเกิดฟาวลิงได้สูง ส่งผลให้แรงต้านทานการเกิดฟาวลิงมีค่าลดลง ทำให้เมมเบรนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มีประสิทธิภาพสูง

$$FR = \left(\frac{J_{wc} - J_{ww}}{J_{wi} - J_{ww}} \right) \times 100 \quad (4-7)$$

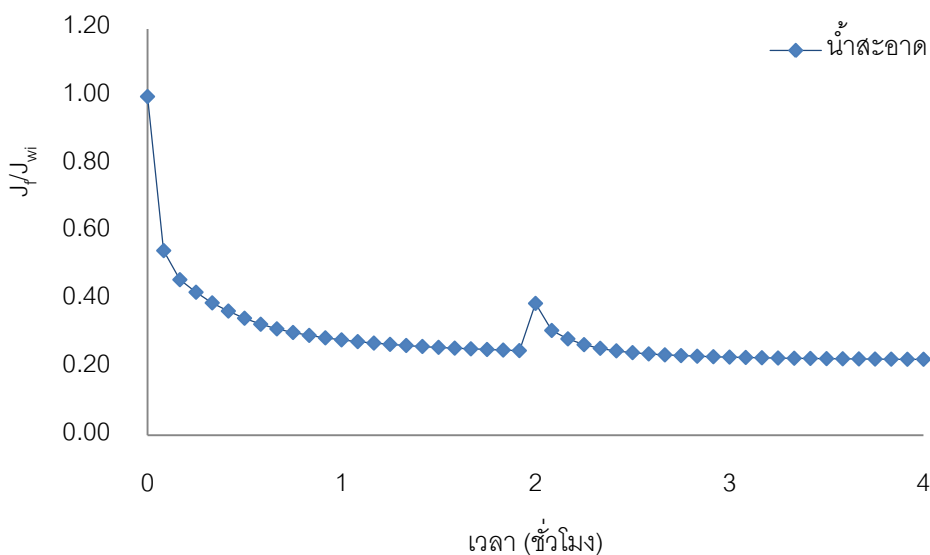
เมื่อ	FR	=	ฟลักซ์ที่สามารถฟื้นฟูได้ (%)
	J_{wc}	=	ฟลักซ์การไหลของน้ำกลั่นเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี
	J_{ww}	=	ฟลักซ์การไหลของน้ำกลั่นเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำสะอาด
	J_{wi}	=	ฟลักซ์การไหลของน้ำกลั่นเมื่อเดินระบบ 10 นาที

$$RR = \left(\frac{R_f - R_c}{R_f} \right) \times 100 \quad (4-8)$$

เมื่อ	RR	=	ประสิทธิภาพการกำจัดแรงต้านทานของเมมเบรน(%)
	R_f	=	แรงต้านทานของเมมเบรนหลังจากเมมเบรนเกิดการอุดตัน
	R_c	=	แรงต้านทานของเมมเบรนหลังจากผ่านการทำความสะอาด

4.5.1 การศึกษาความสามารถในการฟื้นฟูเมมเบรนเมื่อใช้น้ำสะอาดทำความสะอาดเมมเบรน

การศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรนที่อุดตันด้วยน้ำสะอาด ทำโดยเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจนกระทั่งเมมเบรนเกิดการอุดตันซึ่งใช้ระยะเวลาเท่ากับ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเมมเบรนมาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นและเดินระบบอีกครั้งซึ่งจะใช้เวลาในการเดินระบบเท่ากับ 2 ชั่วโมงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำความสะอาดระหว่างการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นกับสารเคมี ซึ่งผลการศึกษาดังภาพที่ 4-34



ภาพที่ 4-34 ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้น้ำบริสุทธิ์

จากภาพสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ เมื่อนำเมมเบรนที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นมาเดินระบบใหม่อีกครั้งจะพบว่า ฟลักซ์ในการกรองน้ำของเมมเบรนที่ผ่านการทำความสะอาดจะเพิ่มขึ้นจากฟลักซ์ในการกรองน้ำของเมมเบรนเมื่อเกิดการอุดตันจาก J/J_{wi} เท่ากับ 0.25 เป็น J/J_{wi} เท่ากับ 0.39 และหลังจากนั้นฟลักซ์จะค่อยๆ ลดลงจนคงที่เมื่อใช้เวลาในการเดินระบบเท่ากับ 30 นาที ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า การใช้น้ำสะอาดล้างเมมเบรนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถ

ทำให้เมมเบรนกลับมามีค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำที่ดีเท่าที่ควร และเมื่อวิเคราะห์ค่าค่า FR และ RR ที่ได้จากการใช้น้ำกลั่นทำความสะอาดเมมเบรนพบว่าค่าใกล้เคียง 0%

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการใช้น้ำสะอาดทำความสะอาดเมมเบรนเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถฟื้นฟู ฟลักซ์ในการกรองน้ำและกำจัดความตันตันที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเมมเบรนได้ อีกทั้งยังไม่สามารถทำให้เมมเบรนกลับมาใช้งานใหม่ได้ เนื่องจากหยดน้ำมันเกิดการสะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน มีสมบัติที่ไม่สามารถรวมตัวกับน้ำได้ทำให้น้ำไม่สามารถพาอนุภาคของหยดน้ำมันให้หลุดออกจากเมมเบรนได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีสมบัติในการทำความสะอาดอนุภาคของหยดน้ำมันที่สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนให้หลุดออกจากเมมเบรนได้ ซึ่งจะศึกษาในหัวข้อต่อไป

4.5.2 การศึกษาความสามารถในการฟื้นฟูเมมเบรนเมื่อใช้สารเคมีทำความสะอาดเมมเบรน

วิธีการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารเคมีเป็นการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนด้วยวิธีทางเคมี สารเคมีอาจช่วยให้อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยสารเคมีอาจทำให้อนุภาคที่เกิดการอุดตันเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้เกิดการหลุดออก (Desorption) หรือสารเคมีที่ใช้ อาจทำปฏิกิริยากับอนุภาคที่อุดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส การย่อยสลายพันธะเปปไทด์ของโปรตีน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น โดยสารเคมีที่ใช้ควรมีคุณสมบัติละลายสารอุดตันหรือทำให้สารอุดตันเกาะตัวกันน้อยลงด้วยกลไกทางกายภาพหรือทางเคมี รักษาสภาพการกระจายตัวของสารอุดตันไม่ให้เกิดไปสะสมอีก ไม่เป็นสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันเอง และไม่ทำให้แผ่นเมมเบรนเสื่อมสภาพ โดยสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้ (Cheryn, 1998)

- กรด ใช้ได้ทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ เช่น กรดเกลือ (Hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) กรดออกซาลิก (Oxalic acid) กรดซิตริก (Citric acid) เป็นต้น ใช้ได้ผลดีในการละลายตะกอนที่เป็นโลหะออกไซด์ เกลือคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารอุดตันที่พบในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ แต่ใช้ไม่ได้ผลกับสารอุดตันที่เป็นซิลิกา ซิลิเกต คอลลอยด์ และจุลินทรีย์

- ด่าง ที่ใช้กันแพร่หลายคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) คาร์บอเนต และฟอสเฟต ใช้ได้ผลดีกับสารอุดตันที่เป็นอินทรีย์ เช่น โปรตีน เพคติน เซลลูโลส ดังนั้น จึงนิยมใช้ล้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรม อาหาร และน้ำผลไม้

- เอนไซม์ (Enzyme) ใช้สำหรับทำความสะอาดสารอินทรีย์ เช่นโปรตีน โดยทำให้เกิดการแตกตัว ทำลายพันธะ เป็นโมเลกุลที่เล็กลง โดยต้องเลือกเอนไซม์ที่เหมาะสม เช่น ถ้าสารอุดต้นเป็นโปรตีน ควรใช้เอนไซม์โปรติเอส (Protease) ถ้าเป็นแป้งควรใช้อะมัยเลส (Amylase) หรือควรใช้ไลเปส (lypaes) ถ้าสารอุดต้นเป็นไขมัน บางทีอาจจะต้องใช้หลายตัวผสมกัน หรือหาสูตรที่เหมาะสม เอนไซม์จัดเป็นสารทำความสะอาดที่อ่อน ไม่เป็นอันตรายต่อเมมเบรน แต่มีราคาแพง

- สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งเป็นส่วนที่เมื่ออยู่ในน้ำจะแสดงประจุบวก และประจุลบ หรือเป็นกลาง ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิว โดยสารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าถึงส่วนต่างๆของเมมเบรนได้ดี (เกิด wetting) จึงสัมผัสกับสารอุดต้นได้ดี ล้างออกได้ง่าย แต่ควรเลือกอย่างระมัดระวัง เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวอาจถูกดูดซับได้ด้วยแผ่นเมมเบรนบางชนิด ซึ่งทำให้เกิดการอุดต้นเอง

- สารฆ่าเชื้อ (Disinfectant) สารฆ่าเชื้อส่วนมากเป็นตัวออกซิเดนต์(Oxidant) เช่น คลอรีน (Chlorine) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) สารพวงไฮโปคลอไรด์ (Hypochloride) เป็นสารที่ออกฤทธิ์แรง จึงควรใช้อย่างระมัดระวัง เนื่องจากอาจมีผลเสียต่อเมมเบรน และส่วนอื่นของอุปกรณ์ นอกจากจะใช้สารเหล่านี้ในการทำทำความสะอาดเมมเบรนแล้ว ยังใช้ในการเก็บรักษาเมมเบรนด้วย

- สารทำความสะอาดกำหนดสูตร (Formula cleaner) เป็นสารที่ผู้จำหน่ายกำหนด ส่วนประกอบขึ้นโดยอาจใช้สารหลายชนิดผสมกันให้มีความเหมาะสมกับชนิดของอนุภาคที่อุดต้นเมมเบรน แต่มีราคาแพง

ในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้งานเมมเบรนชนิด Regenerated Cellulose ที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) (สมบัติของเมมเบรนที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-10) ทำให้ไม่สามารถใช้สารเคมีที่มี Cl^- เป็นองค์ประกอบ ได้ เช่น HCl HOCl เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบ Cl^- ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์แบบรุนแรงจะเกิดปฏิกิริยากับเมมเบรนที่ทำจากเส้นใยพอลิเมอร์ โดยเมื่อเมมเบรนสัมผัสกับ Cl^- โครงสร้างของเมมเบรนถูกทำลาย (Glater, 1994)

ตารางที่ 4-10 สมบัติของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

เมมเบรน	ลักษณะ
วัสดุ	Regenerated Cellulose
ขนาดรูพรุน	0.12 ไมโครเมตร
พื้นที่ผิว	98 ตารางเซนติเมตร
ความชอบน้ำ (Hydrophobicity)	ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic)
ช่วงการทนพีเอช	2-13

จากงานวิจัยของ Kazemimoghadam และ Mohammadi (2007) ได้ศึกษาผลของการใช้สารเคมีที่แตกต่างกันในการทำความสะอาดเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด polysulfone ที่มีขนาดรูพรุน 30,000 ดาลตัน บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนนมจากโรงงานผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ ใน Tehran เติร์ระบบแบบไหลตามขวาง ใช้ความดัน 3 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเมื่อเดินระบบจนกระทั่งเมมเบรนเกิดการอุดตัน พบว่าจะเกิดขึ้นแค่ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน จากนั้นใช้สารเคมีที่มีชนิดที่ต่างกันทำความสะอาดเมมเบรน ซึ่งได้แก่ Hydrochloric acid (HCl) Nitric acid (HNO₃) Sodium Hydroxide (NaOH) Sodiumdodecylsulfate (SDS) และ EDTA จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ NaOH SDS และ EDTA ร่วมกันจะสามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้ดีที่สุดเนื่องจาก SDS ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว EDTA ทำหน้าที่เป็น Chelating agent และ NaOH เป็นสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารลดแรงตึงผิว (SDS) สารที่มีสภาพเป็นด่าง (NaOH) และสาร EDTA มาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยค่าใช้ FR และ RR ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำความสะอาดเมมเบรนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรนของสารเคมีแต่ละชนิด ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ค่า FR และ RR ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำความสะอาดเมมเบรน

ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้นของสารเคมี	FR(%)	RR%
SDS	0.25N	26.38	10.26
	0.5N	41.21	37.71
	1N	149.67	68.55
NaOH	0.05N	17.62	4.37
	0.1N	36.46	22.36
	0.25 N	159.76	84.77
EDTA	0.005 N	21.10	4.37
	0.01N	31.75	8.74
	0.05N	153.30	92.11
SDS+NaOH+EDTA		95.823	54.78

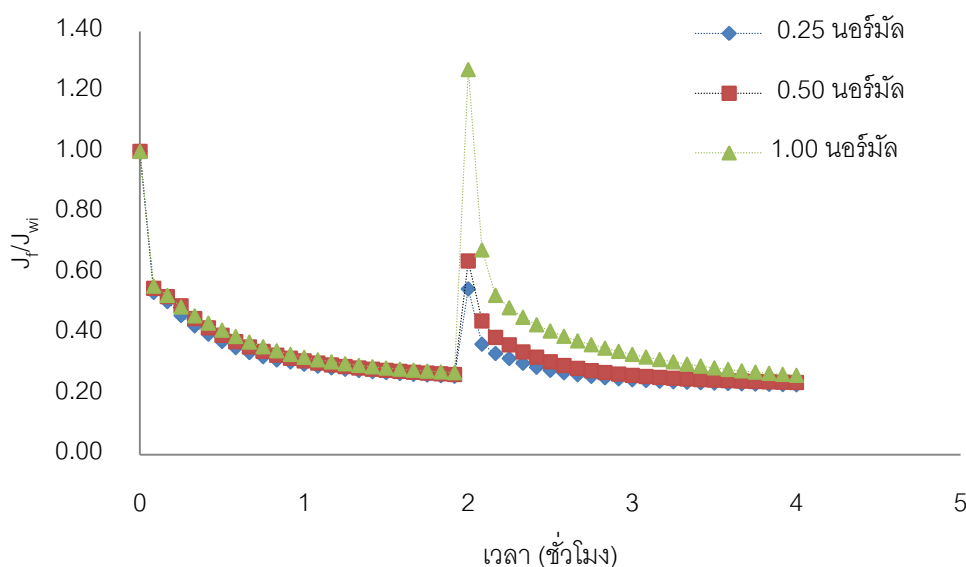
4.5.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารลดแรงตึงผิว

การทดลองนี้จะศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรนที่เกิดการอุดตันจากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งทำโดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ ได้แก่ Sodiumdodecylsulfate (SDS) ที่มีความเข้มข้นต่างกัน 3 ความเข้มข้นได้แก่ 0.25 0.5 และ 1 นอร์มัล เพื่อศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้ค่า FR และ RR ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาด

ภาพที่ 4-35 แสดงฟลักซ์ที่สามารถฟื้นฟูได้ เมื่อใช้ SDS ในการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้ความเข้มข้นที่ต่างกัน จากการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะสามารถฟื้นฟูฟลักซ์ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจาก SDS จะทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว ทำให้น้ำจับกับอนุภาคของหยดน้ำมันและกำจัดอนุภาคของหยดน้ำมันที่สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนให้หลุดออกไปได้ (Kazemimoghadam และ Mohammadi, 2007) ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของ SDS คือ 0.5 N โดยมีค่า FR และ RR เท่ากับ 41.21% และ 37.71% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นสูงเกินกว่า 0.5 N อาจจะทำให้ SDS เกิดการทำลายสภาพของเมมเบรนได้ ส่งผลให้สมบัติของเมมเบรนเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ค่า FR ของ SDS ความเข้มข้น 1

นอร์มัลมีค่าเท่ากับ 149.67% ซึ่งสูงกว่า 100% ทำให้ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำที่เกิดจากการใช้ SDS ทำความสะอาด (J_{wc}) มีค่าสูงกว่าก่อนทำความสะอาด (J_{wi}) ทำให้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้ SDS ความเข้มข้น สูงกว่า 0.5 นอร์มัลจะส่งผลเสียต่อเมมเบรน ในทางตรงข้ามหากใช้ความเข้มข้น ต่ำกว่า 0.5 นอร์มัล จะมีค่า FR และ RR ต่ำเท่ากับ 26.38% และ 10.26% ตามลำดับเนื่องจากการทำความสะอาดเมมเบรนไม่สมบูรณ์ อาจมีหยดน้ำมันที่สะสมตัวที่ผิวหน้าของเมมเบรน จึงควรเพิ่มความเข้มข้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

ดังนั้นจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของ SDS จะอยู่ในช่วง 0.5 – 1 นอร์มัล ซึ่งถ้าใช้ความเข้มข้นต่ำกว่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดต่ำ แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นสูงเกินไปอาจทำให้ SDS ทำลายสมบัติของเมมเบรน ทำให้โครงสร้างของเมมเบรนเปลี่ยนไปจนไม่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้

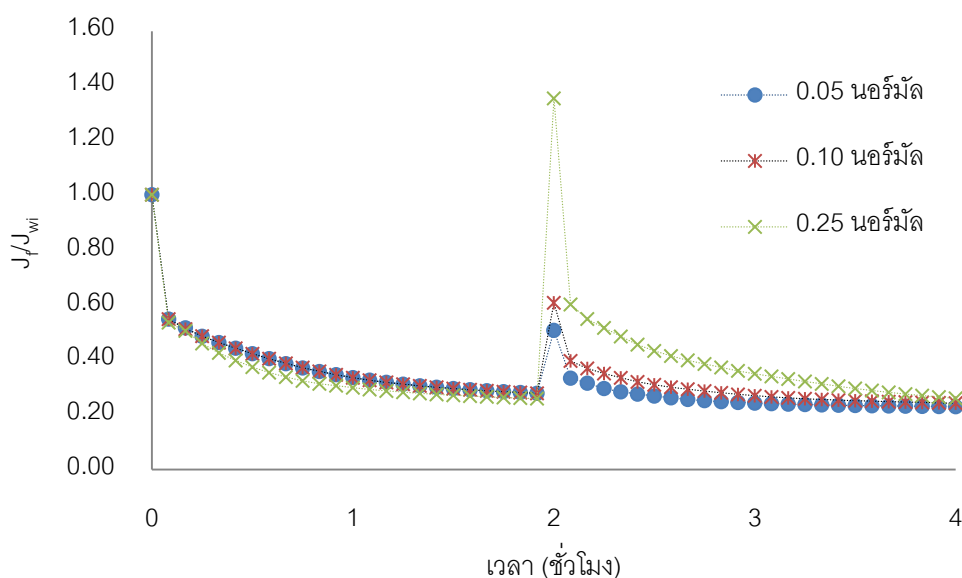


ภาพที่ 4-35 ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัด เมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สาร SDS ที่ความเข้มข้นต่างกัน

4.5.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง

การศึกษาประสิทธิภาพการใส่สารที่มีฤทธิ์เป็นด่างจะใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง คือ NaOH จำนวน 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 0.05 0.1 และ 0.25 นอร์มัล จากนั้น

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารทำความสะอาดโดยใช้ค่า FR และ RR ซึ่งผลการศึกษาดังแสดงตารางที่ 4-11 และจากภาพที่ 4-36 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เพิ่มขึ้นให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูฟลักซ์สูงขึ้น เนื่องจาก NaOH จะทำหน้าที่ในการปรับ pH ให้สูงขึ้น และทำหน้าที่เพิ่มประจุลบช่วยในการดึงไอออนต่างๆ ออกจากรูพรุนของเมมเบรน (Blanpain-Avet และคณะ, 2009) แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นมากกว่า 0.1 นอร์มัล ประสิทธิภาพการฟื้นฟูฟลักซ์มีค่าสูงกว่าฟลักซ์เริ่มต้นซึ่งพบว่าการใช้ NaOH ความเข้มข้นเท่ากับ 0.25 นอร์มัล จะมีค่า FR เท่ากับ 159.76% ซึ่งสูงกว่า 100% ทำให้สมบัติของเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ไม่สามารถนำเมมเบรนกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นต่ำซึ่งเท่ากับ 0.05 นอร์มัล จะพบว่ามีค่า FR และ RR ต่ำมาก เท่ากับ 17.62% และ 4.37% ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NaOH คือเท่ากับ 0.1 นอร์มัล ซึ่งมีค่า FR และ RR เท่ากับ 36.46% และ 22.35% ตามลำดับ



ภาพที่ 4-36 ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัด เมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สาร NaOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฟื้นฟูฟลักซ์กับระหว่าง SDS กับ NaOH พบว่า ประสิทธิภาพการฟื้นฟูฟลักซ์ของ NaOH มีค่าต่ำกว่า SDS เนื่องจาก SDS มีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคของหยดน้ำมันส่งผลให้หยดน้ำมันหลุดออกตามการไหลของน้ำ ทำให้สามารถทำความสะอาดหยดน้ำมันที่เกาะอยู่บนผิวของเมมเบรนได้

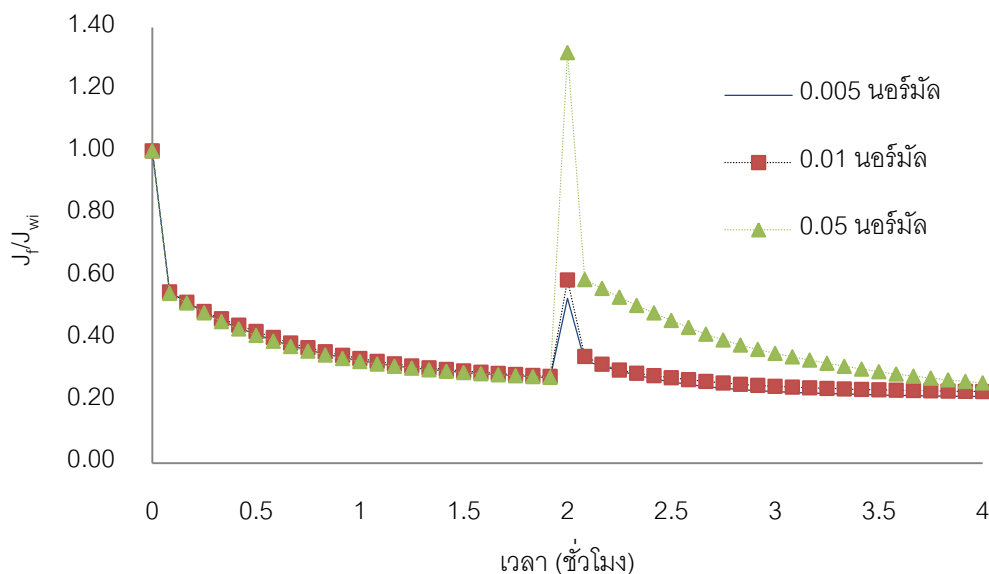
ดีกว่าส่วน NaOH จะช่วยปรับ pH ให้สูงขึ้นเพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมในการดึงไอออนต่างๆ ออกจากรูพรุนของเมมเบรน แต่เมื่อใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.25 นอร์มัล ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงเกินไป NaOH จะทำปฏิกิริยากับเมมเบรนจนเกิดการทำลายโครงสร้างของเมมเบรนได้มากกว่าการใช้ SDS ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มัล

ดังนั้นจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NaOH ที่จะสามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้ควรอยู่ในช่วง 0.1 – 0.25 นอร์มัล ซึ่งถ้าใช้ความเข้มข้นต่ำกว่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดต่ำ แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นสูงเกินไป อาจส่งผลให้ NaOH ทำลายโครงสร้างของเมมเบรน ทำให้ไม่สามารถนำเมมเบรนกลับมาใช้งานใหม่ได้

4.5.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้ EDTA

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ EDTA จะทำโดยใช้ EDTA จำนวน 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 0.005 0.01 และ 0.05 นอร์มัล จากนั้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารทำความสะอาดโดยใช้ค่า FR และ RR ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-11 ซึ่งพบว่าค่า FR และ RR มีค่าต่ำกว่า SDS และ NaOH และจากภาพที่ 4-37 จะพบว่ากราฟพื้นฟูฟลักซ์ในการกรองน้ำอยู่ในเกณฑ์ต่ำ เนื่องจาก EDTA จะทำหน้าที่เป็น chelating agent กล่าวคือ เป็นสารซึ่งสามารถจับกับแร่ธาตุประจุบวก ได้แก่ เหล็ก สังกะสี ทองแดงโคบอลต์ และแมงกานีส โดยสารคีเลตจะล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะไว้ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโลหะถูกจับอยู่ในโมเลกุลไม่เปิดโอกาสให้ประจุลบจากที่อื่นเข้าทำปฏิกิริยาได้ปฏิกิริยารวมนี้เรียกว่า chelation ซึ่งช่วยในการกำจัดโลหะที่ตกค้างอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน แต่จะสามารถทำหน้าที่ได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นต่าง ดังนั้นประสิทธิภาพในการทำความสะอาดจึงต่ำ

ความเข้มข้นที่เหมาะสมของ EDTA คือเท่ากับ 0.01 นอร์มัล ซึ่งจะมีค่า FR และ RR เท่ากับ 31.75% และ 8.74% ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อใช้ความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 0.05 นอร์มัล พบว่าจะมีค่า FR เท่ากับ 153.36% ซึ่งสูงเกินกว่า 100% ส่งผลให้สมบัติของเมมเบรนเปลี่ยนแปลงและทำให้ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำหลังจากทำความสะอาดเมมเบรนด้วย EDTA สูงกว่าก่อนทำความสะอาด ส่วนเมื่อใช้ความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 0.005 นอร์มัล จะมีค่า FR และ RR เท่ากับ 21.10% และ 4.37% ตามลำดับซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำมาก



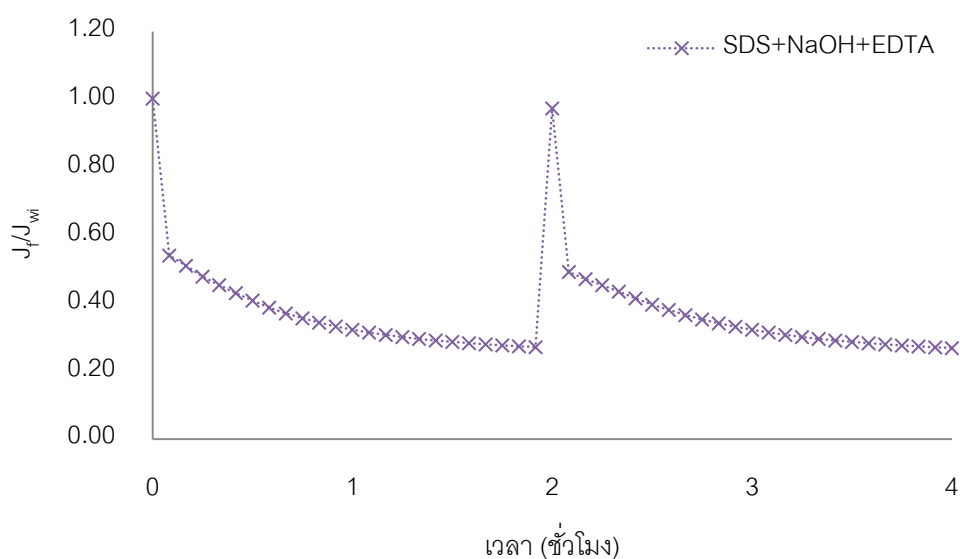
ภาพที่ 4-37 พลั๊กซีในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อทำ ความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สาร EDTA ที่ความเข้มข้นต่างกัน

จากการศึกษาทำให้สามารถสรุปได้ว่าควรใช้ EDTA ที่มีความเข้มข้น ในช่วง 0.01 – 0.05 นอร์มัล ทำความสะอาดเมมเบรน แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นสูงกว่า 0.05 นอร์มัล EDTA จะไปทำลายสมบัติของเมมเบรนทำให้ไม่สามารถนำเมมเบรนกลับมาใช้งานได้ใหม่ นอกจากนี้ถ้าทำความสะอาดเมมเบรนในสภาวะที่เป็นด่าง อาจทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด สูงขึ้น เนื่องจาก EDTA จะทำงานได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง (Kazemimoghadam และ Mohammadi, 2007)

4.5.2.4 ศึกษาความสามารถในการฟื้นฟูเมมเบรนเมื่อใช้สาร SDS NaOH และ EDTA ร่วมกัน

Kazemimoghadam และ Mohammadi (2007) ได้ศึกษาผลของการใช้ สาร SDS NaOH และ EDTA ร่วมกันในการทำความสะอาดเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันชนิด polysulfone ที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนนมจากโรงงานผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ใน Tehran พบว่าเมื่อใช้ NaOH SDS และ EDTA ร่วมกันจะสามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้ดีที่สุดซึ่งมีค่า FR และ RR เท่ากับ 100% เนื่องจาก SDS ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว EDTA ทำหน้าที่เป็น

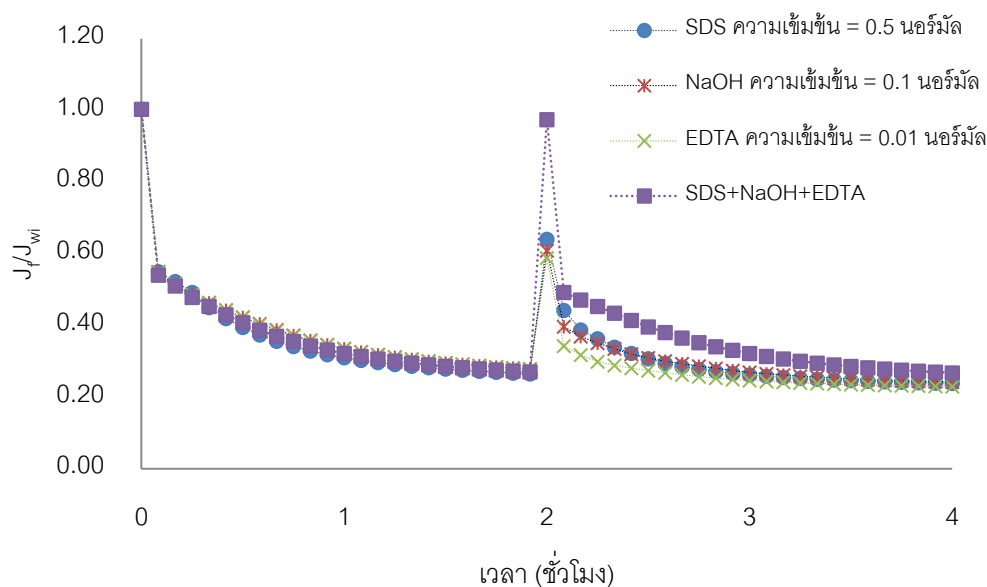
Chelating agent และ NaOH เป็นสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำสาร SDS NaOH และ EDTA ร่วมกันมาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งการศึกษาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารเคมีร่วมกันทั้ง 3 ชนิด จะทำโดยใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา ได้แก่ SDS ความเข้มข้น เท่ากับ 0.5 นอร์มัล NaOH ความเข้มข้น เท่ากับ 0.1 นอร์มัล และ EDTA ความเข้มข้น เท่ากับ 0.05 นอร์มัลและนำเมมเบรนที่เกิดการอุดตันมาทำความสะอาดโดยใช้เวลาในการแช่เมมเบรนสารละ 30 นาที เริ่มต้นที่ SDS NaOH และ EDTA ตามลำดับ จากนั้นนำหาค่าวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดโดยใช้ค่า FR และ RR



ภาพที่ 4-38 พลักร์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัด เมื่อทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สาร SDS NaOH และ EDTA ร่วมกัน

จากการศึกษาพบว่า การทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้ SDS NaOH และ EDTA ร่วมกัน จะมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงที่สุด โดยมีค่า FR และ RR เท่ากับ 95% และ 55% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 เนื่องจาก SDS ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว ทำให้น้ำสามารถจับกับหยดน้ำมัน และพาหยดน้ำมันออกจากผิวของเมมเบรนได้ ส่วน NaOH จะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของ SDS และ EDTA จะทำหน้าที่เป็นเคลือบ ทำให้ จับกับไอออนและโลหะต่างๆ ที่สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนให้หลุดออกได้

จึงทำให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูฟลักซ์มีค่าสูงขึ้นซึ่งสามารถฟื้นฟูฟลักซ์ในการกรองน้ำได้เกือบ 100 % ดังภาพที่ 4-38



ภาพที่ 4-39 ฟลักซ์ในการกรองน้ำด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัดเมื่อใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ทำความสะอาดเมมเบรน

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเมมเบรนของสารเคมี ได้แก่ SDS NaOH และ EDTA และการใช้ SDS NaOH และ EDTA ร่วมกัน จะพบว่าการใช้ SDS NaOH และ EDTA ร่วมกัน จะมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเมมเบรนสูงที่สุด รองลงมาคือ SDS NaOH และ EDTA ตามลำดับ

4.6 การประเมินและเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพจากการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะทำโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เข้าระบบต่ำกว่า 1 กรัม/ลิตร เติระบบโดยใช้ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ความเร็วตามขวาง (Cross flow velocity) เท่ากับ 0.24 เมตร/วินาทีซึ่งใช้เวลาในการเดินระบบนาน 2 ชั่วโมง พบว่าได้ฟลักซ์ในการกรองน้ำเท่ากับ 150 ลิตร/ชั่วโมง ตารางเมตร หลังจากนั้นเมื่อเมมเบรนเกิดการอุดตัน จะนำเมมเบรนมาทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารเคมี 3

ชนิด ร่วมกัน ได้แก่ SDS ความเข้มข้น เท่ากับ 0.5 นอร์มัล NaOH ความเข้มข้น เท่ากับ 0.1 นอร์มัล และ EDTA ความเข้มข้น เท่ากับ 0.05 นอร์มัล เพื่อเป็นการฟื้นฟูเมมเบรน ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดจากระบบได้ดังนี้

- ค่าไฟฟ้า

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะใช้เครื่องสูบน้ำที่ใช้พลังงาน 1 แรงม้า ซึ่งเท่ากับ 0.746 กิโลวัตต์ ซึ่งระบบจะใช้ฟลักซ์ในการกรองน้ำเท่ากับ 150 ลิตร/ชั่วโมง ถ้าต้องการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันให้ได้น้ำที่กรองได้ 1 ลูกบาศก์เมตร จะต้องใช้ระยะเวลาในการเดินระบบเท่ากับ 6.67 ชั่วโมง โดยที่ค่าไฟฟ้าสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์)} \times \text{ค่าไฟยูนิต/หน่วย} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้งาน} \times \text{ภาษี 7\%} \\ &= 0.746 \text{ กิโลวัตต์} \times 2.8095 \text{ บาท/หน่วย} \times 6.67 \text{ ชั่วโมง} \times \text{ภาษี 7\%} = 22.09 \text{ บาท} \end{aligned}$$

(*หมายเหตุ : อัตราค่าไฟฟ้า 1 ยูนิต/หน่วย เป็นการคำนวณจากการประกอบกิจการขนาดกลาง คิดอัตราแบบปกติในขนาดแรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์ มีค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.8095 บาท/หน่วย, ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีผลตั้งแต่วันที่ กรกฎาคม พ.ศ.2554 เป็นต้นไป)

- ค่าสารเคมี

ค่าสารเคมีของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะเกิดจากการใช้สารเคมีในการทำความสะอาดเมมเบรน (พื้นที่ของเมมเบรน = 0.0098 ตารางเมตร) ซึ่งใช้สารเคมีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ SDS ความเข้มข้น เท่ากับ 0.5 นอร์มัล NaOH ความเข้มข้น เท่ากับ 0.1 นอร์มัล และ EDTA ความเข้มข้น เท่ากับ 0.05 นอร์มัล ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีดังนี้

(1) ค่าสาร SDS ความเข้มข้น เท่ากับ 0.5 นอร์มัล

ค่า สาร SDS 1,000 กรัม ราคา 1,000 บาท ใช้ 7.2 กรัม คิดเป็นเงิน 7.2 บาท

(2) ค่าสาร NaOH ความเข้มข้น เท่ากับ 0.1 นอร์มัล

ค่า สาร NaOH 1,000 กรัม ราคา 250 บาท ใช้ 0.2 กรัม คิดเป็นเงิน 0.05 บาท

(3) ค่าสาร EDTA ความเข้มข้น เท่ากับ 0.05 นอร์มัล

ค่า สาร EDTA 1,000 กรัม ราคา 1,440 บาท ใช้ 0.465 กรัม คิดเป็นเงิน 0.67 บาท

ดังนั้นเมื่อใช้ระบบอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้เมมเบรนที่มีขนาดพื้นที่ผิวหน้า 0.0098 ตารางเมตร จะเสียค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดเมมเบรนเท่ากับ 7.92 บาท หรือเท่ากับ 808.16 บาท/ครั้ง ตารางเมตร

โดยสรุปเมื่อประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันให้น้ำที่สามารถกรองได้เท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตร พบว่าจะเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (Operating Cost) ทั้งหมดเท่ากับ 830.25 บาท

จากการศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมในการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและการศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนหลังจากเกิดการอุดตันสามารถสรุปตารางที่ 4-12 และเมื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจนกระทั่งได้น้ำที่สามารถกรองได้เท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตร พบว่าจะเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (Operating Cost) ทั้งหมดเท่ากับ 830.25 บาท

ตารางที่ 4-12 สรุปและวิเคราะห์สภาวะการเดินระบบและวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนที่เหมาะสม

สภาวะการเดินระบบ	ลักษณะการอุดตันของเมมเบรน	การทำความสะอาดเมมเบรน
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของน้ำเสีย = 1 กรัม/ลิตร - ความดัน = 2.5 บาร์ - ความเร็วตามขวาง = 0.24 เมตร/วินาที 	เมมเบรนจะเกิดการอุดตันแบบ ชั้นเค้กซึ่งทำให้ง่ายต่อการทำ ความสะอาด	ใช้ SDS NaOH EDTA ร่วมกัน จะมีประสิทธิภาพในการทำ ความสะอาดเมมเบรนสูงที่สุด โดยใช้ <ul style="list-style-type: none"> - SDS ที่มีความเข้มข้น = 0.5 นอร์มัล - NaOH ที่มีความเข้มข้น = 0.1 นอร์มัล - EDTA ที่มีความเข้มข้น = 0.01 นอร์มัล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Process) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันซึ่งใช้เมมเบรนทำจากวัสดุ Regenerated Cellulose ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่มีขนาดรูพรุน 0.12 ไมโครเมตร โดยศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม จากนั้นจะทำการศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของน้ำมัน รวมถึงการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia (Hermia's model) และสมการการกรองที่ผิวหน้า (Surface Filtration Equation) มาอธิบายใช้ในการศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเพื่อให้เข้าใจกลไกการอุดตันของเมมเบรนและเป็นแนวทางในการศึกษาวิธีในการทำมาความสะอาดเพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและการประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

การศึกษสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด และน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม พบว่าเป็นน้ำเสียที่มีขนาดเท่ากับ 1.5 และ 3.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ จึงเลือกใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ที่ทำจากวัสดุ Regenerated Cellulose ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ทนพีเอชได้ในช่วง 2- 13 และมีขนาดรูพรุน 0.12 ไมโครเมตร

5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ศึกษากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคของน้ำมันแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 กรัม/

ลิตร และน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดพบว่า

- พลักซ์ในการกรองน้ำของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสูงกว่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ความขุ่น บีโอดี ทีโอดี และน้ำมันไขมัน พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มโดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า 80%
- กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสูงกว่า โดยเมื่อใช้ระยะเวลากรอง 2 ชั่วโมงน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจะมีค่าซีโอดีเท่ากับ 120 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีค่าซีโอดีประมาณ 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร

5.1.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อระบบอัลตราฟิลเตรชัน ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ ความดันและความเร็วที่ใช้ในการเดินระบบ จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ความดันเท่ากับ 2.5 บาร์ และความเร็วเท่ากับ 0.24 เมตร/วินาที จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุด

5.1.4 ศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

จากการศึกษากลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia อธิบายลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ ความดัน และความเร็วตามขวางที่แตกต่างกัน พบว่าการอุดตันของเมมเบรนเป็นแบบ การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation)

การศึกษากลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยประยุกต์ใช้สมการการกรองที่ผิวหน้าเพื่ออธิบายความต้านทานจำเพาะของฟิลเตอร์เค้ก (specific cake resistance: α) และแรงต้านทานของฟาวลิง (Fouling Resistance, R_f) พบว่า

- เมื่อความดันและความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า α เพิ่มขึ้น แต่ค่า α มีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

- เมื่อความดันและความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิง (R_f) มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงมาก (ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร ขึ้นไป) จะพบว่าความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าจะไม่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิง นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงมีค่าลดลง

การวิเคราะห์การอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่า เมมเบรนจะเกิดการอุดตันแบบชั้นแค้ก ซึ่งสอดคล้องกับผลศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermia

การศึกษาสมบัติของชั้นแค้กที่สะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนทำโดยการนำสมการการลดลงของเพอมีเอทฟลักซ์ของ Hong และคณะ (1997) มาประยุกต์ใช้ในการอธิบายค่าความพรุนของชั้นแค้กและค่าความหนาของชั้นแค้กที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคของหยด พบว่าสามารถหาค่าความพรุนของชั้นแค้ก (ϵ) และค่าความหนาของชั้นแค้กที่สะสมตัวของอนุภาคของหยदन้ำมันที่อยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนได้เท่ากับ 0.32 และ 3.14 ไมโครเมตร ตามลำดับ

5.1.5 ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรนโดยนำเมมเบรนมาทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดและสารเคมี ศึกษาประสิทธิภาพของชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ Sodiumdodecylsulfate (SDS) Sodium hydroxide (NaOH) และ EDTA พบว่า

- การศึกษาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้สารเคมี 3 ชนิดร่วมกัน ได้แก่ SDS ความเข้มข้น เท่ากับ 0.5 นอร์มัล NaOH ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 นอร์มัลและ EDTA ความเข้มข้น เท่ากับ 0.05 นอร์มัล พบว่ามีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงที่สุด โดยมีค่า FR และ RR เท่ากับ 95% และ 55% ตามลำดับรองลงมาคือ SDS NaOH และ EDTA ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความคงตัวสูงได้ แต่จากการศึกษาพบว่า เมมเบรนยังเกิดการอุดตันได้ง่าย และฟลักซ์ในการกรองน้ำที่ได้มีอัตราการกรองน้ำที่ต่ำ จึงควรปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของน้ำมันสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดย

- ปรับปรุงขนาดของรูพรุนของเมมเบรนให้มีขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.12 ไมโครเมตรซึ่งทำให้ระบบเกิดการอุดตันเร็วและฟลักซ์ในการกรองน้ำต่ำ ดังนั้นการเพิ่มขนาดรูพรุนของเมมเบรนอาจช่วยลดปัญหาการอุดตันและเพิ่มฟลักซ์ในการกรองน้ำได้
- ปรับปรุงระบบโดยอาจมีการเพิ่มกระบวนการบำบัดขั้นต้น เช่น การติดตั้งตะแกรงกรองก่อนนำน้ำเสียเข้าระบบ เพื่อเป็นการป้องกันอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ไม่ให้ปนเปื้อนสู่ระบบ อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหาการอุดตันที่เกิดขึ้นจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ได้
- ประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการทางกายภาพอื่นๆ เช่น กระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการอิเล็กโตรโคแอกกูเลชัน เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กชกร ก้องกังวาลย์. 2552. การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชันทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธันท์ เฉลิมสินสุวรรณ. 2552. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและไฮโน-เฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา. 2552. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- ปฏิรูป ผลจันทร์. การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำโดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประจักษ์ ศาสตรเวช. 2551. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิวิชแออร์โฟลเทชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศน์. 2539. วิศวกรรมประปาเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาวิตรี จันทรานุรักษ์. 2546. กระบวนการแยกเชิงกลในอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- สุดสิริ รัฐสุภวัฒน์. 2552. การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิลเล็กโทสตาติกโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรารักษ์ อวนถวน. 2552. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นแปรรูปโลหะด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศร่วมกับกระบวนการโคแอกูเลชัน และ แนวคิดการใช้ฟองอากาศเคลือบน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

ภาษาอังกฤษ

- Al-Jeshia, S., Neville, A. 2008. An experimental evaluation of reverse osmosis membrane performance in oily water. Desalination. 228: 287–294.
- Ahmad, A.L., Sumathi, S. and Hameed, B.H. Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. Chemical Engineering Journal 118 (2006) : 99-105.
- American Water Works Association. 2005. 21th ed. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
- Anderson, J.E., Kim, B.R., Mueller, S.A. and Lofton, T.V. 2003. Composition and analysis of Mineral Oils and Other Organic Compounds in Metalworking and Hydraulic Fluids. Environmental Science and Technology 33: 73-109.
- Aurelle, Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok : Chulalongkorn.
- Belkacem, M., Hadjiev D., Aurelle, Y. 1993. A model for calculating the steady state flux of organic ultrafiltration membranes for the case of cutting oil emulsions. The Chemical Engineering Journal. 56: 27-32.

- Bensadok, K., Belkacem, M., Nezzal, G. 2007. Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation. Desalination. 206: 440–448.
- Chen, W., Peng, J., Su, Y., Zheng, L., Wang, L. and Jiang, Z. 2009. Separation of oil/water emulsion using Pluronic F127 modified polyethersulfone ultrafiltration membranes. Separation and Purification Technology 66: 591-597.
- Cheryan, M. 1998. Ultrafiltration and Microfiltration Handbook. 2nd ed. Technomic publish Co. Lancaster. USA.
- Cho, J., Amy, G., Pellegrino, J. 2000. Membrane filtration of natural organic matter: factors and mechanisms affecting rejection and flux decline with charged ultrafiltration (UF) membrane. Journal of Membrane Science. 164: 89–110.
- Glater, J., Hong, S., Elimelech, M. 1994. The search for a chlorine-resistant reverse osmosis Membrane. Desalination. 95: 325-345.
- Hermia, J. 1982. Constant pressure blocking filtration laws-application to power-law non-Newtonian fluids. Trans IChemE. 60: 183-187.
- Hong, S., Ron, Faibish, R.S., Elimelech, M. 1997. Kinetics of Permeate Flux Decline in Crossflow Membrane Filtration of Colloidal Suspensions. Journal of colloid and Interface. 196: 267–277.
- Hoyo, P. D., Moure, F., Rendueles, M., Diaz, M. 2007. Demineralization of animal blood plasma by ion exchange and ultrafiltration. Meat Science. 76: 402–410.
- Kajitvichyankul P., Hung Y. and Wang L. 2006. Oil water Separation. Handbook of Environmental Engineering. 4: 521-548.
- Katsoufidou, K., Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J. 2008. An experimental study of UF membrane fouling by humic acid and sodium alginate solutions: the effect of backwashing on flux recovery. Desalination. 220: 214–227.
- Kazemimoghadam, M. and Mohammadi, T. 2007. Chemical cleaning of ultrafiltration membranes in the milk industry. Desalination. 204: 213-218.
- Lim, Y., P. and Mohammad, A., W. 2010. Effect of solution chemistry on flux decline during high concentration protein ultrafiltration through a hydrophilic membrane. Chemical Engineering Journal 159: 91-97.

- Kennedy, M.D., Kamanyia, J., Heijman, B.G.J., Amy, G. 2008. Colloidal organic matter fouling of UF membranes: role of NOM composition & size. Desalination. 220: 200–213.
- Metcalf & Eddy, Inc. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4th ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Mimoune, S., Amrani, Farouk. Experimental study of metal ions removal from aqueous solutions by complexation–ultrafiltration. 2007. Journal of Membrane Science. 298: 92–98.
- Perez, M., Rodriguez-Cano, R., Romero, L. I., Sales, D. 2007. Performance of anaerobic thermophilic fluidized bed in the treatment of cutting-oil wastewater. Bioresource Technology. 98: 3456-3463.
- Portela, J. R., López, J., Nebot, E., Martínez de la Ossa, E. 2001. Elimination of cutting oil wastes by promoted hydrothermal oxidation. Journal of Hazardous Materials. B88 : 95–106.
- Rachu, S. 2005. Computer program development for oily wastewater treatment process selection, design and simulation. Doctoral dissertation Department of Environment The Institut National des Sciences Appliquées of Toulouse.
- Reynolds, T.D., and Richards, P.A. 1996. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering. 2nd ed. Boston: PWS Publishing.
- Ri'os, G., Pazos, C., Coca, J. 1998. Destabilization of cutting oil emulsions using inorganic salts as coagulants. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 138: 383–389.
- Rosen M.J. 1989. Surfactants and Interfacial Phenomena. 2nd ed. New York : John Wiley&Son.
- Salahi, A., Abbasi, M. and Mohammadi, T. 2010. Permeate flux decline during UF of oily wastewater: Experimental and modeling. Desalination. 251: 153-160.
- Sayed Razavi, S., K., Harris, J., L. and Sherkat, F. 1996. Fouling and cleaning of membranes in the ultrafiltration of the aqueous extract of soy flour. Journal of membrane science. 114: 93-104.

Water Quality Division Aquifer Protection Program. 1996. BADCT Guidance document for Pretreatment with oil/water separators draft. Arizona: Arizona Department of Environmental Quality.

World Health Organization. 2006. Guidelines for drinking-water quality. vol. 1. Geneva: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ก



ภาพที่ ก-1 ถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชั่น



ภาพที่ ก-2 เครื่องสูบน้ำชนิดหยอโขง (Centrifugal Pump)

ภาคผนวก ก (ต่อ)



ภาพที่ ก-3 เครื่องปั่นกวนน้ำ (Motor stirrer)



ภาพที่ ก-4 เครื่องชั่งดิจิตอลแบบละเอียด

ภาคผนวก ก (ต่อ)



ภาพที่ ก-5 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Water flowMeter)



ภาพที่ ก-6 อุปกรณ์วัดแรงดัน

ภาคผนวก ก (ต่อ)



ภาพที่ ก-7 การติดตั้งชุดการทดลองกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ภาคผนวก ข
รายงานผลการทดลอง
ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด
สังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0	0
0.5	7.89
1	33.5
1.5	46.33
2	6.96
2.5	1.63
3	1.39
3.5	1.44
4.5	0.86
5	0
5.5	0
6	0
6.5	0

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ตารางที่ ข-2 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม
สังเคราะห์ความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0	0
1	0
2	7.83
3	46.54
4	29.08
5	10.73
6	3.37
7	2.45
8	0
9	0
10	0

ภาคผนวก ค

รายงานผลการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ภาคผนวก ค

ตารางที่ค-1 ตารางเพอมีเอทฟลักซ์เมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อน
ตัดความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร และ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 5 กรัม/
ลิตร เมื่อเดินระบบโดยใช้ความดัน 2.5 บาร์ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เวลา (นาที)	J/J ₀ ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	
	น้ำมันตัด 1 กรัม/ลิตร	น้ำมันปาล์ม 5 กรัม/ลิตร
0	1	1
5	0.71	0.44
10	0.68	0.41
15	0.66	0.39
20	0.62	0.37
25	0.59	0.36
30	0.57	0.35
35	0.55	0.34
40	0.53	0.33
45	0.51	0.32
50	0.50	0.31
55	0.48	0.31
60	0.47	0.30
65	0.46	0.29
70	0.45	0.29
75	0.44	0.29
80	0.43	0.28
85	0.42	0.28
90	0.41	0.28

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1 ตารางเพอมีเอทฟลักซ์เมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อน
ตัดความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร และ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 5 กรัม/
ลิตร เมื่อเดินระบบโดยใช้ความดัน 2.5 บาร์ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	J/J ₀ ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	
	น้ำมันตัด 1 กรัม/ลิตร	น้ำมันปาล์ม 5 กรัม/ลิตร
95	0.41	0.27
100	0.40	0.27
105	0.39	0.27
110	0.38	0.27
115	0.37	0.27
120	0.37	0.27

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-2 ตารางผลการศึกษาค่าความขุ่นและซีไอดีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการอัลตราฟิльтраชัน

เวลา (นาที)	CODของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน		ความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	
	น้ำมันตัด 1 กรัม/ลิตร	น้ำมันปาล์ม 5 กรัม/ลิตร	น้ำมันตัด 1 กรัม/ลิตร	น้ำมันปาล์ม 5 กรัม/ลิตร
0	4260	21639	1240	2938
15	228	4131	24.2	30
30	192	4328	11.8	5.6
45	174	4328	6.9	5.1
60	156	3934	5.3	4.7
75	156	4328	2.7	2.4
90	120	3934	1.8	1.5
105	120	3541	1.4	1.6
120	120	3934	0.9	1.4

ตารางที่ ค-3 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี ทีไอซี และปริมาณไขมันและน้ำมันของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

พารามิเตอร์	น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	น้ำเสียเข้า	น้ำเพอมีเอท	ประสิทธิภาพ
บีโอดี	น้ำมันตัด 1 กรัม/ลิตร	2542	75	97.05
	น้ำมันปาล์ม 5 กรัม/ลิตร	12289	2179	82.27
ทีไอซี	น้ำมันตัด 1 กรัม/ลิตร	619	42	93.21
	น้ำมันปาล์ม 5 กรัม/ลิตร	985	163	83.45
ปริมาณไขมัน และน้ำมัน	น้ำมันตัด 1 กรัม/ลิตร	368	4	98.91
	น้ำมันปาล์ม 5 กรัม/ลิตร	754	3	99.60

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-4 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเพอมีเอทที่ผ่าน
กระบวนการอัลตราฟิเตรชัน

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0	0
0.5	74.8
1	23.2
1.5	2
2	0
2.5	0
3	0
3.5	0
4.5	0
5	0

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-5 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันปาล์มในน้ำเพอมีเอทที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0	0
0.5	7.23
1	87.76
1.5	5.13
2	0
2.5	0
3	0
3.5	0
4.5	0
5	0

ภาคผนวก ค(ต่อ)

ตารางที่ ค-6 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำรีเทนเททที่ผ่าน
กระบวนการอัลตราฟิเตรชัน

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0	0
0.5	2.14
1	17.69
1.5	23.82
2	39.71
2.5	6.73
3	4.31
3.5	2.89
4.5	1.57
5	0.74
5.5	0.41
6	0
6.5	0
7	0

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-7 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันปาล์มในน้ำรีเทนเททท์ที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0	0
1	1.26
2	9.54
3	18.18
4	33.56
5	19.15
6	10.73
7	6.59
8	1.08
9	0
10	0

ภาคผนวก ง
รายงานผลการทดลอง
การศึกษสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน
ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง-1 ตารางเพอมีเอทพลักซ์เมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนคัต
ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อ
เดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เวลา (นาที)	J_i/J_{wi}											
	น้ำมันคัต ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันคัต ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันคัต ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0.61	0.62	0.66	0.71	0.39	0.41	0.49	0.52	0.33	0.39	0.45	0.46
10	0.59	0.59	0.63	0.68	0.36	0.40	0.43	0.50	0.30	0.36	0.41	0.42
15	0.57	0.55	0.60	0.66	0.33	0.38	0.40	0.45	0.29	0.33	0.39	0.40
20	0.55	0.51	0.56	0.62	0.32	0.36	0.39	0.41	0.28	0.32	0.37	0.38
25	0.53	0.49	0.53	0.59	0.30	0.35	0.38	0.38	0.26	0.31	0.36	0.35
30	0.55	0.47	0.51	0.57	0.29	0.33	0.36	0.36	0.26	0.30	0.34	0.33
35	0.53	0.45	0.49	0.55	0.28	0.32	0.35	0.34	0.25	0.29	0.33	0.31
40	0.52	0.44	0.47	0.53	0.27	0.31	0.33	0.32	0.25	0.29	0.32	0.30
45	0.50	0.42	0.46	0.51	0.26	0.30	0.32	0.31	0.25	0.28	0.31	0.29
50	0.49	0.41	0.44	0.50	0.25	0.29	0.31	0.30	0.24	0.27	0.30	0.28
55	0.48	0.39	0.43	0.48	0.25	0.28	0.30	0.29	0.24	0.27	0.29	0.28
60	0.46	0.38	0.42	0.47	0.25	0.28	0.29	0.29	0.24	0.27	0.29	0.27
65	0.45	0.37	0.41	0.46	0.24	0.27	0.28	0.28	0.24	0.26	0.28	0.27
70	0.44	0.36	0.39	0.45	0.24	0.26	0.28	0.28	0.24	0.26	0.28	0.27
75	0.42	0.35	0.39	0.44	0.24	0.26	0.27	0.27	0.24	0.26	0.27	0.26
80	0.41	0.34	0.37	0.43	0.24	0.26	0.27	0.27	0.23	0.26	0.27	0.26
85	0.40	0.34	0.36	0.42	0.24	0.25	0.26	0.27	0.23	0.26	0.27	0.26
90	0.39	0.33	0.35	0.41	0.24	0.25	0.26	0.26	0.23	0.25	0.27	0.26

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-1 ตารางเพอมีเอทฟลักซ์เมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัด ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	J_f/J_{wi}											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
95	0.38	0.32	0.34	0.41	0.23	0.25	0.26	0.26	0.23	0.25	0.26	0.25
100	0.37	0.31	0.34	0.40	0.23	0.24	0.25	0.26	0.23	0.25	0.26	0.25
105	0.36	0.31	0.33	0.39	0.23	0.24	0.25	0.26	0.23	0.25	0.26	0.25
110	0.35	0.30	0.32	0.38	0.23	0.24	0.25	0.25	0.23	0.25	0.26	0.25
115	0.35	0.30	0.31	0.37	0.23	0.24	0.25	0.25	0.23	0.25	0.26	0.25
120	0.34	0.29	0.31	0.37	0.23	0.24	0.24	0.25	0.23	0.25	0.26	0.25

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-2 ตารางผลการศึกษาค่าซีไอดีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เวลา (นาที)	J/J_{wi}											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
0	3978	3914	3766	4260	33830	35077	35294	36632	51789	48791	49119	53400
15	124	141	166	228	357	388	353	366	442	409	454	444
30	124	122	128	192	223	258	218	234	158	270	342	282
45	104	103	109	174	185	222	180	196	139	191	249	246
60	85	83	89	156	89	129	141	177	120	152	174	246
75	65	83	89	156	70	111	122	158	120	132	174	210
90	46	45	89	120	89	129	122	139	82	132	155	174
105	46	45	89	120	70	111	122	120	82	132	155	174
120	46	45	89	120	70	111	122	120	82	132	155	174

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-3 ตารางผลการศึกษาความชุ่มชื้นในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เวลา (นาที)	J/J_{wi}											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
0	1120	1424	1386	1240	14420	12480	12560	13480	26480	25420	25780	26100
15	12.6	14.6	22.4	24.2	30	46.0	50.1	48.7	58.2	62.1	64.6	66.7
30	6.6	12.8	10.6	11.8	12.4	14.3	16.2	18.5	20.3	30.4	28.7	32.8
45	4.7	6.4	5.4	6.9	6.5	8.3	10.1	11.4	14.9	16.5	18.5	22.5
60	2.8	3.2	4.2	5.3	5.6	6.7	7.8	8.2	11.2	13.2	14.4	16.2
75	2.0	2.6	2.2	2.7	5	4.2	5.4	6.4	8.8	10.7	11.6	10.9
90	1.8	2.0	1.6	1.8	2.1	2.8	3.2	3.8	3.6	6.5	8.2	9.1
105	0.9	1.1	1.2	1.4	1.4	2.1	2.2	2.4	2.9	4.2	5.5	6.7
120	0.4	0.8	1.1	0.9	0.8	1.4	1.8	2.0	1.6	2.8	3.1	4.2

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-4 ตารางขนาดอนุภาคเฉลี่ยในน้ำเพอมีเอทที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (กรัม/ลิตร)	ความดัน (บาร์)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
1	1	0.59
1	1.5	0.62
1	2	0.65
1	2.5	0.64
10	1	0.64
10	1.5	0.64
10	2	0.66
10	2.5	0.69
20	1	0.56
20	1.5	0.59
20	2	0.63
20	2.5	0.64

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-5 ตารางประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

ความเข้มข้น ความดัน ประสิทธิภาพ	น้ำมันตัด											
	ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
บีโอดีเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร)	2358	2446	2461	2542	24120	23790	24510	24730	31690	32140	32280	32840
บีโอดีออก (มิลลิกรัม/ลิตร)	34	38	54	75	42	64	75	75	54	75	80	88
%การบำบัด บีโอดี	98.56	98.45	97.81	97.05	99.83	99.73	99.69	99.70	99.83	99.77	99.75	99.73

ตารางที่ ง-6 ตารางประสิทธิภาพการบำบัดทีโอดีในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

ความเข้มข้น ความดัน ประสิทธิภาพ	น้ำมันตัด											
	ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
ทีโอดีเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร)	640	632	658	619	5480	5210	5325	5545	14700	15480	15590	16780
ทีโอดีออก (มิลลิกรัม/ลิตร)	30	35	39	42	186	198	212	214	480	512	548	583
%การบำบัด ทีโอดี	95.31	94.46	94.07	93.21	96.61	96.20	96.02	96.14	96.73	96.69	96.48	96.53

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-7 ตารางประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันไขมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

ความเข้มข้น ความดัน ประสิทธิภาพ	น้ำมันตัด											
	ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
ไขมันน้ำมันเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร)	368	368	368	368	2640	2640	2640	2640	5140	5140	5140	5140
ไขมันน้ำมันออก (มิลลิกรัม/ลิตร)	3	3	4	4	8	8	10	10	8	10	10	15
%การบำบัด ไขมันน้ำมัน	99.18	99.18	98.91	98.91	99.70	99.70	99.62	99.62	99.84	99.81	99.81	99.71

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-8 ตารางเพอมีเอทพลักซ์เมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนตัด ภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

เวลา (นาที)	J_f/J_{wi}		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
0	1.00	1.00	1.00
5	0.71	0.72	0.76
10	0.68	0.68	0.75
15	0.66	0.64	0.73
20	0.62	0.61	0.72
25	0.59	0.59	0.71
30	0.57	0.58	0.70
35	0.55	0.56	0.69
40	0.53	0.55	0.67
45	0.51	0.54	0.66
50	0.50	0.52	0.65
55	0.48	0.51	0.64
60	0.47	0.50	0.63
65	0.46	0.49	0.62
70	0.45	0.48	0.60
75	0.44	0.47	0.59
80	0.43	0.46	0.58
85	0.42	0.45	0.57
90	0.41	0.44	0.56

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-9 ตารางเพอมีเอทฟลักซ์เมื่อผ่านกระบวนการอัตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำตาล ภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำตาล = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์ (ต่อ)

เวลา (นาที)	J_f/J_{wi}		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
95	0.41	0.44	0.55
100	0.40	0.43	0.54
105	0.39	0.42	0.53
110	0.38	0.41	0.52
115	0.37	0.40	0.51
120	0.37	0.39	0.50

ตารางที่ ง-10 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและความขุ่นในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำตาลของกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำตาล = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

พารามิเตอร์	ซีโอดี			ความขุ่น		
	0.1 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที	0.1 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
น้ำเสียเข้า	4260	4310	4276	1240	1160	1246
น้ำเพอมีเอท	120	164	185	0.9	2.8	4.3
%การบำบัด	97.18	96.19	95.67	99.93	99.76	99.65

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-11 ประสิทธิภาพการบำบัดปิโตรเลียมที่ไอซีและน้ำมันไขมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอัตราฟิลเตรชันภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

พารามิเตอร์	บีโอดี ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน			ทีโอดี ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน			ปริมาณไขมันและน้ำมัน ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน		
	0.1 เมตร/ วินาที	0.17 เมตร/ วินาที	0.24 เมตร/ วินาที	0.1 เมตร/ วินาที	0.17 เมตร/ วินาที	0.24 เมตร/ วินาที	0.1 เมตร/ วินาที	0.17 เมตร/ วินาที	0.24 เมตร/ วินาที
น้ำเสียเข้า	2542	2160	1950	619	746	870	368	368	368
น้ำเพอมีเอท	75	98	105	42	60	105	4	4	5
%การบำบัด	97.05	95.46	94.62	93.21	91.96	87.93	98.91	98.91	98.64

ภาคผนวก จ
รายงานผลการทดลอง
การศึกษาลักษณะการเกิดฟาวลิงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ-1 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการดูดตันอย่างสมบูรณ์ของ Hermia ($\ln(J_t) = \ln(J_{wi}) - K_b t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตรา-ฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เวลา (นาที)	$\ln(J_t)$											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
0	4.38	4.63	4.86	5.02	4.37	4.64	4.86	5.03	4.39	4.64	4.87	5.02
5	3.82	4.16	4.45	4.68	3.43	3.75	4.16	4.37	3.29	3.69	4.07	4.25
10	3.78	4.09	4.40	4.64	3.36	3.75	4.02	4.33	3.19	3.61	3.98	4.16
15	3.74	4.03	4.35	4.60	3.27	3.71	3.96	4.22	3.14	3.54	3.93	4.11
20	3.71	3.96	4.29	4.54	3.22	3.66	3.91	4.13	3.10	3.50	3.88	4.05
25	3.68	3.91	4.23	4.50	3.17	3.62	3.88	4.06	3.05	3.47	3.85	3.97
30	3.71	3.87	4.19	4.45	3.12	3.58	3.84	4.00	3.03	3.44	3.81	3.90
35	3.68	3.84	4.15	4.42	3.08	3.54	3.81	3.94	3.01	3.41	3.76	3.86
40	3.65	3.81	4.11	4.39	3.04	3.51	3.76	3.89	2.99	3.39	3.72	3.82
45	3.62	3.77	4.08	4.35	3.02	3.47	3.72	3.86	2.98	3.37	3.69	3.79
50	3.59	3.73	4.05	4.33	3.00	3.44	3.68	3.83	2.97	3.35	3.66	3.76
55	3.56	3.70	4.02	4.30	2.98	3.40	3.65	3.80	2.97	3.33	3.64	3.74
60	3.54	3.66	3.99	4.27	2.97	3.37	3.62	3.78	2.96	3.32	3.62	3.72
65	3.51	3.63	3.96	4.24	2.96	3.35	3.60	3.76	2.95	3.31	3.61	3.71
70	3.47	3.60	3.93	4.21	2.95	3.33	3.57	3.74	2.94	3.30	3.59	3.69
75	3.44	3.58	3.91	4.20	2.94	3.31	3.56	3.73	2.94	3.29	3.58	3.68
80	3.41	3.56	3.88	4.18	2.93	3.29	3.54	3.71	2.93	3.28	3.57	3.67
85	3.39	3.54	3.85	4.16	2.93	3.28	3.52	3.70	2.93	3.27	3.56	3.66
90	3.36	3.52	3.83	4.14	2.92	3.26	3.51	3.69	2.93	3.27	3.55	3.66

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-1 ตารางการวิเคราะห์กลไกการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการดูดตันอย่างสมบูรณ์ของ Hermia ($\ln(J_p) = \ln(J_{wi}) - K_b t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตรา-ฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	Ln(J _p)											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
95	3.33	3.49	3.80	4.12	2.92	3.25	3.50	3.68	2.93	3.26	3.54	3.65
100	3.31	3.47	3.77	4.10	2.91	3.24	3.49	3.67	2.93	3.26	3.54	3.64
105	3.29	3.45	3.75	4.07	2.91	3.23	3.48	3.66	2.92	3.25	3.53	3.63
110	3.27	3.43	3.73	4.05	2.91	3.22	3.47	3.65	2.92	3.25	3.52	3.63
115	3.25	3.41	3.70	4.04	2.90	3.21	3.46	3.65	2.92	3.24	3.52	3.62
120	3.23	3.39	3.68	4.02	2.90	3.21	3.45	3.64	2.92	3.24	3.51	3.62

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-2 ตารางการวิเคราะห์กลไกการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบไม่สมบูรณ์ของ Hermia ($1/J_f = 1/J_{wi} + K_f t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เวลา (นาที)	$1/J_f$											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
0	0.013	0.010	0.008	0.007	0.013	0.010	0.008	0.007	0.012	0.010	0.008	0.007
5	0.022	0.016	0.012	0.009	0.032	0.023	0.016	0.013	0.037	0.025	0.017	0.014
10	0.023	0.017	0.012	0.010	0.035	0.023	0.018	0.013	0.041	0.027	0.019	0.016
15	0.024	0.018	0.013	0.010	0.038	0.024	0.019	0.015	0.043	0.029	0.020	0.016
20	0.025	0.019	0.014	0.011	0.040	0.026	0.020	0.016	0.045	0.030	0.021	0.017
25	0.025	0.020	0.014	0.011	0.042	0.027	0.021	0.017	0.047	0.031	0.021	0.019
30	0.025	0.021	0.015	0.012	0.044	0.028	0.021	0.018	0.049	0.032	0.022	0.020
35	0.025	0.021	0.016	0.012	0.046	0.029	0.022	0.019	0.049	0.033	0.023	0.021
40	0.026	0.022	0.016	0.012	0.048	0.030	0.023	0.020	0.050	0.034	0.024	0.022
45	0.027	0.023	0.017	0.013	0.049	0.031	0.024	0.021	0.051	0.035	0.025	0.023
50	0.028	0.024	0.017	0.013	0.050	0.032	0.025	0.022	0.051	0.035	0.026	0.023
55	0.028	0.025	0.018	0.014	0.051	0.033	0.026	0.022	0.051	0.036	0.026	0.024
60	0.029	0.026	0.019	0.014	0.051	0.034	0.027	0.023	0.052	0.036	0.027	0.024
65	0.030	0.026	0.019	0.014	0.052	0.035	0.027	0.023	0.052	0.037	0.027	0.025
70	0.031	0.027	0.020	0.015	0.052	0.036	0.028	0.024	0.053	0.037	0.028	0.025
75	0.032	0.028	0.020	0.015	0.053	0.037	0.029	0.024	0.053	0.037	0.028	0.025
80	0.033	0.028	0.021	0.015	0.053	0.037	0.029	0.024	0.053	0.038	0.028	0.025
85	0.034	0.029	0.021	0.016	0.053	0.038	0.029	0.025	0.053	0.038	0.028	0.026
90	0.035	0.030	0.022	0.016	0.054	0.038	0.030	0.025	0.053	0.038	0.029	0.026

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-2 ตารางการวิเคราะห์กลไกการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบไม่สมบูรณ์ของ Hermia ($1/J_f = 1/J_{wi} + Kt$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	$1/J_f$											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
95	0.036	0.030	0.022	0.016	0.054	0.039	0.030	0.025	0.054	0.038	0.029	0.026
100	0.037	0.031	0.023	0.017	0.054	0.039	0.031	0.025	0.054	0.039	0.029	0.026
105	0.037	0.032	0.024	0.017	0.054	0.040	0.031	0.026	0.054	0.039	0.029	0.026
110	0.038	0.032	0.024	0.017	0.055	0.040	0.031	0.026	0.054	0.039	0.029	0.027
115	0.039	0.033	0.025	0.018	0.055	0.040	0.031	0.026	0.054	0.039	0.030	0.027
120	0.040	0.034	0.025	0.018	0.055	0.041	0.032	0.026	0.054	0.039	0.030	0.027

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-3 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบธรรมดาของ Hermia ($1/J_f^{1/2} = 1/J_{wi}^{1/2} + K_s t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เวลา (นาที)	$1/J_f^{1/2}$											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
0	0.112	0.099	0.088	0.081	0.113	0.098	0.088	0.081	0.112	0.098	0.088	0.081
5	0.148	0.125	0.108	0.096	0.180	0.153	0.125	0.112	0.193	0.158	0.131	0.120
10	0.151	0.129	0.111	0.098	0.187	0.153	0.134	0.115	0.202	0.164	0.137	0.125
15	0.154	0.134	0.113	0.100	0.195	0.156	0.138	0.121	0.208	0.170	0.141	0.128
20	0.157	0.138	0.117	0.103	0.200	0.160	0.141	0.127	0.212	0.174	0.143	0.132
25	0.159	0.141	0.120	0.106	0.205	0.163	0.143	0.131	0.217	0.177	0.146	0.138
30	0.157	0.144	0.123	0.108	0.211	0.167	0.146	0.136	0.220	0.179	0.149	0.142
35	0.159	0.146	0.126	0.110	0.215	0.170	0.149	0.139	0.222	0.182	0.153	0.145
40	0.161	0.149	0.128	0.112	0.218	0.173	0.152	0.143	0.224	0.184	0.156	0.148
45	0.164	0.152	0.130	0.113	0.221	0.176	0.156	0.145	0.225	0.186	0.158	0.151
50	0.166	0.155	0.132	0.115	0.223	0.179	0.159	0.148	0.226	0.188	0.160	0.152
55	0.168	0.158	0.134	0.117	0.225	0.182	0.161	0.150	0.227	0.189	0.162	0.154
60	0.171	0.160	0.136	0.118	0.227	0.185	0.164	0.151	0.228	0.190	0.163	0.155
65	0.173	0.163	0.138	0.120	0.228	0.187	0.166	0.153	0.229	0.191	0.165	0.157
70	0.176	0.165	0.140	0.122	0.229	0.189	0.167	0.154	0.229	0.192	0.166	0.158
75	0.179	0.167	0.142	0.122	0.230	0.191	0.169	0.155	0.230	0.193	0.167	0.159
80	0.181	0.169	0.144	0.124	0.231	0.193	0.170	0.156	0.231	0.194	0.168	0.159
85	0.184	0.170	0.146	0.125	0.231	0.194	0.172	0.157	0.231	0.195	0.169	0.160
90	0.186	0.172	0.148	0.126	0.232	0.196	0.173	0.158	0.231	0.195	0.169	0.161

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-3 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบธรรมดาของ Hermia ($1/J_f^{1/2} = 1/J_{wi}^{1/2} + K_s t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	$1/J_f$											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
95	0.189	0.174	0.150	0.128	0.232	0.197	0.174	0.159	0.231	0.196	0.170	0.161
100	0.191	0.176	0.152	0.129	0.233	0.198	0.175	0.160	0.232	0.196	0.171	0.162
105	0.193	0.178	0.153	0.130	0.233	0.199	0.176	0.160	0.232	0.197	0.171	0.162
110	0.195	0.180	0.155	0.132	0.234	0.200	0.177	0.161	0.232	0.197	0.172	0.163
115	0.197	0.181	0.157	0.133	0.234	0.201	0.177	0.161	0.232	0.197	0.172	0.163
120	0.199	0.183	0.159	0.134	0.235	0.201	0.178	0.162	0.233	0.198	0.173	0.164

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-4 ตารางการวิเคราะห์กลไกการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบการเกิดชั้นเค้ก ของ Hermia ($1/J_f^2 = 1/J_{wi}^2 + K_c t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

เวลา (นาที)	$1/J_f^2$											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
0	2E-04	1E-04	6E-05	4E-05	2E-04	9E-05	6E-05	4E-05	2E-04	9E-05	6E-05	4E-05
5	5E-04	2E-04	1E-04	9E-05	0.001	6E-04	2E-04	2E-04	0.001	6E-04	3E-04	2E-04
10	5E-04	3E-04	2E-04	9E-05	0.001	6E-04	3E-04	2E-04	0.002	7E-04	4E-04	2E-04
15	6E-04	3E-04	2E-04	1E-04	0.001	6E-04	4E-04	2E-04	0.002	8E-04	4E-04	3E-04
20	6E-04	4E-04	2E-04	1E-04	0.002	7E-04	4E-04	3E-04	0.002	9E-04	4E-04	3E-04
25	6E-04	4E-04	2E-04	1E-04	0.002	7E-04	4E-04	3E-04	0.002	1E-03	5E-04	4E-04
30	6E-04	4E-04	2E-04	1E-04	0.002	8E-04	5E-04	3E-04	0.002	0.001	5E-04	4E-04
35	6E-04	5E-04	2E-04	1E-04	0.002	8E-04	5E-04	4E-04	0.002	0.001	5E-04	4E-04
40	7E-04	5E-04	3E-04	2E-04	0.002	9E-04	5E-04	4E-04	0.003	0.001	6E-04	5E-04
45	7E-04	5E-04	3E-04	2E-04	0.002	1E-03	6E-04	4E-04	0.003	0.001	6E-04	5E-04
50	8E-04	6E-04	3E-04	2E-04	0.002	0.001	6E-04	5E-04	0.003	0.001	7E-04	5E-04
55	8E-04	6E-04	3E-04	2E-04	0.003	0.001	7E-04	5E-04	0.003	0.001	7E-04	6E-04
60	8E-04	7E-04	3E-04	2E-04	0.003	0.001	7E-04	5E-04	0.003	0.001	7E-04	6E-04
65	9E-04	7E-04	4E-04	2E-04	0.003	0.001	8E-04	5E-04	0.003	0.001	7E-04	6E-04
70	1E-03	7E-04	4E-04	2E-04	0.003	0.001	8E-04	6E-04	0.003	0.001	8E-04	6E-04
75	0.001	8E-04	4E-04	2E-04	0.003	0.001	8E-04	6E-04	0.003	0.001	8E-04	6E-04
80	0.001	8E-04	4E-04	2E-04	0.003	0.001	8E-04	6E-04	0.003	0.001	8E-04	6E-04
85	0.001	8E-04	4E-04	2E-04	0.003	0.001	9E-04	6E-04	0.003	0.001	8E-04	7E-04
90	0.001	9E-04	5E-04	3E-04	0.003	0.001	9E-04	6E-04	0.003	0.001	8E-04	7E-04

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-4 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบการเกิดชั้นเค้ก ของ Hermia ($1/J_f^2 = 1/J_{wi}^2 + K_c t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	$1/J_f$											
	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร				น้ำมันตัด ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร			
	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์	1 บาร์	1.5 บาร์	2 บาร์	2.5 บาร์
95	0.001	9E-04	5E-04	3E-04	0.003	0.001	9E-04	6E-04	0.003	0.001	8E-04	7E-04
100	0.001	1E-03	5E-04	3E-04	0.003	0.002	9E-04	6E-04	0.003	0.001	8E-04	7E-04
105	0.001	0.001	6E-04	3E-04	0.003	0.002	1E-03	7E-04	0.003	0.001	9E-04	7E-04
110	0.001	0.001	6E-04	3E-04	0.003	0.002	1E-03	7E-04	0.003	0.002	9E-04	7E-04
115	0.002	0.001	6E-04	3E-04	0.003	0.002	1E-03	7E-04	0.003	0.002	9E-04	7E-04
120	0.002	0.001	6E-04	3E-04	0.003	0.002	0.001	7E-04	0.003	0.002	9E-04	7E-04

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-5 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการดูดตันอย่างสมบูร์กของ Hermia ($\ln(J_t) = \ln(J_{wt}) - K_b t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

เวลา (นาที)	$\ln(J_t)$		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
0	5.02	5.18	5.29
5	4.68	5.18	5.02
10	4.64	5.18	5.00
15	4.60	5.18	4.98
20	4.54	5.18	4.97
25	4.50	5.18	4.95
30	4.45	5.18	4.93
35	4.42	5.18	4.91
40	4.39	5.18	4.90
45	4.35	5.18	4.88
50	4.33	5.18	4.86
55	4.30	5.18	4.84
60	4.27	5.18	4.82
65	4.24	5.18	4.81
70	4.21	5.18	4.78
75	4.20	5.18	4.77
80	4.18	5.18	4.75
85	4.16	5.18	4.73
90	4.14	5.18	4.72

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-5 ตารางการวิเคราะห์หกลไกการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองการอุดตันอย่างสมบูรณ์ของ Hermia ($\ln(J_t) = \ln(J_{wi}) - K_b t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตรา-ฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และความดัน = 2.5 บาร์ (ต่อ)

เวลา (นาที)	$\ln(J_t)$		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
95	4.12	5.18	4.70
100	4.10	5.18	4.68
105	4.07	5.18	4.66
110	4.05	5.18	4.65
115	4.04	5.18	4.63
120	4.02	5.18	4.61

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-6 ตารางการวิเคราะห์กึ่งโลกการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบไม่สมบูรณ์ของ Hermia ($1/J_f = 1/J_{wi} + K_f t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์

เวลา (นาที)	1/J _f		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
0	0.0066	0.0056	0.0050
5	0.0093	0.0056	0.0066
10	0.0097	0.0056	0.0067
15	0.0100	0.0056	0.0069
20	0.0106	0.0056	0.0070
25	0.0111	0.0056	0.0071
30	0.0116	0.0056	0.0072
35	0.0120	0.0056	0.0073
40	0.0125	0.0056	0.0075
45	0.0128	0.0056	0.0076
50	0.0132	0.0056	0.0077
55	0.0136	0.0056	0.0079
60	0.0140	0.0056	0.0080
65	0.0144	0.0056	0.0082
70	0.0148	0.0056	0.0084
75	0.0150	0.0056	0.0085
80	0.0153	0.0056	0.0086
85	0.0156	0.0056	0.0088
90	0.0160	0.0056	0.0089

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-6 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบไม่สมบูรณ์ของ Hermia ($1/J_f = 1/J_{wi} + K_f t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และ ความดัน = 2.5 บาร์ (ต่อ)

เวลา (นาที)	1/J _f		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
95	0.0163	0.0056	0.0091
100	0.0167	0.0056	0.0093
105	0.0170	0.0056	0.0094
110	0.0173	0.0056	0.0096
115	0.0177	0.0056	0.0098
120	0.0180	0.0056	0.0100

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-7 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบธรรมดาของ Hermia ($1/J_f^{1/2} = 1/J_{wi}^{1/2} + K_s t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และความดัน = 2.5 บาร์

เวลา (นาที)	$J_f^{1/2}$		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
0	0.081	0.075	0.071
5	0.096	0.089	0.081
10	0.098	0.091	0.082
15	0.100	0.094	0.083
20	0.103	0.096	0.083
25	0.106	0.097	0.084
30	0.108	0.099	0.085
35	0.110	0.100	0.086
40	0.112	0.101	0.086
45	0.113	0.102	0.087
50	0.115	0.104	0.088
55	0.117	0.105	0.089
60	0.118	0.106	0.090
65	0.120	0.107	0.090
70	0.122	0.108	0.092
75	0.122	0.109	0.092
80	0.124	0.110	0.093
85	0.125	0.111	0.094
90	0.126	0.112	0.095

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-7 ตารางการวิเคราะห์หลักการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบธรรมดาของ Hermia ($1/J_f^{1/2} = 1/J_{wi}^{1/2} + K_s t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และความดัน = 2.5 บาร์ (ต่อ)

เวลา (นาที)	$J_f^{1/2}$		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
95	0.128	0.114	0.095
100	0.129	0.115	0.096
105	0.130	0.116	0.097
110	0.132	0.117	0.098
115	0.133	0.119	0.099
120	0.134	0.120	0.100

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-8 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการดูดตันของเมมเบรนโดยใช้การดูดตันแบบการเกิดชั้นเค้ก ของ Hermia ($1/J_f^2 = 1/J_{wi}^2 + K_c t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และความดัน = 2.5 บาร์

เวลา (นาที)	$1/J_f^2$		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
0	4.37E-05	3.16E-05	2.54E-05
5	8.66E-05	3.16E-05	4.39E-05
10	9.38E-05	3.16E-05	4.55E-05
15	1.00E-04	3.16E-05	4.70E-05
20	1.13E-04	3.16E-05	4.86E-05
25	1.24E-04	3.16E-05	5.03E-05
30	1.35E-04	3.16E-05	5.22E-05
35	1.45E-04	3.16E-05	5.40E-05
40	1.55E-04	3.16E-05	5.58E-05
45	1.65E-04	3.16E-05	5.78E-05
50	1.75E-04	3.16E-05	5.99E-05
55	1.86E-04	3.16E-05	6.22E-05
60	1.96E-04	3.16E-05	6.45E-05
65	2.06E-04	3.16E-05	6.69E-05
70	2.19E-04	3.16E-05	7.04E-05
75	2.25E-04	3.16E-05	7.20E-05
80	2.35E-04	3.16E-05	7.46E-05
85	2.45E-04	3.16E-05	7.73E-05
90	2.55E-04	3.16E-05	8.00E-05

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-8 ตารางการวิเคราะห์หลักไถการอุดตันของเมมเบรนโดยใช้การอุดตันแบบการเกิดชั้นเค้ก ของ Hermia ($1/J_f^2 = 1/J_{wi}^2 + K_c t$) เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และความดัน = 2.5 บาร์ (ต่อ)

เวลา (นาที)	$1/J_f^2$		
	0.10 เมตร/วินาที	0.17 เมตร/วินาที	0.24 เมตร/วินาที
95	2.66E-04	3.16E-05	8.28E-05
100	2.77E-04	3.16E-05	8.58E-05
105	2.89E-04	3.16E-05	8.89E-05
110	3.01E-04	3.16E-05	9.23E-05
115	3.12E-04	3.16E-05	9.59E-05
120	3.23E-04	3.16E-05	9.96E-05

ตารางที่ จ-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบ เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

ความดัน (บาร์)	α (เมตร/กิโลกรัม)			
	น้ำกลั่น	น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด		
		1 กรัม/ลิตร	10 กรัม/ลิตร	20 กรัม/ลิตร
1	5.15E+09	1.20E+13	2.97E+13	4.22E+13
1.5	8.96E+09	1.62E+14	1.98E+14	2.04E+14
2	1.32E+10	2.02E+14	2.12E+14	2.82E+14
2.5	1.71E+10	2.41E+14	2.89E+14	3.70E+14

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_0 กับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบ เมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบและความดันที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที

น้ำเสีย	ความดัน	α	$\ln\alpha$	$\ln\Delta P$
น้ำกลั่น	1	5.15E+09	22.36	0.00
	1.5	8.96E+09	22.92	0.41
	2	1.32E+10	23.30	0.69
	2.5	1.71E+10	23.56	0.92
น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ตัดความเข้มข้น เท่ากับ 1 กรัม/ลิตร	1	1.20E+13	30.12	0.00
	1.5	1.62E+14	32.72	0.41
	2	2.02E+14	32.94	0.69
	2.5	2.41E+14	33.12	0.92
น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ตัดความเข้มข้น เท่ากับ 10 กรัม/ลิตร	1	2.97E+13	31.02	0.00
	1.5	1.98E+14	32.92	0.41
	2	2.12E+14	32.99	0.69
	2.5	2.89E+14	33.30	0.92
น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ตัดความเข้มข้น เท่ากับ 20 กรัม/ลิตร	1	4.22E+13	31.37	0.00
	1.5	2.04E+14	32.95	0.41
	2	2.82E+14	33.27	0.69
	2.5	3.70E+14	33.54	0.92

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบเมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และความดัน = 2.5 บาร์

ความเร็ว (เมตร/วินาที)	α (เมตร/กิโลกรัม)	
	น้ำกลั่น	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร
0.1	1.71E+10	2.41E+14
0.17	1.71E+10	2.04E+14
0.24	1.71E+10	9.98E+12

ตารางที่ จ-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R กับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบเมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และความดัน = 2.5 บาร์

ความดัน (บาร์)	น้ำกลั่น R_m	1 กรัม/ลิตร		10 กรัม/ลิตร		20 กรัม/ลิตร	
		R (เมตร ⁻¹)		R (เมตร ⁻¹)		R (เมตร ⁻¹)	
		R	R_f	R	R_f	R	R_f
1	4.84E+12	6.06E+12	1.22E+12	1.76E+13	1.27E+13	1.66E+13	1.18E+13
1.5	5.25E+12	7.62E+12	2.37E+12	1.88E+13	1.35E+13	1.98E+13	1.45E+13
2	5.54E+12	8.79E+12	3.25E+12	1.92E+13	1.36E+13	2.03E+13	1.48E+13
2.5	5.93E+12	1.22E+13	6.28E+12	2.05E+13	1.46E+13	2.20E+13	1.61E+13

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_f กับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและความดันที่ใช้ในการเดินระบบเมื่อใช้กระบวนการอัตราฟิลเตรชันบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนตัดภายใต้สภาวะความเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด = 1 กรัม/ลิตร และความดัน = 2.5 บาร์

ความเร็ว (เมตร/วินาที)	น้ำกลั่น R_m	น้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร	
		R_f (เมตร ⁻¹)	
		R	R_f
0.1	5.93E+12	1.22E+13	6.28E+12
0.17	5.93E+12	1.10E+13	5.06E+12
0.24	5.93E+12	6.11E+12	1.78E+11

ภาคผนวก ช
ศึกษาความเป็นไปได้ในการทำความสะอาดและเพิ่มอายุการใช้งาน
ของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ภาคผนวก ช

ตารางที่ ช-1 ตารางค่า FR ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำความสะอาดเมมเบรน

สารทำความสะอาด	J_{wc}	J_{ww}	J_{wi}	FR(%)
น้ำสะอาด	58.97	58.97	149.23	0.00
SDS 0.25N	82.78	58.97	149.23	26.38
SDS 0.5N	96.74	58.69	151.04	41.21
SDS 1N	192.36	60.15	148.48	149.67
NaOH 0.05N	76.77	60.74	151.68	17.62
NaOH 0.1N	91.94	59.07	149.23	36.46
NaOH 0.25 N	204.57	60.15	150.55	159.76
EDTA 0.005 N	79.92	60.93	150.90	21.10
EDTA 0.01N	88.84	60.10	150.62	31.75
EDTA 0.05N	199.12	58.97	150.39	153.30
SDS 0.5 N+ NaOH 0.05 N+ EDTA 0.01 N	147.12	60.81	150.89	95.82

ภาคผนวก ช

ตารางที่ ช-2 ตารางค่า RR ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำความสะอาดเมมเบรน

สารทำความสะอาด	R_f	R_c	RR%
น้ำสะอาด	1.19E+13	1.17E+13	2.05
SDS 0.25 N	1.19E+13	1.07E+13	10.26
SDS 0.5 N	1.17E+13	7.26E+12	37.71
SDS 1 N	1.14E+13	3.60E+12	68.55
NaOH 0.05 N	1.12E+13	1.07E+13	4.37
NaOH 0.1 N	1.09E+13	8.48E+12	22.36
NaOH 0.25 N	1.19E+13	1.81E+12	84.78
EDTA 0.005 N	1.12E+13	1.07E+13	4.37
EDTA 0.01 N	1.12E+13	1.02E+13	8.75
EDTA 0.05 N	1.12E+13	8.81E+11	92.11
SDS 0.5 N+ NaOH 0.05 N+ EDTA 0.01 N	1.09E+13	4.94E+12	54.78

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปุกนทรีย์ เขียวภักดี เกิดวันที่ 1 มีนาคมพ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้นทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ธุรการ บริษัทโทโฮกุ ไฟโอเนียร์ (ประเทศไทย) จำกัด เป็นระยะเวลา 2 ปี ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2552