

กระบวนการโคอะเลสเซอร์ร่วมกับกระบวนการเมมเบรนสำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจาก
ชุมชน



นายชินวัฒน์ ชัยกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Combined process of coalescer and membrane for treatment of domestic oily
wastewater

Mr. Chinnawat Chaiyakool



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการโคอะเลสเซอร์ร่วมกับกระบวนการเมมเบรน สำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากชุมชน
โดย	นายชินวัฒน์ ชัยกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. ณิชวีญญ์ ขวเลิศพรศิยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวลาภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. ณิชวีญญ์ ขวเลิศพรศิยา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยวงค์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. มรุตพัชร จำนงค์วงศ์)

ชินวัฒน์ ชัยกุล : กระบวนการโคอะเลสเซอร์ร่วมกับกระบวนการเมมเบรนสำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากชุมชน (Combined process of coalescer and membrane for treatment of domestic oily wastewater) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. พิสุทธิเพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ญัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา, 147 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากชุมชนด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน การทดลองใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 0.5-2 กรัมต่อลิตร ใช้ตัวกลางพอลิโพรไพลีนแบบทรงกระบอกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร บรรจุในชั้นตัวกลางที่มีความหนา 3-10 เซนติเมตร เติกระบบโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งและแนวนอนเป็นเวลา 120 นาที ด้วยความเร็วการไหล 6.1-18.9 เมตรต่อชั่วโมง จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปร พบว่า การเพิ่มความเร็วการไหลทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ทั้ง 2 แบบลดลง และการเพิ่มความหนาชั้นตัวกลางส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเฉพาะในโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งเท่านั้น โดยสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของโคอะเลสเซอร์ในการศึกษานี้ คือ ความเร็วการไหลของน้ำเสียที่ 6.1 เมตรต่อชั่วโมง และความหนาชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง 10 เซนติเมตร และแนวนอน 3 เซนติเมตร กระบวนการโคอะเลสเซอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์สูงสุดที่ 71% และ 74% ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นถึง 86% และ 99% หลังน้ำเสียผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจริงจากโรงอาหารด้วยกระบวนการร่วม พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นที่ 97% และ 99% ตามลำดับ นอกจากนี้ ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เมมเบรนเกิดการอุดตันเร็วขึ้นจึงต้องมีการล้างย้อนโดยการเป่าลมเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งสามารถเพิ่มค่าฟลักซ์ของเมมเบรนจาก 30-40% เป็น 60-70% โดยสรุปแล้วข้อดีของกระบวนการร่วม คือ มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี ทำให้มีต้นทุนในการเดินระบบต่ำ นอกจากนี้แนวคิดในการนำโคอะเลสเซอร์มาใช้ในการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าเมมเบรนยังทำให้ช่วยลดการอุดตันของเมมเบรน เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5770402121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: COMBINED PROCESS / MEMBRANE / COALESCER / OILY WASTEWATER

CHINNAWAT CHAIYAKOOL: Combined process of coalescer and membrane for treatment of domestic oily wastewater. ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: NATTAWIN CHAWALOESPHONSIYA, Ph.D., 147 pp.

This research aims to study the treatment of domestic oily wastewater by combined process of coalescer and membrane. The experiments were conducted for separating the synthetic oily wastewater with palm oil concentrations of 0.5-2 g/L by polypropylene tubes (7 mm in diameter and 10 mm in length) packed as a coalescer bed. The bed lengths of 3-10 cm and the flow velocities of 6.1-18.9 m/h were applied in both vertical and horizontal coalescers for 120 minutes operation. It was found that the increase of flow velocity resulted in the reduced efficiencies in both coalescers. On the contrary, bed lengthening only improved the efficiency of the vertical coalescer. From this study, the optimal condition was found at 6.1 m/h flow velocity and the lengths of 10 cm and 3 cm for vertical and horizontal media beds, respectively. The coalescer gave the 71% of COD removal efficiency and 74% of turbidity removal efficiency for the synthetic oily wastewater. These efficiencies were increased to 86% and 99% after the passed through the ultrafiltration membrane. This combined process was tested with the real oily wastewater obtained from a canteen. The removal efficiencies of 97% and 99% for COD and turbidity, respectively, can be achieved under the optimal operating condition. Besides, it was found that increasing the oil concentration of wastewater resulted in the faster membrane fouling, which required a good backwash for flux recovery. The backwashing by air blowing for 5 minutes can recover the flux from 30-40% to 60-70%. In conclusion, this combined process provided the advantages of high efficiency for oily wastewater treatment without chemical addition, which resulted in the low operating cost. The concept of applying coalescer before membrane filtration can reduce the membrane fouling and benefit in prolonging the membrane operation for the effective oily wastewater treatment.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ญรมนกุล อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้
โอกาสในการทำงานวิจัยนี้แก่ข้าพเจ้า ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนการ
ทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์ และ ดร. มรุตพัชร์ จำนงค์วงศ์
ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ดิชม และแก้ไขใ้ทำงานวิจัยนี้เป็นไปในทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้กับข้าพเจ้าในทุกรายวิชา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุก ๆ ท่าน ที่กรุณาให้ความ
อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ รวมทั้งให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อน ๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่าง ๆ จนงานวิจัย
สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้โอกาสในการศึกษา และให้การ
สนับสนุนเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	๗
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	4
2.1.1 น้ำมันที่ลอยเป็นชั้นฟิล์มบนผิวน้ำ.....	4
2.1.2 น้ำมันที่ละลายน้ำ.....	4
2.1.3 น้ำมันที่อยู่ในรูปของอิมัลชัน.....	5
2.2 สารลดแรงตึงผิว.....	8
2.3 น้ำเสียจากการประกอบอาหาร.....	10
2.4 กระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย.....	10
2.4.1 กระบวนการแยกทางชีวภาพ (Biological processes).....	11
2.4.2 กระบวนการแยกทางเคมี (Chemical processes).....	11
2.4.3 กระบวนการแยกทางกายภาพเคมี (Physicochemical processes).....	11

2.4.4 กระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry processes).....	13
2.5 กระบวนการปล่อยให้ลอยตัวหรือทิ้งให้ตกตะกอน (Decantation).....	14
2.5.1 American Petroleum Institute Separator (API)	14
2.5.2 Parallel Plates Interceptor Separator (PPI)	15
2.6 กระบวนการโคalesceเซอร์ (Coalescer process).....	16
2.6.1 ที่มาของอุปกรณ์โคalesceเซอร์.....	16
2.6.2 ชนิดของโคalesceเซอร์.....	17
2.6.3 กลไกการทำงานของอุปกรณ์โคalesceเซอร์.....	18
2.6.4 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการโคalesceเซอร์.....	24
2.7 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Processes).....	25
2.7.1 ลักษณะเดินระบบบำบัดของกระบวนการเมมเบรน	25
2.7.2 ชนิดของเมมเบรน.....	26
2.7.3 โมดูลที่ใช้งานในกระบวนการเมมเบรน	27
2.8 รูปแบบการกระจายตัวของเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD).....	30
2.8.1 การไหลแบบไม่อุดมคติ (Non-Ideal flow)	30
2.8.2 แบบจำลองการไหล (Compartment flow models).....	30
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.9.1 สรุปผลการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	49
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.1.1 การติดตั้งชุดการทดลอง	49
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์.....	50
3.1.3 สารเคมี.....	53

3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์	54
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	56
3.3.1 ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	58
3.3.2 ศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโคอะเลสเซอร์	60
3.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อเดินระบบโคอะเลสเซอร์แบบ แนวนอนและแนวตั้งพร้อมกัน	62
3.3.4 ศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโคอะเลสเซอร์	65
3.3.5 ศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเมมเบรน	67
3.3.6 ศึกษากระบวนการร่วมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัด น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	69
3.3.7 ศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก	71
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	73
4.1 การศึกษาลักษณะและสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	73
4.1.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์	73
4.1.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริง.....	75
4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสม และการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ เสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์	77
4.2.1 การศึกษาผลของความเร็วการไหลของน้ำเสีย	77
4.2.2 การศึกษาผลของความหนาชั้นตัวกลาง	80
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งและแนวนอนใน การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์.....	85
4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและความขุ่นเมื่อระยะการตกตะกอน แตกต่างกัน	85
4.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ชนิดต่าง ๆ	87

4.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย.....	87
4.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการโคอะเลสเซอร์	88
4.4.1 ผลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี	88
4.4.2 ผลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น	90
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์	91
4.5.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของกระบวนการเมมเบรน	92
4.5.2 ผลของความเข้มข้นของน้ำมันต่อการอุดตันของเมมเบรน	93
4.6 การศึกษากระบวนการร่วมของโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	94
4.6.1 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการร่วม.....	95
4.6.2 การบำบัดน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการร่วม	97
4.7 การศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution, RTD)	102
4.7.1 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์.....	102
4.7.2 การสร้างกราฟ E curve เพื่อหารูปแบบการไหล	103
4.7.3 การศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักโดยใช้สีละลายน้ำเป็นสารชี้วัด.....	106
4.7.4 การศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์โดยใช้สีผสมอาหารเป็นสารชี้วัด	110
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	114
5.1 สรุปผลการวิจัย	114
5.2 ข้อเสนอแนะ	117
รายการอ้างอิง	118

ภาคผนวก.....	122
ภาคผนวก ก.....	123
ภาคผนวก ข.....	136
ภาคผนวก ค.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	147



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันชนิดต่าง ๆ ในน้ำ	5
ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบของไขมันและน้ำมันจากการประกอบอาหาร.....	10
ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย	13
ตารางที่ 2-4 สรุปผลการศึกษาระบบการโคอะเลสเซอร์	45
ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาระบบการเมมเบรน.....	47
ตารางที่ 3-1 สมบัติของน้ำมันปาล์ม	53
ตารางที่ 3-2 สมบัติของสารโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต	53
ตารางที่ 3-3 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์	54
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์	58
ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์	59
ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบของความหนาชั้นตัวกลาง และความเร็วการไหลของ น้ำเสียต่ออุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	61
ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบต่ออุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เมื่อมีระยะการตกตะกอน แตกต่างกัน.....	63
ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบต่ออุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เมื่อมีความเข้มข้นของน้ำ เสียแตกต่างกัน	66
ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบต่ออุปกรณ์เมมเบรนเมื่อมีปัจจัยทางกายภาพแตกต่าง กัน.....	68
ตารางที่ 3-10 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการร่วม ..	69
ตารางที่ 3-11 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์	71
ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์	73
ตารางที่ 4-2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจริง	76

ตารางที่ 4-3	สรุปสถานะที่เหมาะสมในการทดลองของกระบวนการโคอะเลสเซอร์	85
ตารางที่ 4-4	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความชุ่มของกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์	86
ตารางที่ 4-5	ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์	88
ตารางที่ 4-6	ประสิทธิภาพในการกำจัดความชุ่มของน้ำเสียที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน	90
ตารางที่ 4-7	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของกระบวนการเมมเบรน	92
ตารางที่ 4-8	ประสิทธิภาพในการกำจัดความชุ่มของกระบวนการเมมเบรน	92
ตารางที่ 4-9	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการร่วม	95
ตารางที่ 4-10	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงของกระบวนการร่วม	98
ตารางที่ 4-11	ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของกระบวนการร่วม	100
ตารางที่ 5-1	สรุปตัวแปรของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน ...	116

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 ประเภทของอิมัลชัน.....	6
รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวกับค่าแรงตึงผิว ของน้ำมันและน้ำ.....	6
รูปที่ 2-3 การผลึกกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว.....	7
รูปที่ 2-4 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว.....	8
รูปที่ 2-5 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวแบ่งตามประจุไฟฟ้าบนส่วนหัว.....	9
รูปที่ 2-6 อุปกรณ์ API Separator.....	15
รูปที่ 2-7 อุปกรณ์ PPI Separator.....	15
รูปที่ 2-8 อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	16
รูปที่ 2-9 ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ชนิดต่าง ๆ.....	17
รูปที่ 2-10 การส่งถ่าน้ำมันเข้าสู่สัมผัสผิวตัวกลาง.....	18
รูปที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคสารกระจายกับประสิทธิภาพในการส่งถ่านด้วยปรากฏการณ์แบบต่าง ๆ.....	20
รูปที่ 2-12 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีตัวกลางไม่ชอบน้ำ.....	21
รูปที่ 2-13 ตัวกลางเปียกได้ด้วยสารกระจาย.....	21
รูปที่ 2-14 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีตัวกลางชอบน้ำ.....	22
รูปที่ 2-15 ตัวกลางเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย.....	22
รูปที่ 2-16 ลักษณะหยดน้ำมันที่หลุดออกจากชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์.....	23
รูปที่ 2-17 ลักษณะการการกรอง.....	26
รูปที่ 2-18 ชนิดของเมมเบรนและช่วงอนุภาคต่าง ๆ ที่สามารถคัดแยกได้.....	27
รูปที่ 2-19 โมดูลแบบแผ่นกรอง.....	28

รูปที่ 2-20 โมดูลแบบท่อม้วน	28
รูปที่ 2-21 โมดูลแบบท่อ	29
รูปที่ 2-22 โมดูลแบบเส้นใยกลาง.....	29
รูปที่ 2-23 แบบจำลองการไหลชนิดต่าง ๆ	31
รูปที่ 2-24 การวิเคราะห์ลักษณะกราฟ.....	33
รูปที่ 2-25 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน	34
รูปที่ 2-26 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลของน้ำเสีย	36
รูปที่ 2-27 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาเรื่องการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ด้วย กระบวนการโคอะเลสเซอร์.....	37
รูปที่ 2-28 การทดลองเพิ่มจำนวนชั้นตัวกลาง	37
รูปที่ 2-29 การติดตั้งชุดการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคน้ำมันด้วยโคอะเลสเซอร์ ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน.....	39
รูปที่ 2-30 การติดตั้งชุดการทดลองศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันเมื่อใช้ตัวกลาง ที่ มีรูปแบบแตกต่างกัน	40
รูปที่ 2-31 รูปแบบการไหลผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์ของน้ำเสีย.....	40
รูปที่ 2-32 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์เมมเบรน ใน กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส	41
รูปที่ 2-33 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกรองของเมมเบรนท่อเซรามิก ที่ทำขึ้นโดยใช้ดินขาว (Kaolin) เป็นวัสดุ	42
รูปที่ 2-34 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกรองโดยใช้เมมเบรน ท่อเซรา มิกที่ทำขึ้นด้วยตัววัสดุราคาถูกลง	43
รูปที่ 2-35 การติดตั้งชุดการทดลองศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วย กระบวนการอัล ตราฟิลเตรชัน.....	44
รูปที่ 3-1 แผนผังการติดตั้งชุดการทดลองของกระบวนการร่วม.....	49

รูปที่ 3-2 การติดตั้งอุปกรณ์.....	49
รูปที่ 3-3 ลักษณะและการไหลของน้ำในถังปฏิกริยา	50
รูปที่ 3-4 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางโคอะเลสเซอร์.....	51
รูปที่ 3-5 ชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์	51
รูปที่ 3-6 ลักษณะชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์.....	52
รูปที่ 3-7 แผนผังวิธีดำเนินการวิจัย	57
รูปที่ 3-8 แผนผังการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์	59
รูปที่ 3-9 แผนผังการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียจริง.....	60
รูปที่ 3-10 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เมื่อความหนาชั้นตัวกลาง และความเร็วการไหลของน้ำเสียมักแตกต่างกัน	62
รูปที่ 3-11 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แนวตั้งและแนวนอน	64
รูปที่ 3-12 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย	64
รูปที่ 3-13 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เมื่อมีระยะการตกตะกอนที่ แตกต่างกัน.....	65
รูปที่ 3-14 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เมื่อมี ความเข้มข้นของน้ำ เสียแตกต่างกัน.....	67
รูปที่ 3-15 แผนผังการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออุปกรณ์เมมเบรน.....	68
รูปที่ 3-16 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการ โคอะ เลสเซอร์ และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	70
รูปที่ 3-17 แผนผังการศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์.....	72
รูปที่ 4-1 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์.....	74
รูปที่ 4-2 ร้อยละการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	75
รูปที่ 4-3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงอาหาร.....	76

รูปที่ 4-4 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง ที่ ความเร็วการไหลแตกต่างกัน; ความหนาชั้นตัวกลาง 10 เซนติเมตร	78
รูปที่ 4-5 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน ที่ ความเร็วการไหลแตกต่างกัน; ความหนาชั้นตัวกลาง 10 เซนติเมตร	79
รูปที่ 4-6 ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดซีโอดีที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน	79
รูปที่ 4-7 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง ที่ความ หนาชั้นตัวกลางแตกต่างกัน; ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง	81
รูปที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน ที่ ความหนาชั้นตัวกลางแตกต่างกัน; ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง	82
รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดซีโอดีที่ความหนาชั้นตัวกลางแตกต่างกัน	83
รูปที่ 4-10 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันที่เปลี่ยนแปลง	84
รูปที่ 4-11 ร้อยละการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันก่อนและหลังผ่านชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์	84
รูปที่ 4-12 แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	86
รูปที่ 4-13 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของโคอะเลสเซอร์ชนิดต่าง ๆ	87
รูปที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์ ที่ความ เข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน; ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง	89
รูปที่ 4-15 ค่าซีโอดีของน้ำเสียความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	89
รูปที่ 4-16 ลักษณะอุปกรณ์เมมเบรน	91
รูปที่ 4-17 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรน	93
รูปที่ 4-18 ค่าฟลักซ์ของน้ำเสียความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	94
รูปที่ 4-19 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ของกระบวนการร่วมกับ กระบวนการเมมเบรน	96
รูปที่ 4-20 การบำบัดน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการร่วม	97
รูปที่ 4-21 ลักษณะน้ำเสียจริงที่ใช้ในกระบวนการร่วม	99

รูปที่ 4-22 ลักษณะตะกอนของน้ำเสียที่ตกค้างบนกระดาดชกรองก่อนและหลังการบำบัด	100
รูปที่ 4-23 ค่าฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียจริง ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	101
รูปที่ 4-24 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์	102
รูปที่ 4-25 ตำแหน่งการวางเครื่องตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์	103
รูปที่ 4-26 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารซีวิต ที่อัตราการไหล 1.88 ลิตรต่อนาที เทียบกับกราฟจากทฤษฎี	104
รูปที่ 4-27 ลักษณะการตกตะกอนของสารซีวิต ณ เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 0.71 ลิตรต่อนาที	105
รูปที่ 4-28 ลักษณะการแพร่กระจายของสีย้อมและสีผสมอาหารในน้ำ	106
รูปที่ 4-29 ลักษณะการศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาขนาดเล็ก	107
รูปที่ 4-30 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาขนาดเล็กเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารซีวิต เทียบกับกราฟจากทฤษฎี.....	108
รูปที่ 4-31 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาขนาดเล็กเมื่อใช้สีผสมอาหารเป็นสารซีวิต เทียบกับกราฟจากทฤษฎี.....	109
รูปที่ 4-32 ลักษณะการไหลของสีผสมอาหารในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์	111
รูปที่ 4-33 กราฟ E curve จุดที่ 1 ของถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์เมื่อใช้สีผสมอาหารเป็นสารซีวิต ที่อัตราการไหล 1.88 ลิตรต่อนาที เทียบกับกราฟจากทฤษฎี.....	111
รูปที่ 4-34 กราฟ E curve จุดที่ 2 ของถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์เมื่อใช้สีผสมอาหารเป็นสารซีวิต ที่อัตราการไหล 1.88 ลิตรต่อนาที เทียบกับกราฟจากทฤษฎี.....	111
รูปที่ 4-35 การจำลองรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์.....	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเป็นอีกหนึ่งปัญหาใหญ่ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของชุมชนเมืองและการจัดการควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดน้ำเสียและกลายเป็นมลภาวะทางน้ำขึ้น ซึ่งน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เป็นปัญหาส่วนใหญ่มักจะมีลักษณะเป็นอิมัลชันที่มีเสถียรภาพสูงและแยกออกจากน้ำได้ยาก จำเป็นต้องใช้กระบวนการหรืออุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปกระบวนการที่ใช้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียมักเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนจะนำไปบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพต่อไป นอกเหนือจากการบำบัดที่มีประสิทธิภาพ กระบวนการทางกายภาพยังมีความรวดเร็ว การดำเนินการไม่ซับซ้อน และมีความคุ้มค่าในการบำบัดมากกว่ากระบวนการทางชีวภาพ

กระบวนการทางกายภาพที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่น่าสนใจคือกระบวนการโคอะเลสเซอร์ (Coalescer) ซึ่งเป็นกระบวนการในการรวมอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยหลักการคือให้น้ำเสียที่ต้องการบำบัดไหลผ่านชั้นตัวกลางที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อนุภาคน้ำมันจะเข้าไปเกาะติดบนผิวของตัวกลางของโคอะเลสเซอร์ และเมื่อมีอนุภาคน้ำมันอื่น ๆ เข้ามาชนก็จะเกิดการรวมตัวและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ทำให้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายและเร็วขึ้น แต่เนื่องจากน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์นี้ยังคงมีอนุภาคน้ำมันบางส่วนที่หลุดไปกับน้ำเสียหลังการบำบัด จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการทางกายภาพอื่น ๆ มาทำงานร่วมกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ซึ่งกระบวนการที่น่าสนใจคือกระบวนการเมมเบรน (Membrane) กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันค่อนข้างสูง โดยใช้การกรองผ่านเมมเบรนซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้อนุภาคน้ำมันไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนออกไปกับน้ำเสียหลังการบำบัดได้ และถูกกักเก็บไว้ภายในถังที่ติดตั้งเมมเบรน อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการอุดตันบนผิวเมมเบรน ทำให้ต้องหยุดเดินระบบเพื่อทำความสะอาดบ่อยครั้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาสถานะและปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการทำงานร่วมกันของกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน เพื่อช่วยลดข้อจำกัดของทั้งสองกระบวนการ รวมทั้งพัฒนาและออกแบบกระบวนการร่วมสำหรับใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากชุมชนด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการเมมเบรน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการเมมเบรน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ
 - 1) น้ำเสียสังเคราะห์ เตรียมจากการผสมน้ำมันปาล์มกับน้ำประปา และ SDS แล้วปั่นกวนเพื่อให้เกิดสภาพอิมัลชัน โดยทำการศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ค่า คือ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
 - 2) น้ำเสียจริง เก็บตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากอ่างล้างจานของโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1.3.2 กระบวนการโคอะเลสเซอร์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 รูปแบบ คือ
 - 1) โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน ใช้ถังปฏิกริยาที่ทำจากอะคริลิกใส ลักษณะเป็นถังสี่เหลี่ยม มีความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง 25 เซนติเมตร วางชั้นตัวกลางให้น้ำไหลผ่านในทิศทางขนานกับถัง
 - 2) โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง ติดตั้งถัดจากคอลัมน์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน วางชั้นตัวกลางให้น้ำไหลผ่านในทิศทางตั้งฉากกับถัง
- 1.3.3 ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทำจากวัสดุพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) รูปแบบทรงกระบอกกลวง เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร โดยบรรจุชั้นตัวกลางในกล่องสี่เหลี่ยมทำจากสแตนเลส มีความกว้าง 8.7 เซนติเมตร ยาว 8.7 เซนติเมตร และใช้ความสูง 3 ค่า คือ 3 5 และ 10 เซนติเมตร ก่อนเดินระบบทำการแช่ตัวกลางในน้ำที่ผสมน้ำมัน เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ชั้นตัวกลางอิมัลชันด้วยน้ำมันก่อนนำไปทำการทดลอง
- 1.3.4 กระบวนการเมมเบรนเป็นการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้ไมมดูลเส้นใยกลวง (Hollow fiber membrane) ทำจากวัสดุพอลิซัลโฟน (Polysulfone)

- 1.3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการเมมเบรน ได้แก่ ซีไอดี ความขุ่น ขนาดอนุภาคน้ำมัน และของแข็งแขวนลอย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความเข้าใจกลไกและตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการเมมเบรนในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย
- 1.4.2 การนำกระบวนการร่วมนี้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากชุมชน และเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่องเพื่อให้ความคุ้มค่าในการบำบัด
- 1.4.3 กระบวนการร่วมซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากชุมชน ที่มีต้นทุนในการเดินระบบน้อย และใช้สารเคมีในปริมาณต่ำ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำมันที่มีการปนเปื้อนในน้ำเสียในลักษณะของผสมระหว่างน้ำและน้ำมัน จะผสมรวมกันอยู่ได้หลายรูปแบบ เช่น น้ำมันที่เป็นชั้นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ลอยอยู่บนผิวน้ำ น้ำมันที่ละลายน้ำ และน้ำมันที่อยู่ในรูปของอิมัลชัน เป็นต้น ซึ่งการแบ่งลักษณะทางกายภาพจะแยกประเภทของน้ำมันได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้ (Aurelle, 1985)

2.1.1 น้ำมันที่ลอยเป็นชั้นฟิล์มบนผิวน้ำ

โครงสร้างส่วนใหญ่ของน้ำมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความหนาแน่น (Density) น้อยกว่าน้ำ ทำให้มักพบว่าจะมีฟิล์มบาง ๆ ลอยอยู่บนผิวน้ำของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน และมีการกระจายตัวเป็นบริเวณกว้าง โดยการจัดเรียงตัวของชั้นฟิล์มจะเป็นแบบโมเลกุลเดี่ยว (Monolayer) น้ำเสียชนิดนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ง่ายด้วยตาเปล่า และสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่าน้ำมันประเภทอื่น ๆ

2.1.2 น้ำมันที่ละลายน้ำ

ถึงแม้ว่าน้ำมันส่วนใหญ่จะมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ แต่ก็มีน้ำมันบางชนิดที่สามารถละลายในน้ำได้ โดยความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- **น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)** เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันลดลง ความสามารถในการละลายน้ำจะเพิ่มขึ้น
- **ความสามารถในการระเหย (Volatility)** น้ำมันที่ระเหยได้ส่วนใหญ่มักจะเป็นน้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้ละลายน้ำได้ดี
- **ความอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว (Saturation and Unsaturation)** น้ำมันที่ไม่อิ่มตัวจะละลายน้ำได้ดีกว่าน้ำมันที่อิ่มตัว

ตารางที่ 2-1 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันชนิดต่าง ๆ ในน้ำ

โครงสร้างโมเลกุลน้ำมัน แบบโซ่ตรง (C8)		โครงสร้างโมเลกุลน้ำมัน แบบโซ่ตรง (C6)		โครงสร้างโมเลกุลน้ำมัน แบบวงอะโรมาติก (C6)	
n-octane	0.66 มก./ล.	n-hexane	9.5 มก./ล.	cyclohexane	55 มก./ล.
octane-1	2.7 มก./ล.	hexene-1	50 มก./ล.	cyclohexene	213 มก./ล.
octyne-1	24 มก./ล.	hexyne-1	360 มก./ล.	benzene	1650 มก./ล.

(ที่มา: New Developments in Industrial Wastewater Treatment, 1991)

จากตารางที่ 2-1 จะเห็นได้ว่าน้ำมันที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันที่มีความเป็นขั้วสูง และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งจะเห็นความแตกต่างของค่าความสามารถในการละลายน้ำได้อย่างชัดเจนจากน้ำมันที่มีโครงสร้างเป็นแบบวงอะโรมาติก ในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำเสียที่มีการละลายของน้ำมันนี้ส่วนใหญ่ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากจะมีลักษณะใสและสารละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ จึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ น้ำเสียประเภทนี้ยังก่อให้เกิดความเป็นพิษเนื่องจากน้ำมันส่วนใหญ่ที่ละลายน้ำได้จะเป็นสารจำพวกอะโรมาติกซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง จึงนับได้ว่าน้ำมันที่ละลายอยู่ในน้ำเสียเป็นสารปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดอันตรายชนิดหนึ่ง

2.1.3 น้ำมันที่อยู่ในรูปของอิมัลชัน

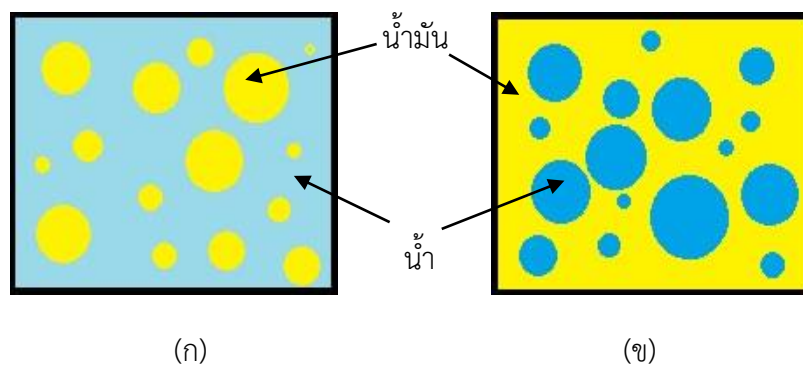
น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชัน (Emulsion) จะมีลักษณะเป็นของเหลวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible mixture) โดยของเหลวที่มีอนุภาคเล็ก ๆ ชนิดหนึ่งจะแขวนลอยอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ของเหลวที่แขวนลอยจะเรียกว่า สารกระจาย (Dispersed หรือ Internal phase) และของเหลวอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า สารต่อเนื่อง (Continuous หรือ External phase) ซึ่งการพิจารณาลักษณะสมบัติของอิมัลชันสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

2.1.3.1 ลักษณะของสารต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาตามลักษณะของสารต่อเนื่องสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) อิมัลชันตรง หรืออิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Direct emulsion, O/W emulsion) คือ อิมัลชันที่มีน้ำเป็นสารต่อเนื่องและมีน้ำมันเป็นสารกระจาย ดังรูปที่ 2-1(ก)

2) อิมัลชันผกผัน หรืออิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน (Inverse emulsion, W/O emulsion) คือ อิมัลชันที่มีน้ำมันเป็นสารต่อเนื่องและมีน้ำเป็นสารกระจาย ดังรูปที่ 2-1(ข)



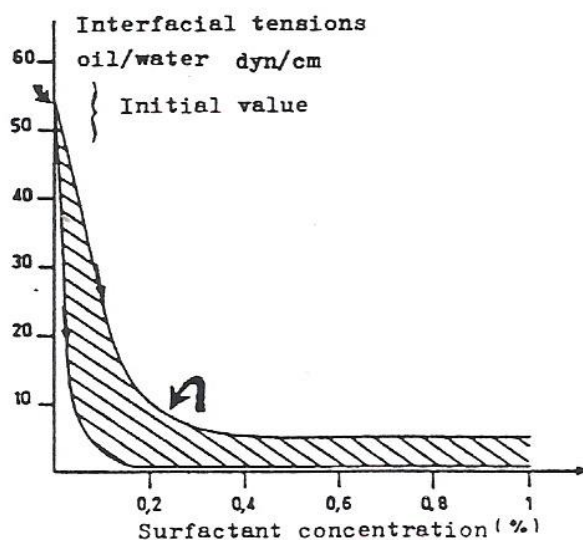
รูปที่ 2-1 ประเภทของอิมัลชัน (ก) อิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ และ (ข) อิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน

2.1.3.2 ความเสถียรของอิมัลชัน

เมื่อพิจารณาตามความเสถียรของอิมัลชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

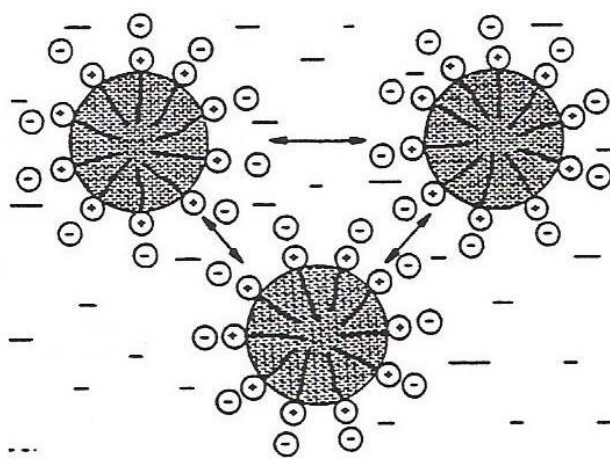
1) อิมัลชันเสถียร (Stabilized emulsion)

อิมัลชันประเภทนี้จะประกอบไปด้วยน้ำมัน น้ำ และสารลดแรงตึงผิว (Surface-active agent) สารลดแรงตึงผิวนี้อจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ทำให้แรงตึงผิวของน้ำมันและน้ำลดลง (ดังรูปที่ 2-2) ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวกับค่าแรงตึงผิวของน้ำมันและน้ำ (Aurette, 1985)

นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวจะไปทำให้ผิวของอนุภาคน้ำมันเกิดสภาพขั้วไฟฟ้า (Electrokinetic หรือ Zeta potential) ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตระหว่างหยดน้ำมัน ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันไม่สามารถชนและเกิดการรวมตัว (Coalescence) กับอนุภาคอื่น ๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 การผลักกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กมาก และไม่สามารถเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ทำให้อิมัลชันชนิดนี้มีความเสถียรสูงและกระจายตัวอยู่ในสารต่อเนื่องเป็นเวลานาน และมีความสามารถในการแยกออกจากสารต่อเนื่องได้ช้ามาก

2) อิมัลชันไม่เสถียร (Non-stabilized emulsion)

อิมัลชันประเภทนี้จะมีเพียงน้ำมันและน้ำเท่านั้น ไม่มีสารลดแรงตึงผิว ทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันเองได้เมื่อเกิดการเคลื่อนที่และมาชนกัน เกิดเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ความเสถียรของอิมัลชันชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับระดับของการกระจาย (Degree of dispersion) หรือขนาดของอนุภาคน้ำมัน ถ้าอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กจะมีแรงลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำน้อย อนุภาคจึงลอยกระจายอยู่ในสารต่อเนื่องเป็นเวลานาน ยิ่งอนุภาคน้ำมันกระจายอยู่ในสารต่อเนื่องนานก็จะถือว่าอิมัลชันมีความเสถียรมาก โดยขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการกวนผสมหรือกระจายสารกระจาย เช่น ความปั่นป่วนของการปั่นกวน หรือขนาดของเครื่องสูบน้ำ เป็นต้น

2.1.3.3 ขนาดของอนุภาคน้ำมัน

พิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำมันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1) อิมัลชันขั้นแรก (Primary emulsion) อนุภาคอิมัลชันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสียมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 ไมครอน

2) อิมัลชันขั้นที่สอง (Secondary emulsion) อนุภาคอิมัลชันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสียมิเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 ไมครอน

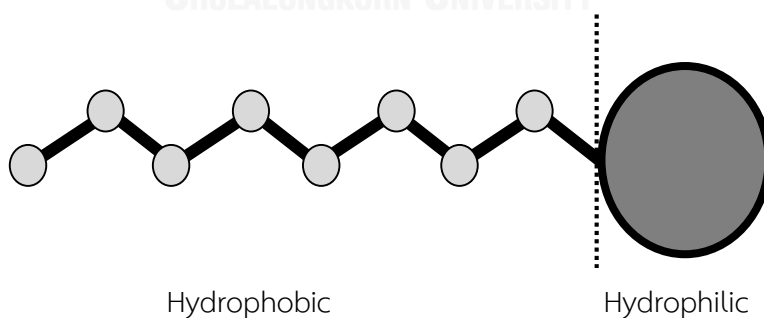
3) แมคโครอิมัลชัน (Macro emulsion) น้ำเสียนชนิดนี้มักจะมีสารลดแรงตึงผิวปนอยู่ด้วย ทำให้อนุภาคอิมัลชันมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.06-1 ไมครอน ซึ่งอิมัลชันชนิดนี้จะมองเห็นเป็นสีขาวขุ่นลักษณะคล้ายนม (Milky appearance)

4) ไมโครอิมัลชัน (Micro emulsion) น้ำเสียนชนิดนี้จะมีสารลดแรงตึงผิวปนอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้อนุภาคอิมัลชันมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากอยู่ระหว่าง 10-60 นาโนเมตร ซึ่งอิมัลชันชนิดนี้จะมีลักษณะโปร่งใสหรือโปร่งแสง

จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียม เป็นหลักเกณฑ์ที่สำคัญในการแบ่งประเภทของน้ำเสียมปนเปื้อนน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาความเสถียรของอิมัลชันก็มีความสำคัญเช่นกัน ซึ่งความเสถียรนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากส่วนประกอบอื่นที่อยู่ในน้ำเสียนั้นคือ สารลดแรงตึงผิว

2.2 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant หรือ Surface active agent) เป็นสารที่ใช้เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันกับน้ำ โดยมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ผิวระหว่างเฟส ทำให้แรงตึงผิวมีค่าลดลง ซึ่งลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะประกอบไปด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นส่วนหัวที่ละลายน้ำได้ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นส่วนหางซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสารไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว สามารถละลายในน้ำมันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

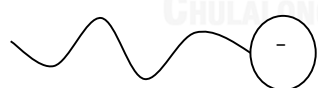
สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ตามลักษณะของประจุที่อยู่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิว (ตามรูปที่ 2-5) ดังนี้

1) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactants) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวมีประจุเป็นลบ ซึ่งมีคุณสมบัติในการชำระล้างได้ดี และถูกใช้ในผลิตภัณฑ์สำหรับการทำความสะอาดทั่วไป เช่น น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก เป็นต้น ส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปของ Sulfate Sulfonate Phosphate หรือ Carboxylate เป็นต้น

2) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวมีประจุเป็นบวก ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไนโตรเจน เช่น ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Quaternary ammonium hydroxide) ทั้งนี้สารลดแรงตึงผิวที่เป็นประจุบวกจะทำให้เกิดการระคายเคือง และมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค ผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก เช่น น้ำยาฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น

3) สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวไม่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติการละลายของสารลดแรงตึงผิวนี้จะขึ้นอยู่กับกลุ่มที่แสดงสมบัติคล้ายกับสารที่มีประจุ เช่น พอลิไฮดรอกซิล (Polyhydroxyl) หรือ พอลิเอเทอร์ (Polyether) เป็นต้น นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิวต่าง ๆ เช่น น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก เป็นต้น

4) สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวกในตัวเอง (Amphoteric surfactant) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวมีประจุบวกและลบในโครงสร้างอย่างน้อยหมู่ละ 1 กลุ่ม ทำให้มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคของประจุบวกเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ($pH < 7$) และมีสมบัติการชำระล้างของประจุลบเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง ($pH > 7$) สำหรับสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดประจุไฟฟ้า สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ชำระล้างร่างกาย เช่น สบู่ แชมพู เป็นต้น



Anionic



Nonionic



Cationic



Amphoteric

รูปที่ 2-5 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวแบ่งตามประจุไฟฟ้าบนส่วนหัว

2.3 น้ำเสียจากการประกอบอาหาร

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการประกอบอาหารทั้งในครัวเรือนและร้านอาหารต่าง ๆ มักจะมีน้ำมันและไขมัน (Oil and Grease, O&G) ปนเปื้อนอยู่ ซึ่งน้ำมันและไขมันเหล่านี้เป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำต่าง ๆ เพราะน้ำมันและไขมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียนั้นจะไปเคลือบบริเวณผิวหน้าของแหล่งน้ำ ทำให้อากาศไม่สามารถลงไปใต้น้ำได้ ออกซิเจนที่ละลายในน้ำจึงลดต่ำลง นอกจากนี้ยังไปดึงสารแขวนลอยอื่น ๆ ที่อยู่ในน้ำทำให้ตกตะกอนยากขึ้นอีกด้วย โดยองค์ประกอบของไขมันและน้ำมัน แสดงได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบของไขมันและน้ำมันจากการประกอบอาหาร

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น
ความเป็นกรดต่าง (pH)	-	5-7
สี (Color)	ADMI	60-700
สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)	$\mu\text{S/cm}$	300-2,500
กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)	%	0.02-85
ไขมันและน้ำมัน* (Grease and Oil)	g/kg wet	140-850
ไขมันและน้ำมัน** (Grease and Oil)	mg/L	14-38,000
ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	mg/L	9-106
ฟอสฟอรัสรวม (Total Phosphorus)	mg/L	0.13-100

หมายเหตุ: *กรณีตัวอย่างกากไขมัน มีลักษณะเป็นตะกอน (Sludge)

**กรณีตัวอย่างกากไขมัน มีลักษณะเป็นของเหลว (Liquid)

(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

2.4 กระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

ในการพิจารณากระบวนการแยกน้ำมันออกจากร้านนั้น ต้องพิจารณาถึงลักษณะของอนุภาคน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสียก่อนที่จะเลือกใช้กระบวนการบำบัดต่าง ๆ ที่เหมาะสม โดยปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบกระบวนการบำบัดมีดังนี้ (สุรียพร เบญจประดิษฐ์, 2556)

- 1) ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำเสีย
- 2) ปริมาณและความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย
- 3) ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันและน้ำเสีย
- 4) การใช้สารลดแรงตึงผิว

5) อุณหภูมิของน้ำเสีย

กระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ

2.4.1 กระบวนการแยกทางชีวภาพ (Biological processes)

เป็นกระบวนการที่ใช้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้อุจุลินทรีย์ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งน้ำเสียที่จะทำการบำบัดต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Tricking filter) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge, AS) เป็นต้น

2.4.2 กระบวนการแยกทางเคมี (Chemical processes)

เป็นกระบวนการที่ใช้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยใช้สารเคมีเติมลงไปบนน้ำเสีย เช่น การเติมสารคลอรีน (Cl_2) ซึ่งคลอรีนที่เติมลงไปจะอยู่ในรูปของสารละลาย โดยจะไปกำจัดน้ำมันและไขมันต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย มักใช้การเติมคลอรีนในถังตกตะกอนแรก หรือในถังเติมอากาศ

2.4.3 กระบวนการแยกทางกายภาพเคมี (Physicochemical processes)

2.4.3.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

เป็นกระบวนการที่อาศัยความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลของน้ำมันซึ่งอยู่ในน้ำเสียให้มาเกาะจับและติดบนผิว สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกชนิดรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำได้ ปรากฏการณ์นี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวมายังผิวของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนพื้นผิวที่เป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการดูดซับจะมี 2 กระบวนการคือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical-sorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical-sorption) ทั้ง 2 กระบวนการจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในของเหลวเข้าจับกับผิวของของแข็ง ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดที่ผิวของแข็งเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลในของเหลวได้นั่นเอง

2.4.3.2 กระบวนการโคอะเลสเซอร์ (Coalescer)

เป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มโอกาสสัมผัสกันของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านตัวกลาง (Bed) และเกิดการรวมตัว (Coalescence) ทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถกำจัดน้ำมันได้เกือบทุกชนิดยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำได้ กระบวนการนี้มักมีปัญหาในเรื่องการอุดตันของอุปกรณ์ โคอะเลสเซอร์ได้ง่ายถ้าน้ำเสียที่จะบำบัดมีของแข็งแขวนลอยอยู่ ดังนั้นน้ำเสียที่จะทำการบำบัดจึงควรผ่านการบำบัดขั้นต้นมาก่อน

2.4.3.3 กระบวนการทำให้ลอย (Flotation)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงลอยตัวขึ้นของฟองอากาศพยุ่งน้ำมันให้ลอยขึ้นเหนือผิวน้ำ ซึ่งกระบวนการนี้นิยมใช้กันมากในการกำจัดน้ำมัน เนื่องจากง่ายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ นอกจากนั้นยังสามารถกำจัดสารแขวนลอยที่มีความหนาแน่นต่ำและตกตะกอนได้ยาก และสามารถรับ Shock load ได้มาก เช่น Induced air flotation (IAF) Dissolved air flotation (DAF) และ Vacuum flotation (VF) เป็นต้น

2.4.3.4 กระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity separation)

กระบวนการนี้จะเป็นการกักน้ำเสียไว้ในบ่อหรือถังตกตะกอนเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะทำให้อนุภาคน้ำมันหรือสารแขวนลอยแยกชั้นออกจากน้ำด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เช่น American Petroleum Institute Separator (API) และ Parallel Plates Interceptor Separator (PPI) เป็นต้น กระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงนี้มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้ และถ้าอนุภาคน้ำมันอยู่ในรูปอิมัลชันจะต้องมีขนาดใหญ่กว่า 20 ไมครอน รวมทั้งความเร็วในการไหลของน้ำเสียต้องมีค่าต่ำ

2.4.3.5 กระบวนการกรอง (Filtration)

กระบวนการนี้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยและน้ำมันได้เกือบทุกชนิด ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำได้ โดยใช้ตัวกลางในการกรองเช่น ทราย (Sand) แอนทราไซต์ (Antracite) เป็นต้น ซึ่งเมื่อเกิดการอุดตันต้องมีการล้างย้อน (Backwash) และบำบัดน้ำล้างย้อนก่อนปล่อยออกจากระบบ

2.4.3.6 กระบวนการเมมเบรน (Membrane processes)

กระบวนการนี้จะใช้เยื่อเมมเบรนในการกรอง เช่น Reverse osmosis (RO) Microfiltration (MF) และ Ultrafiltration (UF) เป็นต้น ใช้พื้นที่การติดตั้งน้อย เวลาในการเดินระบบต่ำ และสามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกชนิด แต่กระบวนการนี้มีปัญหาการอุดตันได้ง่าย และมีอายุการใช้งานจำกัด ดังนั้นน้ำเสียที่จะทำการบำบัดจึงต้องมีการบำบัดในขั้นต้นมาก่อน

2.4.3.7 กระบวนการใช้ความร้อน (Thermal process)

กระบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำเสียให้สูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันก็จะลดลง ทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถลอยขึ้นมาที่ผิวและแยกชั้นออกจากน้ำเสียได้เร็วขึ้น

2.4.4 กระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry processes)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำมันโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า (แอโนดและแคโทด) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการทำลายเสถียรภาพ ทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น (Coagulation) และการแยกสารโดยทำให้ลอยขึ้น (Flotation) ด้วยไฟฟ้า ทั้งนี้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าจะขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ไม่ขึ้นกับปริมาณและขนาดของขั้วไฟฟ้า ข้อดีของกระบวนการนี้คือ มีขนาดเล็ก ควบคุมง่าย และประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravity separation	API, PPI, TPS, CPI	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดน้ำมันอิสระที่กระจายตัวในน้ำได้ - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - ใช้งานง่ายและประหยัด 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องใช้ความเร็วการไหลต่ำและใช้ถังแยกขนาดใหญ่ - กำจัดน้ำมันที่เล็กกว่า 20 ไมครอน และน้ำมันที่ละลายน้ำไม่ได้
Air Flotation	IAF, DAF	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการกำจัดตะกอนทางเคมี
Filtration	Anthracite, Sand, Crushed graphite, Multimedia, Oleophobic coated ceramic	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดน้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่กระจายตัวในน้ำได้ - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการล้างย้อน ซึ่งต้องบำบัดน้ำล้างย้อนต่อไป
Chemical flocculation	ใช้ร่วมกับวิธี Air flotation และ gravity separation	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการกำจัดตะกอนทางเคมี
Coalescence	Fibrous membrane	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - อุดตันง่าย - ต้องมีการบำบัดขั้นต้น - ไม่เหมาะสมกับการทำระบบขนาดใหญ่

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (ต่อ)

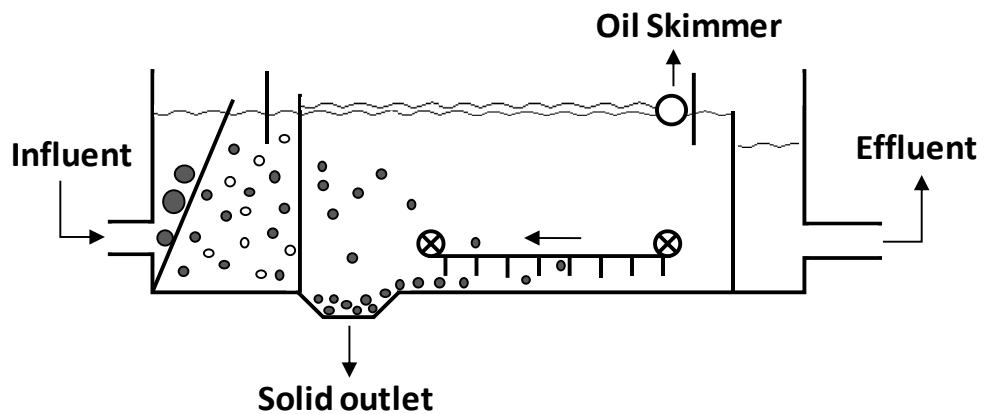
กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Carbon adsorption	PAC และ GAC	- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมทั้งน้ำมันที่ละลายน้ำ	- ต้องบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มก./ล. - ต้องฟื้นฟู/เปลี่ยนคาร์บอน - ค่าใช้จ่ายสูง - ไม่เหมาะสมกับการทำระบบขนาดใหญ่
Membrane processes	Ultrafiltration, Microfiltration, Reverse osmosis	- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมทั้งน้ำมันที่ละลายน้ำ	- อดต้นง่าย - ต้องบำบัดขั้นต้น - อายุการใช้งานจำกัด - ไม่เหมาะสมกับการทำระบบขนาดใหญ่
Biological processes	Activated sludge	- กำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ	- ต้องบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มก./ล.

2.5 กระบวนการปล่อยให้ลอยตัวหรือทิ้งให้ตกตะกอน (Decantation)

เป็นกระบวนการที่ใช้วิธีการกักน้ำเสียไว้ในบ่อหรือถังตกตะกอนเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะทำให้อนุภาคน้ำมันหรือสารแขวนลอยแยกชั้นออกจากน้ำด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการนี้ได้แก่

2.5.1 American Petroleum Institute Separator (API)

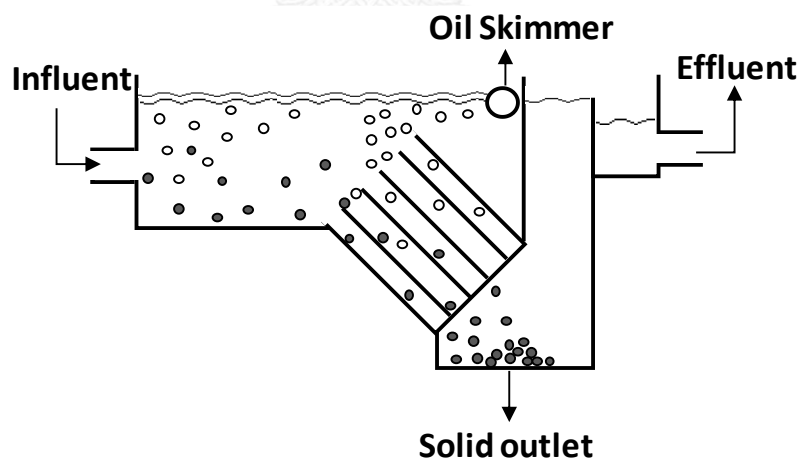
อุปกรณ์ API เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยแรงโน้มถ่วง โดยกระบวนการนี้จะใช้ความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของน้ำมันและน้ำเสียทำให้อนุภาคน้ำมันลอยตัวขึ้น และถูกกำจัดออกไปบริเวณเหนือผิวน้ำ (ตามรูปที่ 2-6) ข้อดีของอุปกรณ์นี้ คือ ออกแบบได้ง่าย ต้นทุนน้อย และใช้การบำรุงรักษาต่ำ แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันต่ำกว่า 50 ส่วนในล้านส่วน (ppm) และมีขนาดอนุภาคน้ำมันต่ำกว่า 150 ไมครอน อุปกรณ์นี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมการแปรรูปทางเคมีที่มีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 2-6 อุปกรณ์ API Separator

2.5.2 Parallel Plates Interceptor Separator (PPI)

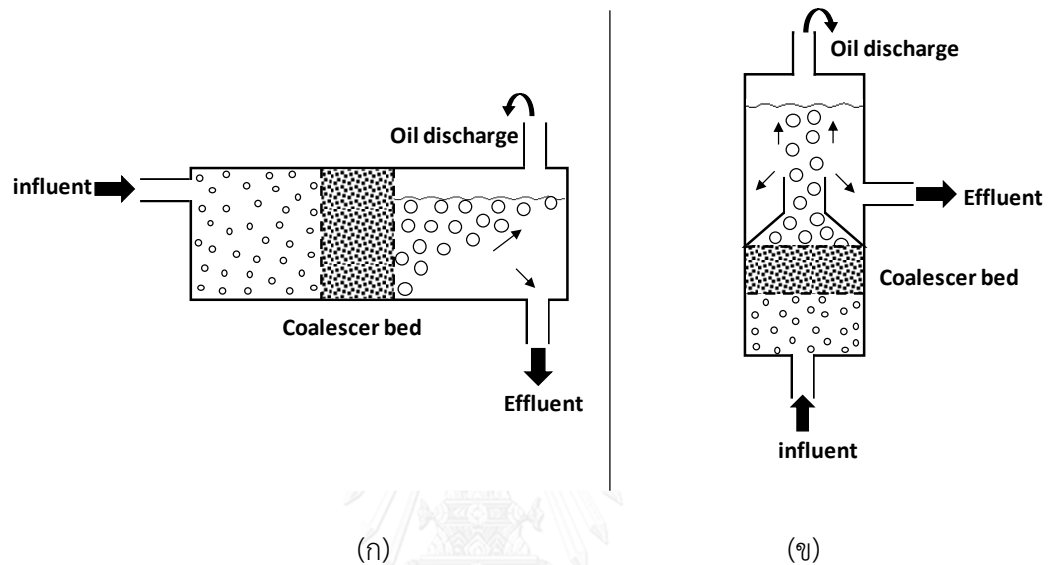
อุปกรณ์ PPI เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยแรงโน้มถ่วงเช่นเดียวกับอุปกรณ์ API แต่มีการเพิ่มแผ่นช่วยตกตะกอนเข้าไปด้วย โดยด้านล่างของแผ่นช่วยตกตะกอนแต่ละแผ่นจะเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นเพื่อดักจับอนุภาคน้ำมันและให้เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ข้อดีของอุปกรณ์นี้คือจะช่วยลดพื้นที่ในการออกแบบของถังตกตะกอนเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ API ที่ความสามารถในการบำบัดเท่ากัน



รูปที่ 2-7 อุปกรณ์ PPI Separator

2.6 กระบวนการโคอะเลสเซอร์ (Coalescer process)

อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกทางกายภาพของน้ำมันกับน้ำ โดยการทำให้เกิดการรวมตัว (Coalescence) ของอนุภาคน้ำมันภายในชั้นตัวกลาง ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น และแยกออกจากน้ำเสียได้เร็วขึ้น (Aurelle, 1985)



รูปที่ 2-8 อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (ก) แบบแนวนอน และ (ข) แบบแนวตั้ง

2.6.1 ที่มาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

กฎของสโตค (Stoke's law)

$$U_T = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18\mu_c} \quad (2-1)$$

เมื่อ	U_T	คือ ความเร็วลอยตัวของน้ำมัน
	$\Delta\rho$	คือ ผลต่างของความหนาแน่นของน้ำมันและน้ำเสีย
	d_E	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน
	μ_c	คือ ความหนืดพลศาสตร์ของน้ำเสีย
	g	คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

จากกฎของสโตค ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันส่งผลต่อความเร็วในการลอยตัวขึ้นเหนือผิวน้ำได้มากที่สุด เนื่องจากในสมการความเร็วในการลอยตัวจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคน้ำมัน (d_E) ยกกำลังสอง ดังนั้นถ้าเพิ่มขนาดอนุภาคน้ำมันขึ้น 2 เท่า ความเร็วในการลอยตัวก็จะเพิ่มขึ้น 4 เท่า โดยเมื่ออนุภาคน้ำมันผ่านเข้าสู่อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่บรรจุชั้นตัวกลางไว้ภายใน อนุภาคน้ำมันจะเกิดการปะทะและเกาะติดกับชั้นตัวกลาง ทำให้เมื่อมีอนุภาคอื่น ๆ ไหลผ่านชั้นตัวกลางก็จะมีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกัน (ดังรูปที่ 2-8) ซึ่งเมื่ออนุภาคเหล่านี้รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นจะสามารถแยกออกน้ำเสียได้ง่ายขึ้น

จากการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ จะเห็นได้ว่ามีหลักการการทำงานที่คล้ายกันกับกระบวนการกรองโดยใช้ตัวกลางคือ เป็นการแยกสารกระจายออกจากสารต่อเนื่อง โดยในกระบวนการกรองจะมีของแข็งแขวนลอยเป็นสารกระจาย แต่ในโคอะเลสเซอร์สารกระจายจะอยู่ในรูปของอนุภาคน้ำมันหรืออิมัลชัน

2.6.2 ชนิดของโคอะเลสเซอร์

อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์สามารถแบ่งออกได้หลายชนิด แต่สามารถพิจารณาออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางในโคอะเลสเซอร์ คือ

1) โคอะเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเม็ด (Granular bed coalescer) เช่น เม็ดพลาสติก เม็ดแก้ว ททราย เรซิน เป็นต้น

2) โคอะเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเส้นใย (Fibrous bed coalescer) เช่น เส้นใยพลาสติก เส้นใยปาล์ม เส้นใยโลหะ ฝอยสแตนเลส เป็นต้น



สุรียพร (2556)



Painmanakul (2009)



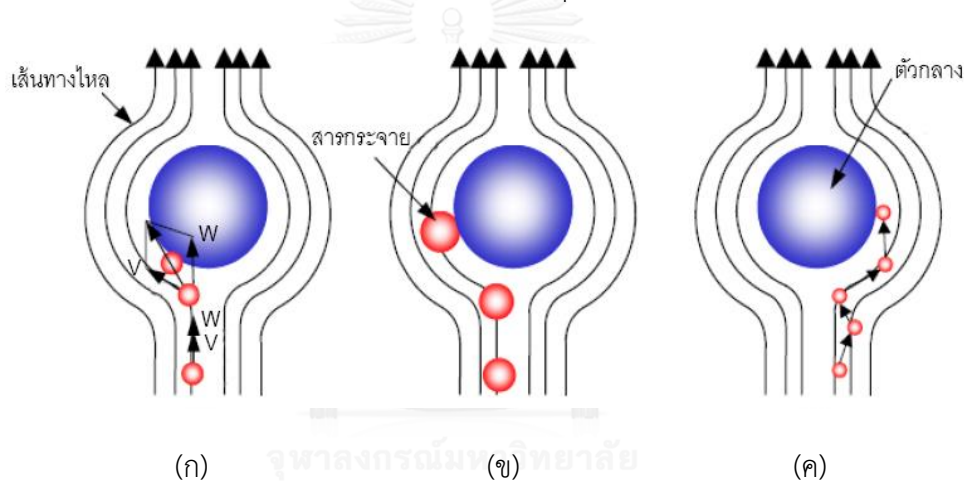
รูปที่ 2-9 ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ชนิดต่าง ๆ

2.6.3 กลไกการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

เมื่ออนุภาคน้ำมันไหลผ่านชั้นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ จะเกิดการปะทะกับชั้นตัวกลางและเกาะติดอยู่บนผิวของชั้นตัวกลาง ซึ่งเมื่อมีอนุภาคอื่น ๆ ไหลผ่านก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาค โดยกลไกที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

2.6.3.1 การส่งถ่ายน้ำมันเข้าสู่สัมผัสผิวตัวกลางในโคอะเลสเซอร์ (Transportation stage)

การส่งถ่ายน้ำมันเข้าสู่สัมผัสผิวตัวกลาง สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน การส่งถ่ายด้วยการปะทะ และการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย ซึ่งลักษณะกลไกที่เกิดขึ้นนี้จะคล้ายกันกับกลไกที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์กรองโดยใช้ตัวกลาง



รูปที่ 2-10 การส่งถ่ายน้ำมันเข้าสู่สัมผัสผิวตัวกลาง (ก) การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน (ข) การส่งถ่ายด้วยการปะทะ และ (ค) การส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย (Rachu, 2005)

1) การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน (Sedimentation)

จากรูปที่ 2-10(ก) อนุภาคน้ำมันซึ่งเป็นสารกระจายจะเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางการไหลของน้ำเสียซึ่งเป็นสารต่อเนื่อง โดยจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ด้วยกัน 2 ทิศทางคือ เวกเตอร์ V คือทิศความเร็วการไหลของน้ำเสียที่ผ่านตัวกลาง และเวกเตอร์ W คือทิศความเร็วในการลอยขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากตัวกลางเวกเตอร์ทั้งสองจะอยู่ในทิศเดียวกันคือขึ้นด้านบน เมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่เข้าใกล้ตัวกลาง น้ำเสียสามารถเลี้ยวเบนหลบตัวกลางได้ ดังนั้นเวกเตอร์ V จึงเปลี่ยนทิศทางไปตามการไหลของน้ำเสีย แต่อนุภาคน้ำมันไม่สามารถเลี้ยวหลบตัวกลางได้จึงเคลื่อนที่ในทิศทางเดิม นั่นแสดงว่าเวกเตอร์ W ยังคงเคลื่อนที่ในทิศขึ้นด้านบน และเมื่อรวมเวกเตอร์ทั้งสอง

เข้าด้วยกัน จะได้ว่าอนุภาคน้ำมันมีทิศทางการเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางของการไหลของน้ำเสียและปะทะเข้ากับตัวกลาง ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสเกาะติดอยู่บนผิวของตัวกลาง โดยประสิทธิภาพการส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน (η_s) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_s = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18\mu_c \cdot V_0} = \frac{W}{V_0} \quad (2-2)$$

เมื่อ W = ความเร็วในการลอยตัวของน้ำมัน
 V_0 = ความเร็วการไหลของน้ำเสีย

2) การส่งถ่ายด้วยการปะทะ (Direct interception)

หากอนุภาคของน้ำมันมีความหนาแน่นเท่ากับน้ำ ($\Delta\rho = 0$) อนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางการไหลของน้ำเสียรอบ ๆ ตัวกลาง ถ้าเส้นทางการไหลของอนุภาคน้ำมันห่างจากตัวกลางมีระยะน้อยกว่ารัศมีของอนุภาคน้ำมัน ก็จะทำให้เกิดการปะทะและเกิดการเกาะติดบนผิวตัวกลางด้วยกลไกแบบการปะทะโดยตรง ซึ่งประสิทธิภาพของการส่งถ่ายด้วยการปะทะ (η_i) ในกรณีที่ตัวกลางเป็นทรงกลม สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\eta_i = \frac{3}{2} \left(\frac{d_E}{d_p} \right)^2 \quad (2-3)$$

เมื่อ d_E = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน
 d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง

3) การส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย (Diffusion)

หากอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน จะเกิดกลไกการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจายขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ซึ่งจะเคลื่อนที่ไร้ทิศทางที่แน่นอน ดังนั้นอนุภาคจึงมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ออกจากทิศการไหลของน้ำเสียและไปปะทะกับตัวกลางได้ ซึ่งประสิทธิภาพของการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย (η_D) ในกรณีที่ตัวกลางเป็นทรงกลม สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\eta_D = 0.9 \left(\frac{K \cdot T}{\mu_C \cdot d_E \cdot d_P \cdot V_0} \right)^{2/3} \quad (2-4)$$

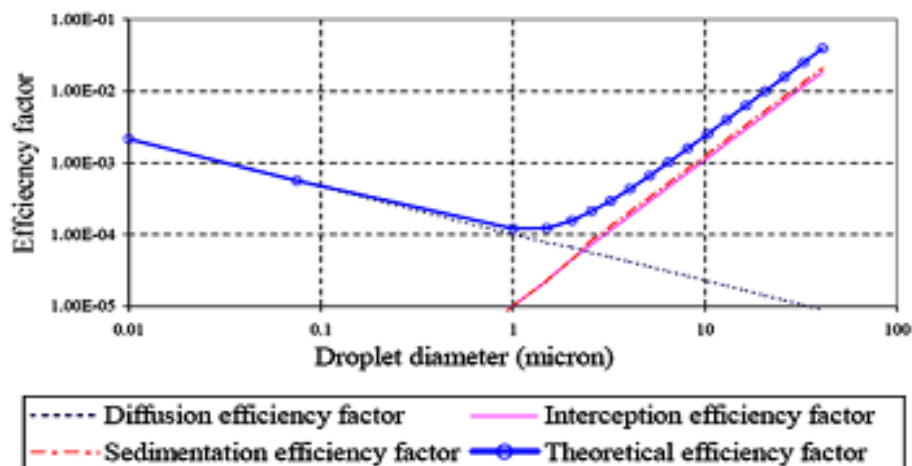
เมื่อ T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin, K)

K = ค่าคงที่ Boltzmann ($1.3807 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

กลไกการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นนั้น จะขึ้นกับลักษณะและสมบัติของอนุภาคน้ำมันที่ต้องการการบำบัด ซึ่งในน้ำเสียจะมีการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันขนาดต่าง ๆ ดังนั้นกลไกการส่งถ่ายมีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้ง 3 ลักษณะ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการชนทั้งหมด (Global efficiency of interception : η_T) จึงได้เท่ากับ

$$\eta_T = \eta_s + \eta_I + \eta_D \quad (2-5ก)$$

$$\eta_T = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18\mu_C \cdot V_0} + \frac{3}{2} \left(\frac{d_E}{d_P} \right)^2 + 0.9 \left(\frac{K \cdot T}{\mu_C \cdot d_E \cdot d_P \cdot V_0} \right)^{2/3} \quad (2-5ข)$$



รูปที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคสารกระจายกับประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยปรากฏการณ์แบบต่าง ๆ (Rachu, 2005)

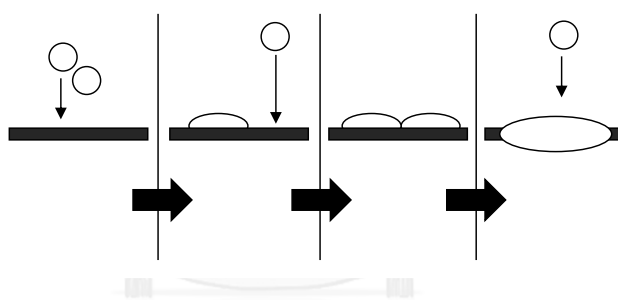
จากรูปที่ 2-11 เมื่ออนุภาคของสารกระจายมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.25 ถึง 5 ไมครอน จะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมตามทฤษฎีมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงนี้จะเป็นอนุภาคที่แยกออกได้ยากที่สุดในทางทฤษฎี

2.6.3.2 การจับยึดระหว่างอนุภาคน้ำมันกับตัวกลาง และการไหลผ่านชั้นตัวกลาง (Adhesion and coalescence stage)

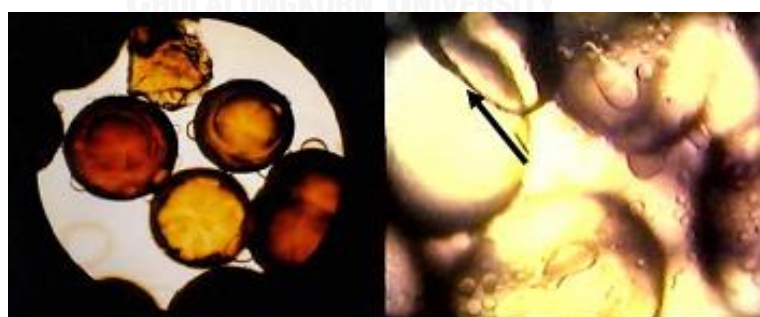
หลังจากอนุภาคน้ำมันถูกส่งถ่ายเข้าสู่ชั้นตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำ จะเกิดการจับยึดระหว่างอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางขึ้น อนุภาคน้ำมันจะไม่หลุดออกจากชั้นตัวกลางในทันที แต่จะเกิดการรวมตัวกันกับอนุภาคน้ำมันอื่น ๆ ที่มาปะทะกับชั้นตัวกลาง เมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นอนุภาคน้ำมันจึงหลุดออกจากชั้นตัวกลาง โดยปรากฏการณ์ในการจับยึดระหว่างตัวกลางโคอะเลสเซอร์กับอนุภาคน้ำมันสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1) กรณีตัวกลางไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

อนุภาคน้ำมันจะเกาะยึดบนพื้นผิวของตัวกลางและเกิดการเปียกบนพื้นผิวขึ้น หลังจากนั้นเกิดการสะสมและรวมตัวกับอนุภาคอื่นที่เปียกอยู่บนพื้นผิวกลายเป็นชั้นฟิล์มเคลือบอยู่บนพื้นผิวของตัวกลาง เมื่อมีอนุภาคอื่นมาปะทะกับชั้นฟิล์มก็จะเกิดการรวมตัวกับฟิล์ม และแยกออกจากน้ำเสียที่ไหลผ่านตัวกลางไป ดังรูปที่ 2-12 และ 2-13



รูปที่ 2-12 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีตัวกลางไม่ชอบน้ำ



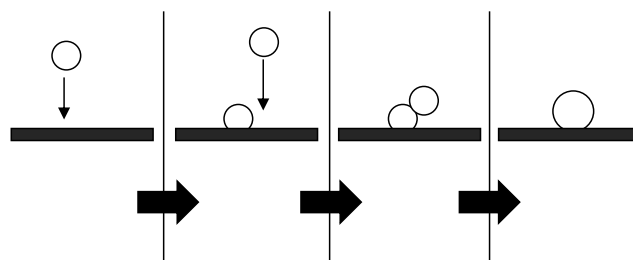
(ก)

(ข)

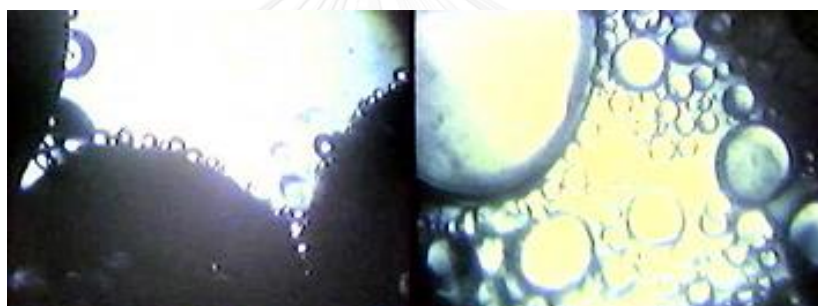
รูปที่ 2-13 ตัวกลางเปียกได้ด้วยสารกระจาย (ก) สารกระจายจับยึดกับตัวกลาง และ (ข) หยอดของสารกระจายที่รวมตัวกันเป็นฟิล์ม (Rachu, 2005)

2) กรณีตัวกลางชอบน้ำ (Hydrophilic)

อนุภาคน้ำมันจะถูกดักให้ติดค้างอยู่ระหว่างช่องว่างของตัวกลาง แต่จะไม่เกิดการเปียกพื้นผิวหรือเป็นชั้นฟิล์มขึ้น ซึ่งอนุภาคน้ำมันที่ถูกดักอยู่เหล่านี้จะเกิดการรวมตัวกันกับอนุภาคอื่น ๆ ที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างตัวกลางกลายเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากนั้นก็จะหลุดจากตัวกลางและไหลออกไปตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย ดังรูปที่ 2-14 และ 2-15



รูปที่ 2-14 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีตัวกลางชอบน้ำ



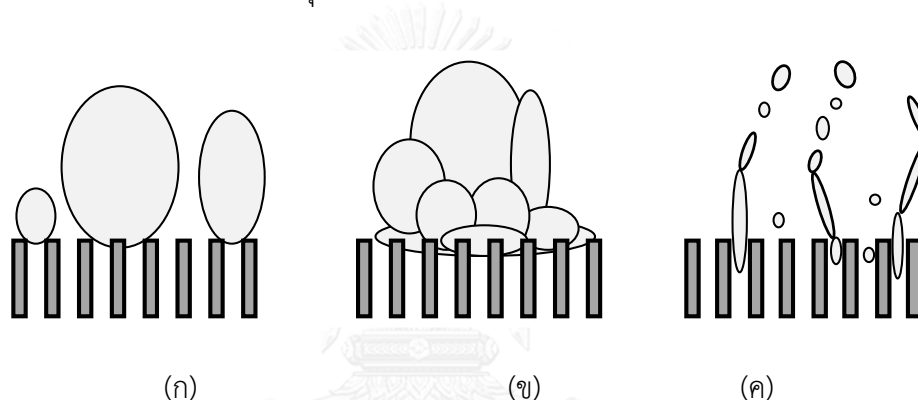
(ก) (ข)

รูปที่ 2-15 ตัวกลางเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย (ก) สารกระจายถูกดักให้ติดค้างอยู่ระหว่างตัวกลาง และ (ข) เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคสารกระจายในช่องว่างระหว่างตัวกลาง (Rachu, 2005)

จะเห็นได้ว่าประเภทของวัสดุตัวกลางที่ชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำเป็นตัวแปรที่มีผลต่อกลไกการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ในขั้นตอนนี้ หากตัวกลางมีสมบัติชอบน้ำ แรงเกาะยึดและอัตราการไหลของอนุภาคน้ำมันผ่านชั้นตัวกลางจะถูกจำกัดด้วยความเร็วของน้ำเสียที่ไหลผ่านตัวกลาง ส่วนตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำจะมีแรงเกาะยึดบนตัวกลางของอนุภาคน้ำมันสูง เนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำมันกับตัวกลางมีค่าสูงและมุมสัมผัสของอนุภาคมีค่าน้อย ซึ่งสามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่อัตราการไหลของน้ำเสียสูงกว่าและบำบัดน้ำเสียในปริมาณที่มากกว่าได้ หรือบำบัดได้เท่ากันด้วยขนาดชั้นตัวกลางที่เล็กกว่า ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์จึงควรเลือกวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำมาใช้เป็นตัวกลาง

2.6.3.3 การรวมตัวและหลุดออกจากชั้นตัวกลาง (Salting out stage)

เมื่ออนุภาคน้ำมันที่รวมตัวกันกับอนุภาคอื่น ๆ จนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น เคลื่อนผ่านช่องว่างชั้นผิวหน้าด้านบนของชั้นตัวกลาง และหลุดออกจากชั้นตัวกลางถือได้ว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ในขั้นตอนนี้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จะขึ้นอยู่กับ การหลุดออกจากชั้นตัวกลาง ซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดและลักษณะของอนุภาคน้ำมัน โดยสามารถแบ่งลักษณะของอนุภาคน้ำมันออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2-16 ซึ่งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีประสิทธิภาพนั้นอนุภาคน้ำมันที่หลุดออกจากชั้นตัวกลางจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ (2-3 มิลลิเมตร หรือมากกว่า) โดยลักษณะการเกิดหยดน้ำมันของผิวของการหลุดที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ มีความแตกต่างกันดังนี้



รูปที่ 2-16 ลักษณะหยดน้ำมันที่หลุดออกจากชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์

(ก) Balloon-shape (ข) Foaming/Mousse และ (ค) Jetting

1) ผิวของการหลุดไม่ชอบน้ำ

อนุภาคน้ำมันที่รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่จะไหลผ่านระหว่างช่องว่างของตัวกลางจนถึงผิวด้านบนที่เรียกว่า จุดหยด (Drip point) โดยจะเกิดฟิล์มน้ำมันหุ้มบนผิวของการหลุด ถ้าความเร็วในการไหลของน้ำเสียมี่ค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดเป็นฟอง (Foaming หรือ Mousse) โดยฟิล์มน้ำมันจะหุ้มน้ำอยู่ภายในฟอง และการไหลของน้ำเสียจะปะทะฟองของน้ำมันเหล่านี้ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กอีกครั้ง (Re-fragmentation) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ลดลง

2) ผิวของการหลุดขอบน้ำ

ผิวด้านบนของชั้นตัวกลางจะเกิดจุดหยดเช่นเดียวกับกรณีไม่ขอบน้ำ แต่จะไม่เกิดฟิล์มน้ำมันหุ้มผิวของการหลุด โดยมีลักษณะเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่คล้ายลูกบอลูน (Balloon-shape) ซึ่งหลุดออกจากชั้นตัวกลางโดยไม่มีลักษณะเป็นฟอง แต่หากความเร็วในการไหลของน้ำเสียสูงขึ้น หรือน้ำมันมีความเข้มข้นมากขึ้น จะทำให้ภายในชั้นตัวกลางเกิดจุดหยดมากขึ้น พร้อมกับการเกิดเจ็ท (Jetting) ฟันอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กออกมาเป็นสาย ทำให้อนุภาคน้ำมันเกิดการแตกตัวและกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กอีกครั้ง

ดังนั้นเพื่อให้กลไกการหลุดออกจากชั้นตัวกลางมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงควรออกแบบอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ให้มีลักษณะดังนี้คือ

- 1) กำหนดความเร็วในการไหลของน้ำเสียที่ผ่านอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ให้เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กอีกครั้ง (Re-fragmentation)
- 2) เลือกตัวกลางที่มีสมบัติขอบน้ำไว้บนสุดของชั้นตัวกลาง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟอง

2.6.4 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

1) ข้อดี

- สามารถใช้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้
- ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการบำบัด
- ต้องการการดูแลรักษาน้อย
- ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย และราคาถูก

2) ข้อเสีย

- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่ายเมื่อน้ำเสียมีสารแขวนลอยสูง
- น้ำเสียหลังการบำบัดมีอนุภาคน้ำมันหลงเหลืออยู่

2.7 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Processes)

เมมเบรนเป็นแผ่นเยื่อฟิล์มบาง ๆ สังเคราะห์ขึ้นจากสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์บางชนิด มีความสามารถในการกักเก็บและแยกสารละลายต่าง ๆ ออกจากกัน (Hwang และ Kammermeyer, 1975) โดยทั่วไปเมมเบรนที่ใช้สารอนินทรีย์เป็นวัสดุในการสังเคราะห์จะมีความทนทานต่อความดัน ความร้อน และสารเคมีต่าง ๆ เช่น คลอรีน เป็นต้น สำหรับเมมเบรนที่ใช้สารอินทรีย์เป็นวัสดุในการสังเคราะห์จะมีความยืดหยุ่นสูง และราคาถูกลงกว่า

กระบวนการเมมเบรน เป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi permeable membrane) ในการแยกอนุภาคต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียออกมาและกักเก็บไว้ในรูปของสารละลายเข้มข้น ซึ่งเมมเบรนแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการกักเก็บและแยกอนุภาคต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งออกได้ตามขนาดรูช่องว่าง (Pore size) หรือการคัดสรรด้วยน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight cutoff) ของเมมเบรน ขนาดแรงขับเคลื่อน ขนาดและน้ำหนักของโมเลกุลของอนุภาคที่เมมเบรนสามารถแยกได้

2.7.1 ลักษณะเดินระบบบำบัดของกระบวนการเมมเบรน

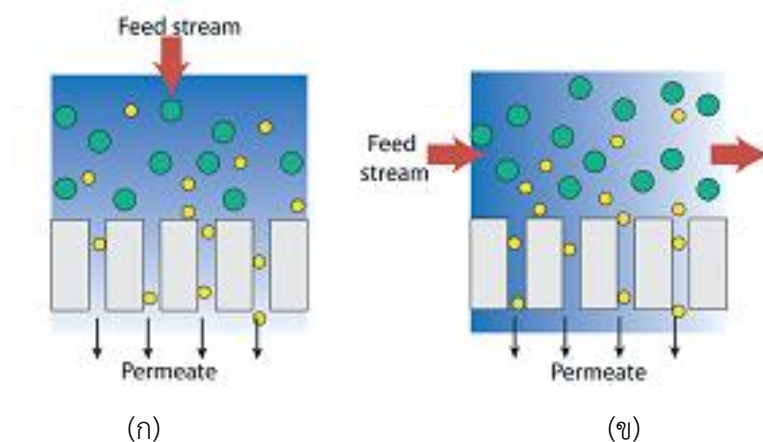
ในการเดินระบบจะมีการป้อนน้ำเสียเข้าสู่เมมเบรน โดยเรียกน้ำเสียนี้ว่า ฟีด (Feed) ซึ่งหลังจากที่มีการกรองผ่านเมมเบรนแล้วจะมีส่วนที่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่า เพอมิเอท (Permeate) หรือ ฟิลเตรต (Filtrate) และมีส่วนตะกอนน้ำเสียที่โดนกักเก็บไว้เรียกว่า รีเทนเทต (Retentate) หรือ คอนเซนเทรต (Concentrate) โดยกระบวนการเมมเบรนสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะตามรูปแบบการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (ดังรูปที่ 2-17) คือ

1) การกรองแบบอัดตัว (Dead-end filtration)

เป็นการเดินระบบโดยการป้อนน้ำเสียในทิศทางตรงไปตั้งฉากกับพื้นผิวของเมมเบรน ทำให้บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนเกิดการสะสมของอนุภาคกลายเป็นชั้นเค้ก (Cake Filtration) ทำให้ประสิทธิภาพในการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนลดลง โดยปกติการเดินระบบในลักษณะนี้จะใช้เพื่อทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการเมมเบรน

2) การกรองแบบไหลตามขวาง (Crossflow filtration)

เป็นการเดินระบบโดยการป้อนน้ำเสียในทิศทางตรงไปขนานกับพื้นผิวของเมมเบรน หรือไหลตั้งฉากกับน้ำเพอมิเอท ซึ่งการเดินระบบแบบนี้จะอาศัยแรงเฉือนของการไหลของน้ำในการล้างอนุภาคที่เกาะอยู่ผิวหน้าของเมมเบรน จึงช่วยลดการสะสมตัวเป็นชั้นเค้กบนผิวหน้าของเมมเบรน และทำให้เมมเบรนอุดตันช้าลง



รูปที่ 2-17 ลักษณะการการกรอง (ก) แบบอัดตัว และ (ข) แบบไหลตามขวาง (Lee และคณะ, 2016)

2.7.2 ชนิดของเมมเบรน

2.7.2.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อนเพื่อแยกอนุภาคออกจากน้ำเสีย ซึ่งอุปกรณ์เมมเบรนที่ใช้จะมีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 0.1-10 ไมครอน ใช้สำหรับแยกอนุภาคเล็ก ๆ หรือสารแขวนลอย รวมถึงแบคทีเรียและเชื้อรา ออกจากน้ำเสีย กระบวนการนี้จะใช้แรงขับเคลื่อนในการแยกตัว (ประมาณ 100-400 กิโลปาสคาล) และอัตราการผลิตน้ำสูงกว่าเมมเบรนชนิดอื่น ๆ ที่ความดันเดียวกัน โดยทั่วไปจะใช้ในงานบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น

2.7.2.2 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

กระบวนการนี้จะใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กประมาณ 2-20 นาโนเมตร ในการแยกสารประเภทคอลลอยด์ และสารที่มีอนุภาคเล็กกว่าไมครอน ใช้แรงขับเคลื่อนในการแยกอยู่ที่ 100-800 กิโลปาสคาล นิยมใช้ในงานบำบัดน้ำเสียที่เป็นคอลลอยด์ การทำน้ำให้บริสุทธิ์ การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ และการแยกโปรตีน เป็นต้น

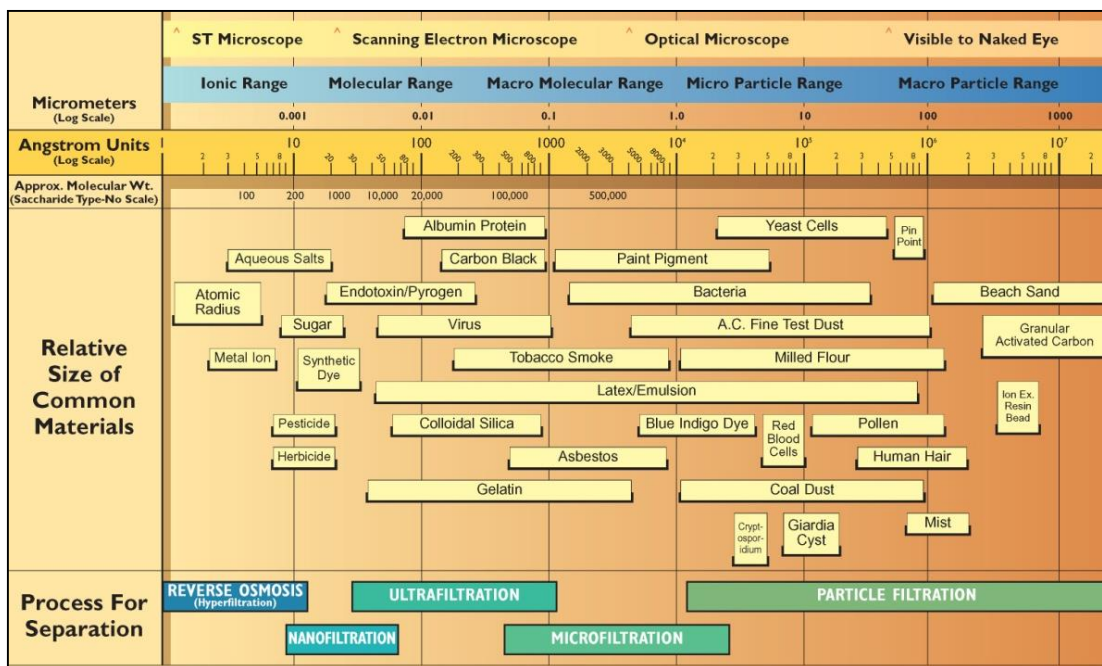
2.7.2.3 รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO)

หรือบางครั้งเรียกว่า ไฮเพอร์ฟิลเตรชัน (Hyper filtration) กระบวนการนี้จะทำงานโดยการเพิ่มความดันให้กับสารละลายเข้มข้น ซึ่งความดันที่เพิ่มเข้าไบนั้นต้องมีค่ามากกว่าความดันออสโมซิสของสารละลาย ทำให้น้ำบริสุทธิ์ถูกบังคับให้ไหลผ่านเมมเบรนโดยจะเหลืออนุภาคอื่น ๆ ไว้ สามารถแยกสารที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.1-1.0 นาโนเมตร ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้แรงขับ

ต้นสูงประมาณ 1-10 เมกกะปาสคาล มักใช้ในงานผลิตน้ำความบริสุทธิ์สูง การแยกเกลือออกจากน้ำ เพื่อผลิตน้ำจืด ตลอดจนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย เป็นต้น

2.7.2.4 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF)

กระบวนการนี้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสแต่จะใช้แรงดันที่ต่ำกว่า ซึ่งเมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดไอออนชนิดวาเลนซ์คู่ได้ในอัตราที่สูงกว่าวาเลนซ์เดี่ยว จึงทำให้ช่วยลดความกระด้างของน้ำ บางครั้งก็มักจะเรียกเมมเบรนชนิดนี้ว่า ซอฟเทนนิ่งเมมเบรน (Softening membrane)



รูปที่ 2-18 ชนิดของเมมเบรนและช่วงอนุภาคต่าง ๆ ที่สามารถคัดแยกได้ (Osmonics, 2010)

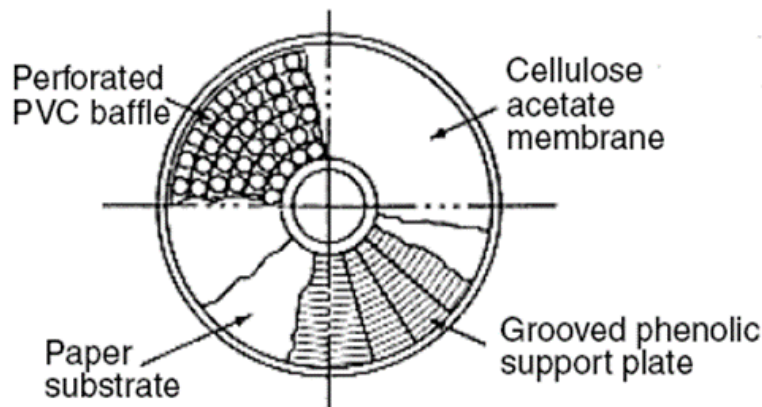
2.7.3 โมดูลที่ใช้ในงานในกระบวนการเมมเบรน

เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานของเมมเบรนในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องมีการบรรจุเมมเบรนลงในวัสดุรองรับที่เรียกว่าโมดูล โดยสามารถแยกลักษณะโมดูลออกได้เป็น 4 ประเภทคือ

2.7.3.1 โมดูลแบบแผ่นกรอง (Plate and Frame Module)

โมดูลชนิดนี้เป็นลักษณะการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุด โดยใช้กระบวนการที่ใกล้เคียงกับเครื่องกรองแบบอัดความดัน (Filter press) เมมเบรนจะถูกวางไว้บนแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลหรือมีรูพรุน (Porous plate) เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางในลักษณะซ้อนทับสลับกัน

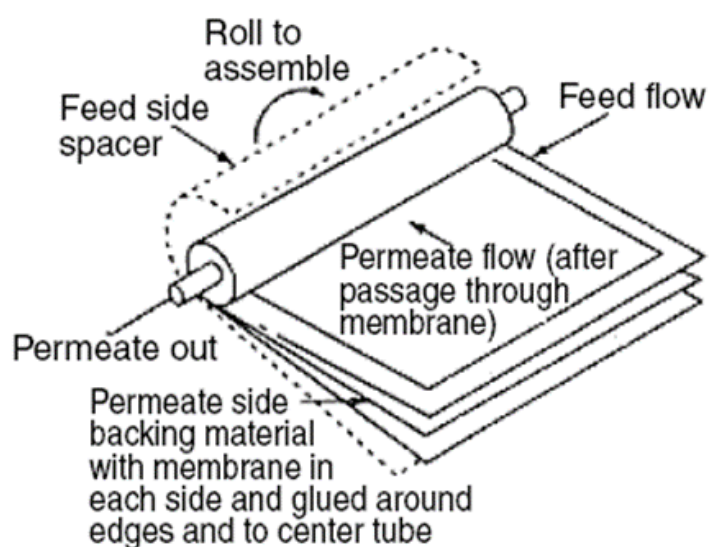
น้ำจะถูกบังคับให้ไหลผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับแล้วจึงไหลออกจากโมดูล โมดูลนี้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและค่าบำรุงรักษาสูงมาก



รูปที่ 2-19 โมดูลแบบแผ่นกรอง (Sincero และ Sincero, 2003)

2.7.3.2 โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound Module)

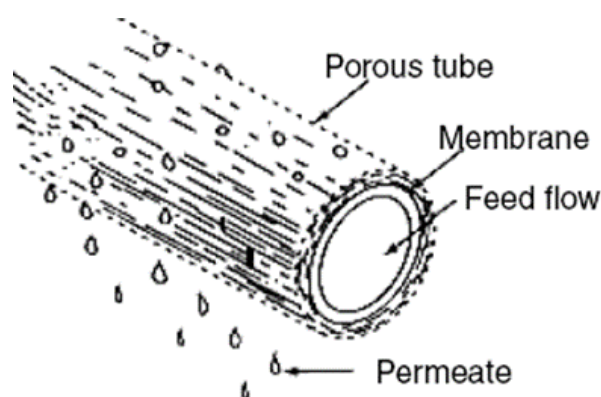
ลักษณะของโมดูลชนิดนี้จะเป็นแผ่นเมมเบรน 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุที่มีรูพรุนคั่นอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นเมมเบรนทั้งสอง จากนั้นม้วนทั้งสามแผ่นไปรอบท่อเจาะรู และใช้กาวพิเศษอุดขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้าน ส่วนขอบที่เหลือจะเปิดไว้โดยยึดติดกับท่อเจาะรู ด้านนอกของโมดูลจะถูกคลุมทับด้วยตะแกรงซึ่งทำด้วยโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) น้ำเสียจะถูกแรงดันบังคับให้ไหลตามแนวของแกนโมดูลแล้วซึมผ่านเมมเบรนลงไปถึงแผ่นรองรับ ซึ่งจะได้น้ำบริสุทธิ์ไหลออกไปทางท่อเจาะรูและออกจากโมดูล



รูปที่ 2-20 โมดูลแบบท่อม้วน (Sincero และ Sincero, 2003)

2.7.3.3 โมดูลแบบท่อ (Tubular Module)

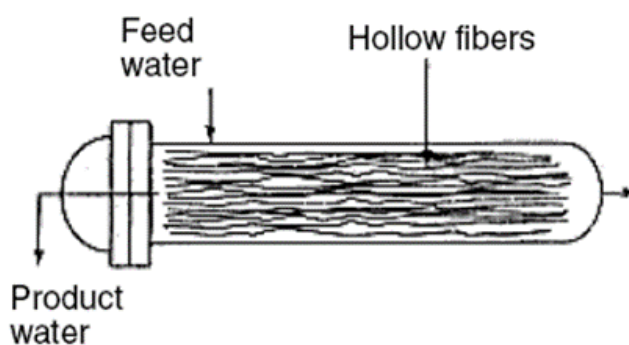
ลักษณะของโมดูลชนิดนี้จะเป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนให้เป็นท่อขนาดเล็กและยึดติดไว้ภายในของท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยไฟเบอร์กลาส หรือสแตนเลส ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางออกของน้ำและเป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรนไม่ให้เกิดการฉีกขาดในระหว่างการทำงาน โดยน้ำเสียที่เข้าระบบจะถูกแรงดันเข้าไปในท่อและซึมผ่านแผ่นเมมเบรนเข้าสู่ท่อรองรับ ซึ่งข้อดีของโมดูลชนิดนี้คือทำความสะอาดง่าย จึงมักจะนิยมนำไปใช้ในงานที่มีการอุดตันเกิดขึ้นเร็ว



รูปที่ 2-21 โมดูลแบบท่อ (Sincero และ Sincero, 2003)

2.7.3.4 โมดูลแบบเส้นใยกลาง (Hollow Fiber Module)

ลักษณะของโมดูลชนิดนี้จะเป็นเมมเบรนแบบเส้นใยกลางที่มีพื้นผิวคล้ายกับฟองน้ำล้อมรอบพื้นผิวชั้นในซึ่งมีความหนาเพียง 0.1 ไมครอน มัดรวมกันแล้วพับเป็นรูปตัวยูหรือรูปเกือกม้า โดยปลายทั้งสองข้างจะถูกตรึงอยู่ด้านหนึ่งของโมดูล เมมเบรนชนิดนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีความสกปรกหรือสิ่งเจือปนสูง เนื่องจากมีช่องว่างขนาดใหญ่ทำให้โอกาสอุดตันเกิดขึ้นน้อย และยังสามารถจัดรูปแบบการวางโมดูลได้หลายลักษณะ



รูปที่ 2-22 โมดูลแบบเส้นใยกลาง (Sincero และ Sincero, 2003)

2.8 รูปแบบการกระจายตัวของเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD)

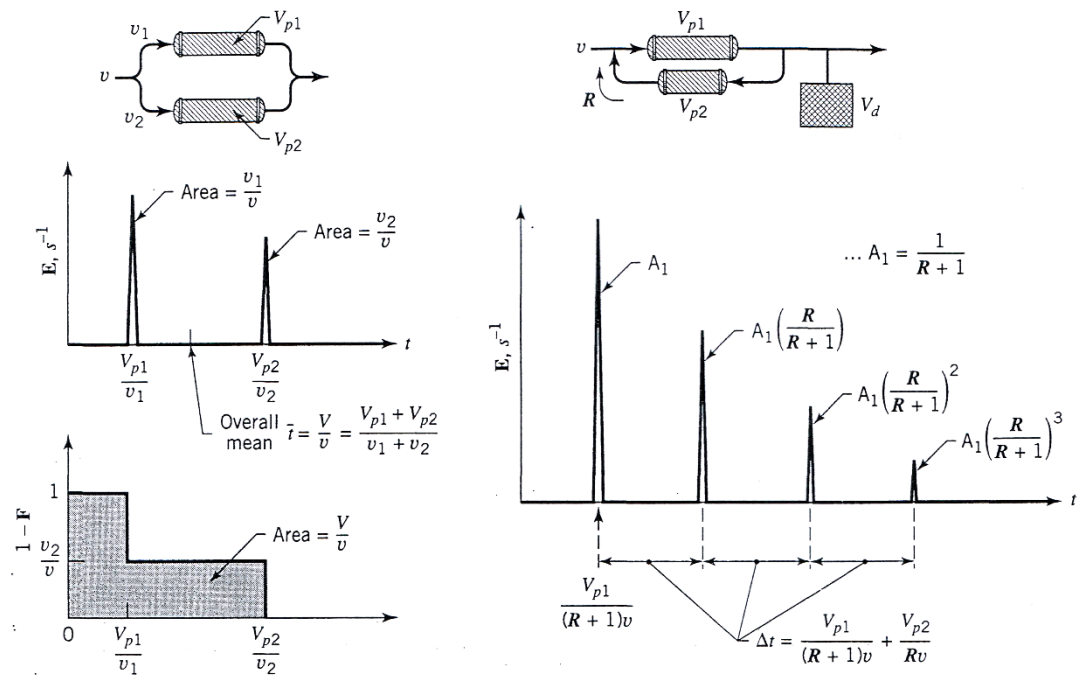
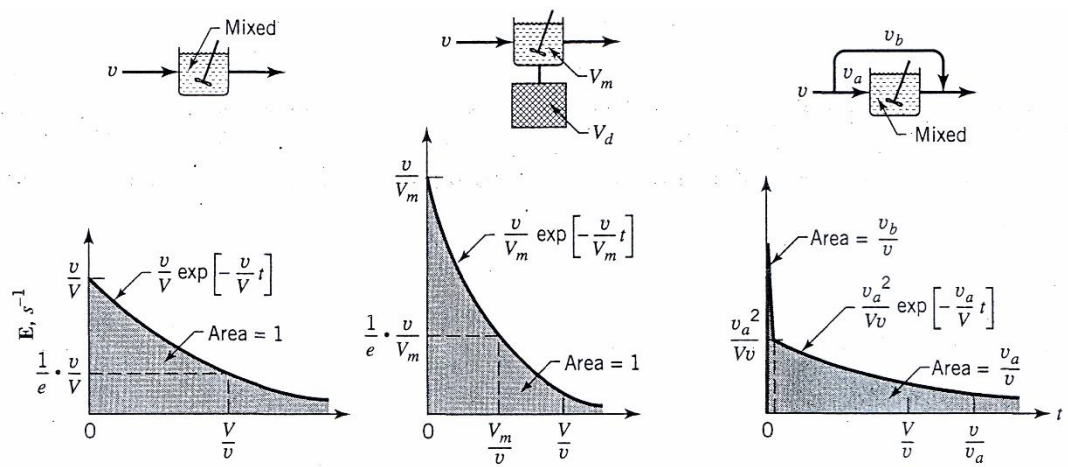
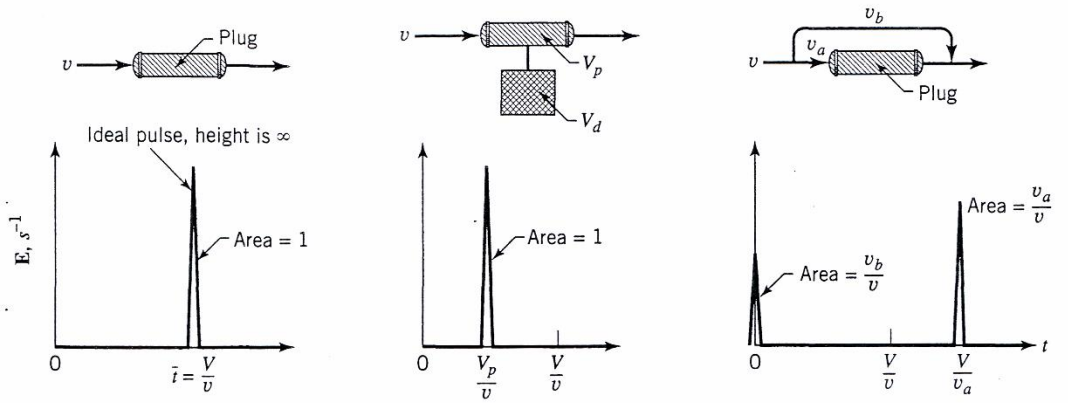
2.8.1 การไหลแบบไม่อุดมคติ (Non-Ideal flow)

ในการเดินระบบจริงของถังปฏิกริยาเรามักพบว่าอุปกรณ์ที่ใช้มีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งเกิดจากในการทำงานของถังจริง ๆ นั้นมักจะมีรูปแบบการไหลแตกต่างจากถังในอุดมคติเป็นอย่างมาก การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการอธิบายการทำงานของถังปฏิกริยาต่าง ๆ แบบไม่อุดมคติจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการวิเคราะห์ผลและคาดคะเนประสิทธิภาพหรือความเข้มข้นของสารที่ได้จากถังปฏิกริยา (Levenspiel, 1999) การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของเวลากักทำได้โดยการใช้สารชี้วัด (Tracer) ฉายเข้าไปในถังปฏิกริยา แล้ววัดความเข้มข้นของสารชี้วัดตรงทางออกของถังปฏิกริยาที่เวลาต่าง ๆ กัน แล้วนำไปหา ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution function) หรือ $E(t)$ โดยลักษณะการจ่ายสารชี้วัดเข้าสู่ถังปฏิกริยาจะมีวิธีทดลองอยู่ 2 รูปแบบ คือ

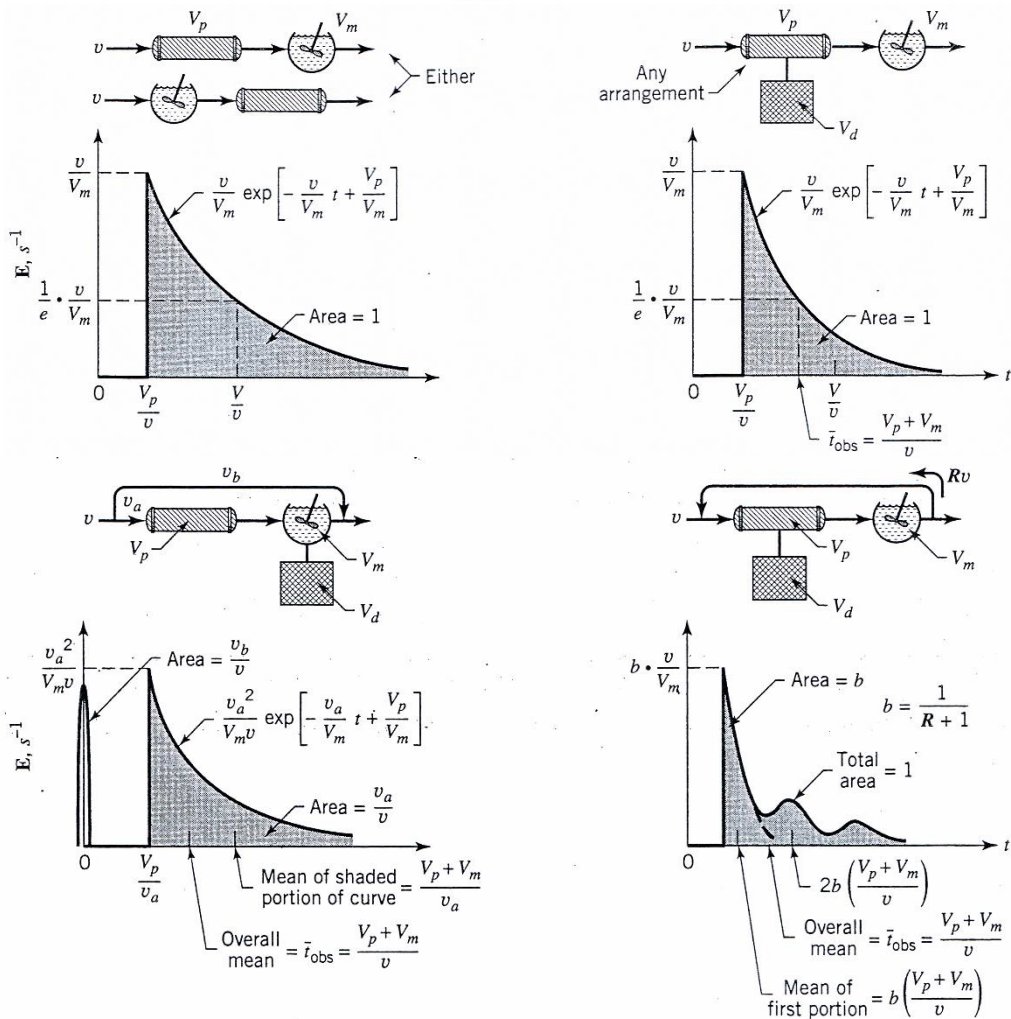
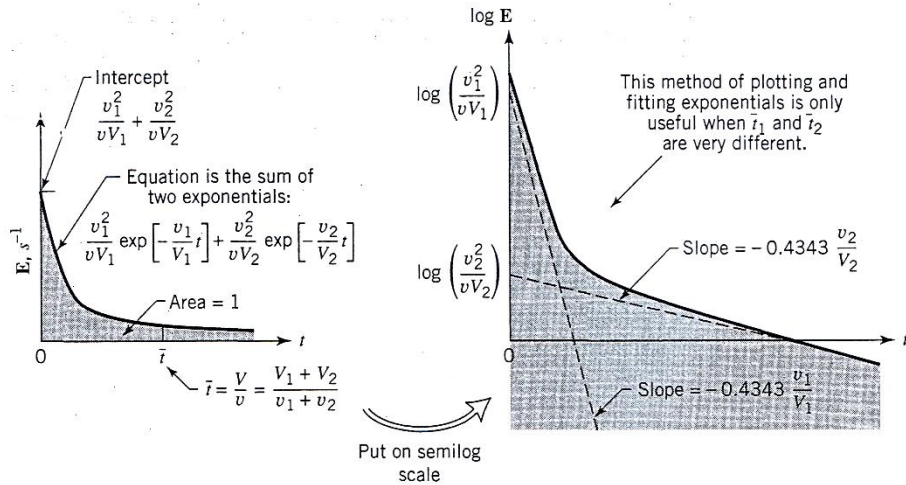
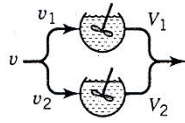
- 1) การจ่ายแบบครั้งเดียว หรือแบบพัลส์ (Pulse input experiments) เป็นการจ่ายสารชี้วัดในปริมาณหนึ่งเข้าสู่ถังปฏิกริยาอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาที่สั้นที่สุด
- 2) การจ่ายแบบต่อเนื่อง (Step input experiment) เป็นการจ่ายสารชี้วัดในปริมาณหนึ่งเข้าสู่ถังปฏิกริยาอย่างต่อเนื่อง

2.8.2 แบบจำลองการไหล (Compartment flow models)

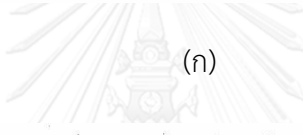
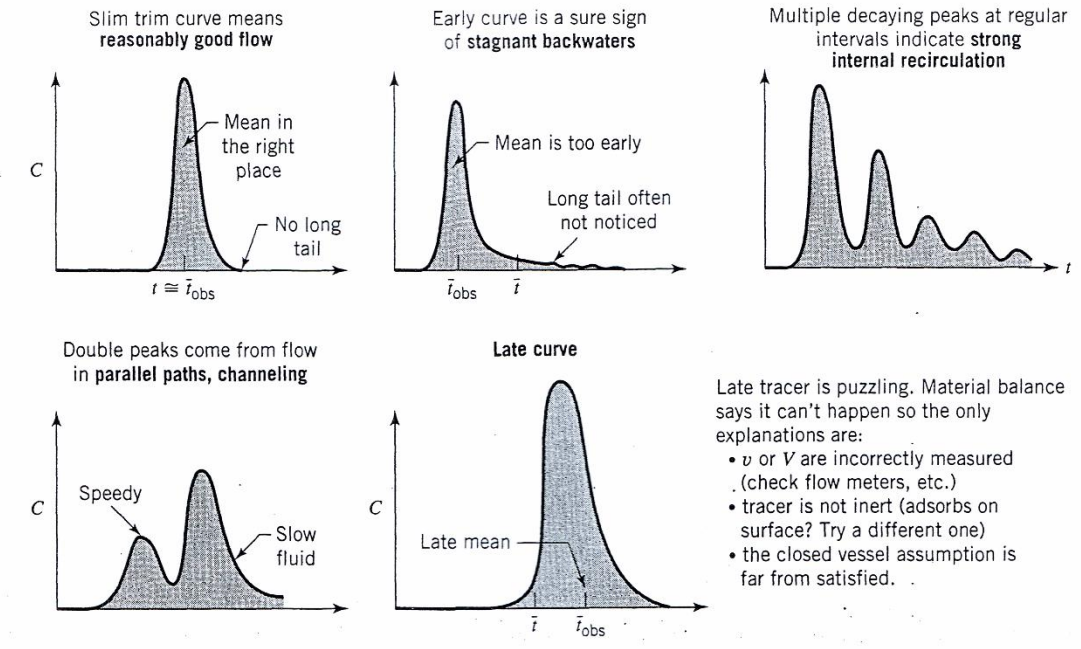
Compartment flow model เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะของรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา โดยการใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก เพื่อสร้างกราฟ E curve ของการไหลในถังปฏิกริยาเปรียบเทียบกับรูปแบบกราฟในทฤษฎี ซึ่งกราฟ E curve ที่ได้จะสามารถใช้จำลองรูปแบบการไหลลักษณะต่าง ๆ ภายในถังปฏิกริยาได้ (Levenspiel, 1999) โดยแบบจำลองการไหลลักษณะต่าง ๆ ในทางทฤษฎี และการวิเคราะห์ลักษณะกราฟ แสดงได้ดังรูปที่ 2-23 และ 2-24 ตามลำดับ



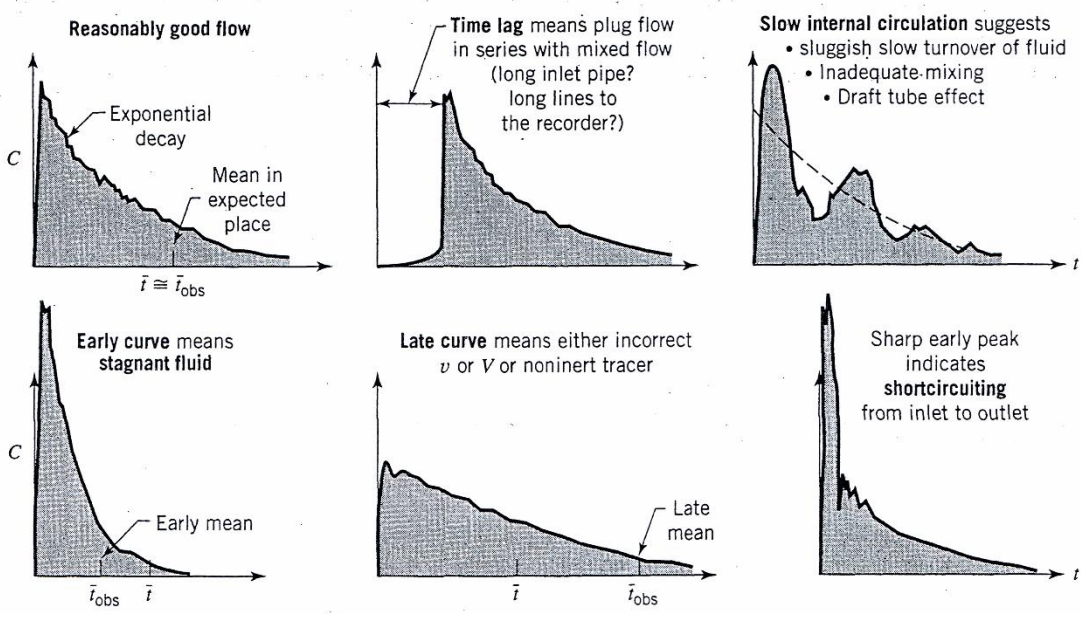
รูปที่ 2-23 แบบจำลองการไหลชนิดต่าง ๆ (Levenspiel, 1999)



รูปที่ 2-23 แบบจำลองการไหลชนิดต่าง ๆ (ต่อ) (Levenspiel, 1999)



(ก)



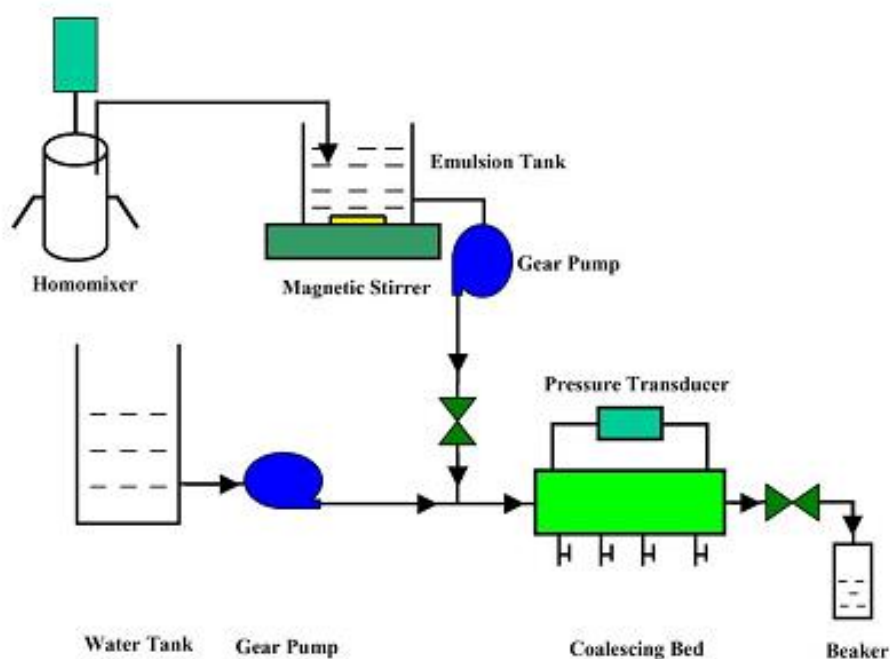
(ข)

รูปที่ 2-24 การวิเคราะห์ลักษณะกราฟ (ก) Plug flow และ (ข) Mixed flow (Levenspiel, 1999)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา โดยศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของ เพื่อใช้ในการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอสเซอร์และอุปกรณ์เมมเบรนที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีดังนี้

Li และ Gu (2005) ศึกษาการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำด้วยกระบวนการโคเอสเซอร์ อุปกรณ์โคเอสเซอร์มีลักษณะเป็นท่อสเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 73 มิลลิเมตร ยาว 70 เซนติเมตร รูปแบบวนอน ใช้ตัวกลาง 3 ชนิดคือ โพลีโพรไพลีนแบบเม็ด เส้นใยโพลีโพรไพลีน และเส้นใยไนลอน น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบสังเคราะห์ และน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันแร่สังเคราะห์ ทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นของน้ำมัน ความหนาของชั้นตัวกลาง และขนาดของเส้นใย



รูปที่ 2-25 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน (Li และ Gu, 2005)

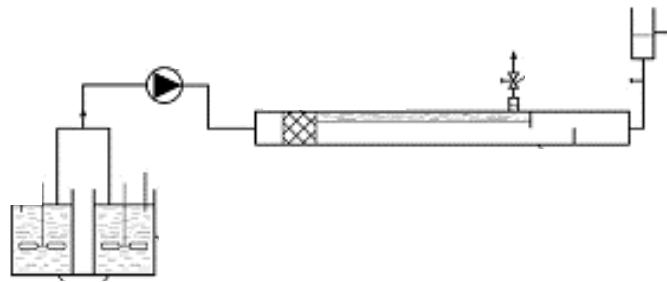
ผลการศึกษาพบว่า

1. ประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์จะลดลงเมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียและความเข้มข้นของน้ำมันที่เข้าระบบสูงขึ้น
2. ความหนาของชั้นตัวกลางไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์แบบแวนอนอย่างมีนัยสำคัญ
3. ตัวกลางเส้นใยขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการรวมอนุภาคน้ำมันสูงกว่าตัวกลางเส้นใยขนาดใหญ่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันมากกว่า

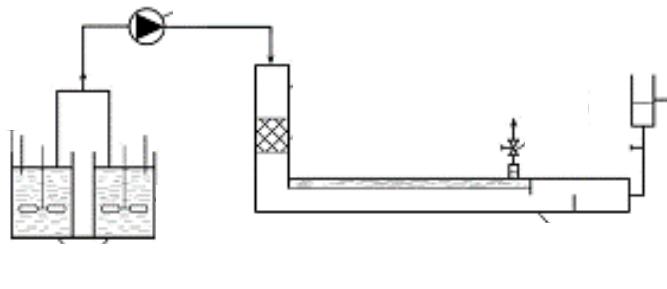
Sokolović และคณะ (2006) ศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยในการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ 3 รูปแบบคือ แบบแวนอน แบบแนวตั้งน้ำไหลลง และแบบแนวตั้งน้ำไหลขึ้น ใช้ตัวกลางเป็นเส้นใยพอลิยูรีเทน ทดลองโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันแร่สังเคราะห์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ทั้ง 3 รูปแบบโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วง 16-50 เมตรต่อชั่วโมง ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ความพรุนของตัวกลาง และความหนาของชั้นตัวกลาง

ผลการศึกษาพบว่า

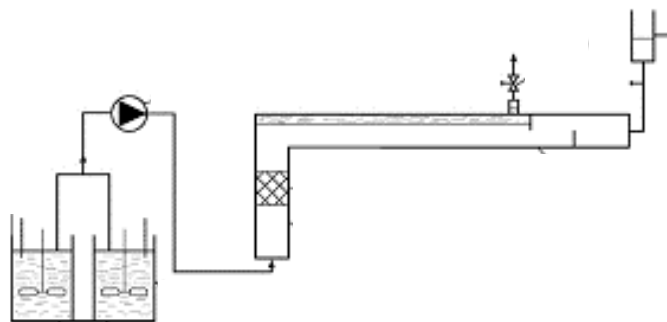
1. เมื่อพิจารณาที่ความเร็ววิกฤตอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแวนอนจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ส่วนอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งน้ำไหลขึ้นจะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุด
2. อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแวนอนสามารถรองรับความเร็วการไหลของน้ำเสียได้สูงกว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง
3. ประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความพรุนของตัวกลางเพิ่มขึ้น
4. ความหนาของชั้นตัวกลางส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งแต่ไม่ส่งผลต่ออุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแวนอนอย่างมีนัยสำคัญ



(ก)



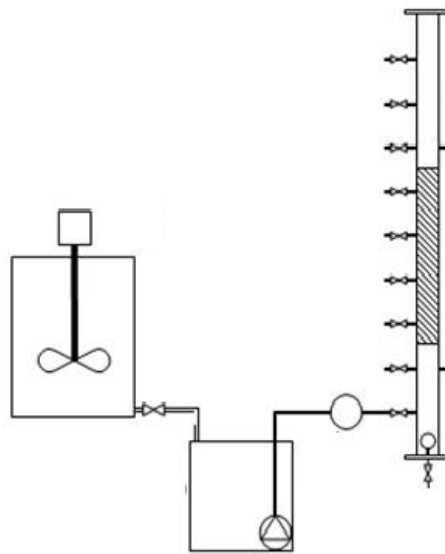
(ข)



(ค)

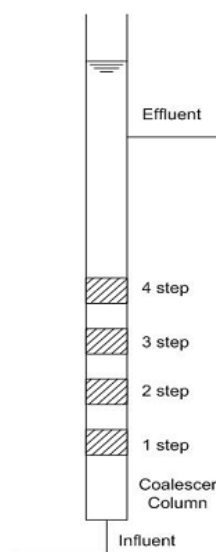
รูปที่ 2-26 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลของน้ำเสีย
 (ก) แนวนอน (ข) แนวตั้งไหลลง และ (ค) แนวตั้งไหลขึ้น (Sokolović และคณะ, 2006)

Painmanakul และคณะ (2009) ศึกษาเรื่องการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์โดยใช้ตัวกลางแบบเส้นใย 2 ชนิดคือ เส้นใยสแตนเลส และเส้นใยพลาสติกใช้ถังโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง ทำการทดลองกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดคือ ชนิดของตัวกลาง ความหนาของชั้นตัวกลาง และการเพิ่มจำนวนชั้นของตัวกลาง



รูปที่ 2-27 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาเรื่องการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ (Painmanakul และคณะ, 2009)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2-28 การทดลองเพิ่มจำนวนชั้นตัวกลาง (Painmanakul และคณะ, 2009)

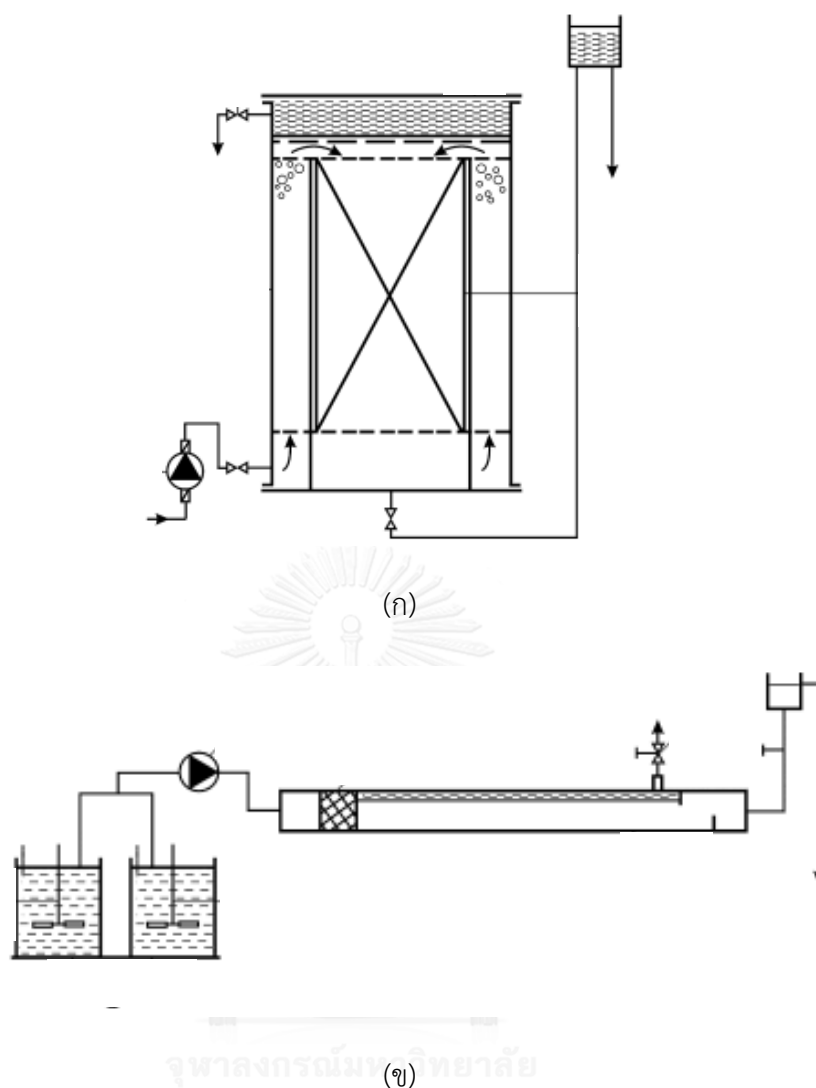
ผลการศึกษาพบว่า

1. ตัวกลางเส้นใยพลาสติกมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่าตัวกลางเส้นใยสแตนเลส โดยประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ 44.4%
2. ความหนาของชั้นตัวกลางส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยในการทดลองนี้เมื่อความหนาชั้นตัวกลางลดลงประสิทธิภาพจะเพิ่มมากขึ้น
3. การเพิ่มชั้นตัวกลางเป็น 2 ชั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ได้มากกว่าการติดตั้งแบบชั้นเดียว โดยประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ 51%

Sokolović และคณะ (2010) ศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำโดยใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน ในการทดลองจะใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โมเดล “04” ซึ่งเป็นอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง และโมเดล “H” ซึ่งเป็นอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน ใช้ตัวกลางชนิดพอลิสไตรีนแบบเม็ด และเส้นใยพอลิยูรีเทน ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบจริงจากแหล่งต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ทั้ง 2 รูปแบบ

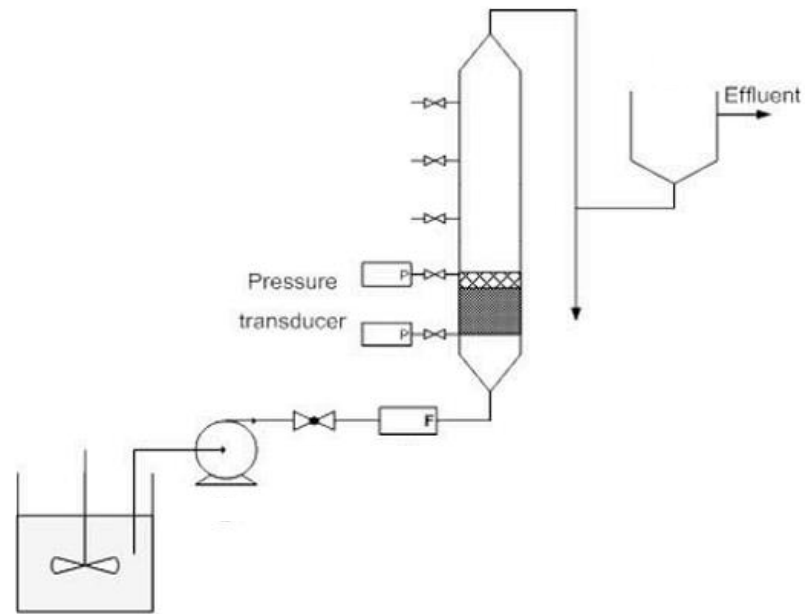
ผลการศึกษาพบว่า

1. ความแตกต่างของลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียแต่ละชนิด ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ต่างกัน เมื่อทำการทดลองโดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ที่สภาวะเดียวกัน
2. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลของน้ำเสียที่สูงขึ้น โมเดล “H” ซึ่งเป็นอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าโมเดล “04” ที่เป็นอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง

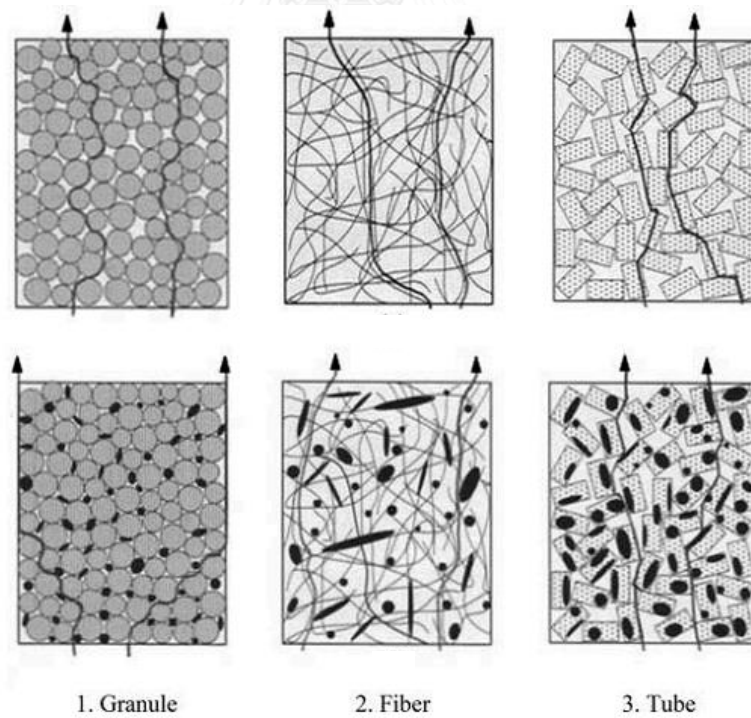


รูปที่ 2-29 การติดตั้งชุดการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคน้ำมันด้วยโคอะเลสเซอร์ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน (ก) โมเดล “04” และ (ข) โมเดล “H” (Sokolović และคณะ, 2010)

Chawaloesphonsiya และ Painmanakul (2014) ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันของกระบวนการโคอะเลสเซอร์เมื่อใช้ตัวกลางที่มีรูปแบบแตกต่างกัน ทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ รูปแบบตัวกลาง ความเร็วการไหลของน้ำเสีย และขนาดอนุภาคน้ำมัน ทดลองโดยใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง ใช้ตัวกลาง 3 ชนิด คือ เส้นใยพอลิโพรไพลีน พอลิโพรไพลีนแบบเม็ด และพอลิโพรไพลีนแบบทรงกระบอกกลวง ใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลในช่วง 2.0-6.8 เซนติเมตรต่อวินาที แล้ววิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของตัวกลางทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 2-30 การติดตั้งชุดการทดลองศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันเมื่อใช้ตัวกลางที่มีรูปแบบแตกต่างกัน (Chawaloesphonsiya และ Painmanakul, 2014)

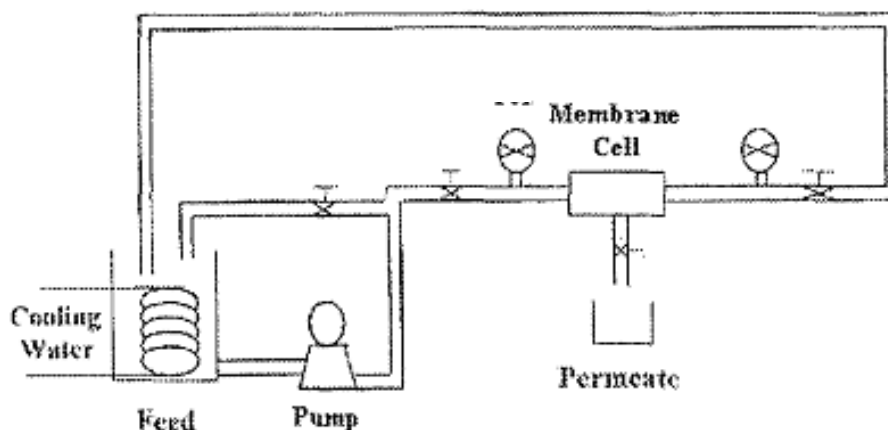


รูปที่ 2-31 รูปแบบการไหลผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์ของน้ำเสีย (Chawaloesphonsiya และ Painmanakul, 2014)

ผลการศึกษาพบว่า

1. เมื่อใช้ตัวกลางพอลิโพรไพลีนแบบทรงกระบอกกลวงจะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 43%
2. ประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์จะลดลงเมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้น
3. เมื่ออนุภาคน้ำมันขนาดเล็กผ่านเข้าสู่ชั้นตัวกลางจะเกิดการรวมตัวและมีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากนั้นจะหลุดออกจากชั้นตัวกลางและแยกตัวออกจากน้ำได้เร็วขึ้น

Mohammadi และคณะ (2003) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์เมมเบรน ในกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส การทดลองนี้ใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบสังเคราะห์ โมดูลเมมเบรนเป็นแบบแผ่นผลิตจากพอลิเอไมด์ซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำ ทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความดัน ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ อุณหภูมิ และความเร็วการไหลแบบเฉือน (Crossflow velocity)

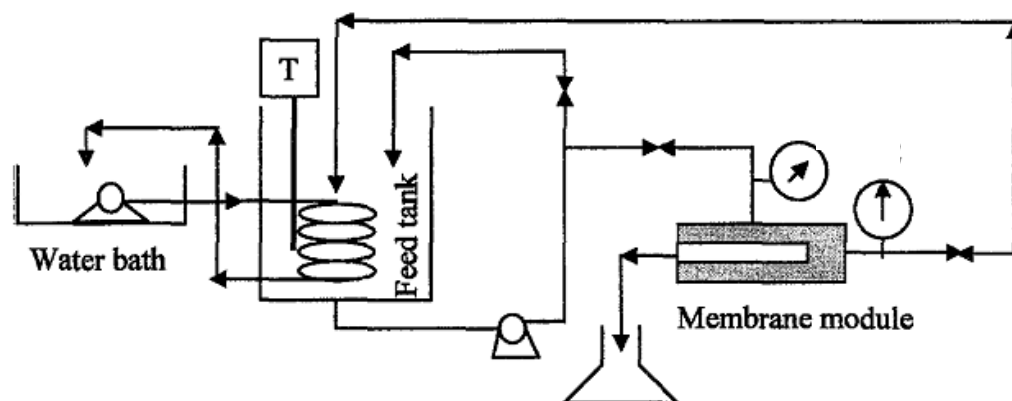


รูปที่ 2-32 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์เมมเบรน ในกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Mohammadi และคณะ, 2003)

ผลการศึกษาพบว่า

1. เมื่อเดินระบบค่าฟลักซ์ของเมมเบรนจะลดลงตามเวลา
2. ค่าฟลักซ์ของเมมเบรนจะลดลงเมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น
3. ค่าฟลักซ์ของเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความดันและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น
4. เมื่อความเร็วการไหลแบบเฉือนเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์ของเมมเบรนจะเพิ่มสูงขึ้น

Mohammadi และคณะ (2004) ศึกษาประสิทธิภาพของการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน เมมเบรนชนิดท่อเซรามิกที่สร้างขึ้นโดยใช้ดินขาว (Kaolin) เป็นวัสดุ ทดลองโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันดิบสังเคราะห์ วิเคราะห์ประสิทธิภาพและลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อเดินระบบ



รูปที่ 2-33 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกรองของเมมเบรนท่อเซรามิก ที่สร้างขึ้นโดยใช้ดินขาว (Kaolin) เป็นวัสดุ (Mohammadi และคณะ, 2004)

ผลการศึกษาพบว่า

1. อุปกรณ์เมมเบรนที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการเดินระบบมากกว่า 50% เมื่อเวลาผ่านไป 4.5 ชั่วโมง
2. อุปกรณ์เมมเบรนที่สร้างขึ้นใช้วัสดุที่มีลักษณะชอบน้ำช่วยลดปัญหาการอุดตันจากการเกาะตัวของฟิล์มน้ำมันบนผิวเมมเบรน

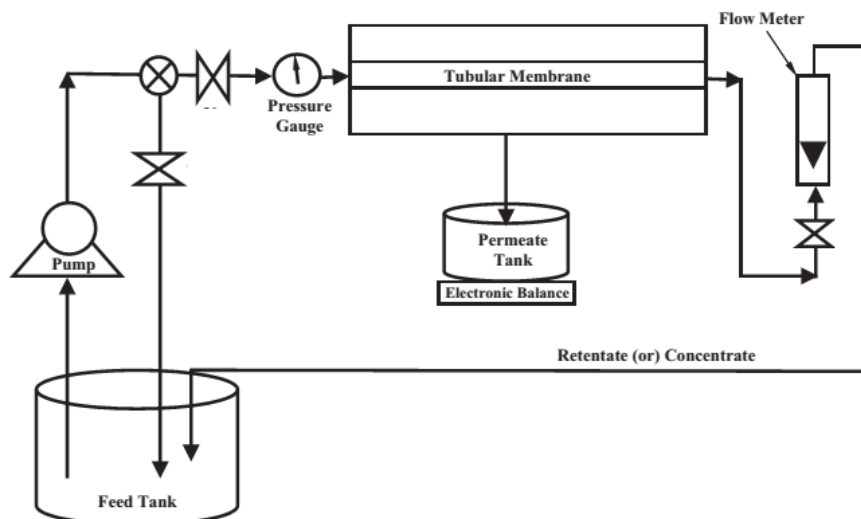
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Kumar และคณะ (2015) ศึกษาประสิทธิภาพการกรองโดยใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เมมเบรนชนิดท่อเซรามิกที่สร้างขึ้นด้วยวัสดุราคาถูกลง ทดลองโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบสังเคราะห์ วิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน ได้แก่ ค่าความดัน ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ และความเร็วการไหลแบบเฉือน

ผลการศึกษาพบว่า

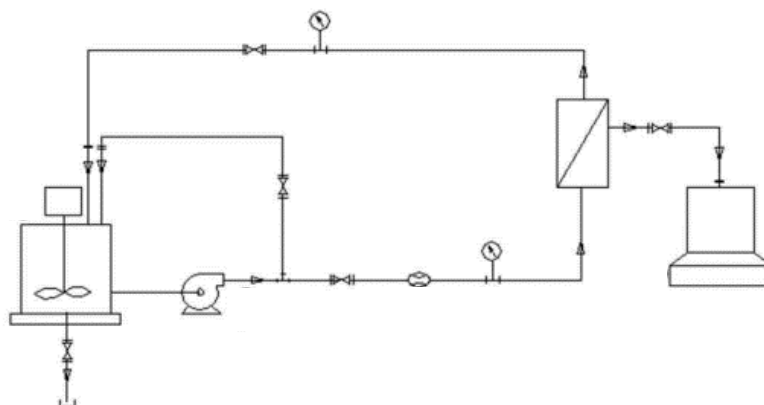
1. เมื่อค่าความดันเพิ่มสูงขึ้นค่าฟลักซ์ของเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง เนื่องจากความดันที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงและไหลผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปกับน้ำขาออก ประสิทธิภาพของระบบจึงลดลง
2. เมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์ของเมมเบรนจะลดลงแต่ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบสูงขึ้น จะทำให้เกิดชั้นเค้กที่ผิวเมมเบรนเพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรอง ทำให้น้ำขาออกมีคุณภาพมากขึ้น

3. เมื่อความเร็วการไหลแบบเฉือนเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์ของเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง การเพิ่มความเร็วการไหลแบบเฉือนของน้ำเสียจะช่วยชะล้างฟิล์มไขมันที่อุดตันเป็นชั้นเค้กบนผิวเมมเบรนทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อชั้นเค้กมีน้อยลงประสิทธิภาพในการกรองก็จะลดน้อยลง



รูปที่ 2-34 การติดตั้งชุดการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกรองโดยใช้เมมเบรน
ท่อเซรามิกที่สร้างขึ้นด้วยวัสดุราคาถูกลง (Kumar และคณะ, 2015)

ปทุมทริย์ เขียวภักดี (2554) ศึกษาการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองเป็นโมดูลชนิดแผ่นกรอง บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มและน้ำมันตัด โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เช่น ค่าความดัน ความเข้มข้นของน้ำเสีย และความเร็วการไหลแบบเฉือน เป็นต้น รวมทั้งศึกษาลักษณะการเกิดการอุดตัน และการใช้สารเคมีในการทำความสะอาดผิวเมมเบรน



รูปที่ 2-35 การติดตั้งชุดการทดลองศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วย
กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (บุญพริ้ง เขียวภักดี, 2554)

ผลการศึกษาพบว่า

1. ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ และความดันในการเดินระบบไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เนื่องจากเมมเบรนที่ใช้มีความสามารถในการกักเก็บอนุภาคน้ำมันสูง
2. เมื่อความเร็วการไหลแบบเฉือนเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น
3. เมื่อค่าความดันสูงขึ้นค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น
4. การอุดตันบนผิวเมมเบรนมีลักษณะเป็นชั้นแค้ก สามารถทำความสะอาดโดยการล้างผิวหน้าของเมมเบรนได้
5. การใช้สารเคมีในการทำความสะอาดจะช่วยฟื้นฟูประสิทธิภาพของเมมเบรนได้ แต่หากสารเคมีที่ใช้มีความเข้มข้นสูงเกินไปจะทำให้ผิวเมมเบรนถูกทำลาย ส่งผลให้สมบัติของเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไป

2.9.1 สรุปผลการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2-4 สรุปผลการศึกษาระบบการโคอะเลสเซอร์

ผู้วิจัย	ชนิดน้ำเสีย	รูปแบบ โคอะเลสเซอร์	ชนิดตัวกลาง	ผลการศึกษา
Li และ Gu (2005)	- น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันดิบ สังเคราะห์ - น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันแร่สังเคราะห์	- แบบแนวนอน	- เส้นใยพอลิโพร ไพลีน - เส้นใยไนลอน - พอลิโพรไพลีน แบบเม็ด	- เมื่อความเร็วการไหลของ น้ำเสียสูงขึ้นประสิทธิภาพ จะลดลง - เมื่อความเข้มข้นของ น้ำมันสูงขึ้นประสิทธิภาพ จะลดลง - ความหนาชั้นตัวกลางไม่ ส่งผลต่อประสิทธิภาพ อย่างมีนัยสำคัญ - เส้นใยที่มีขนาดเล็กมี ประสิทธิภาพกว่าเส้นใย ขนาดใหญ่
Sokolović และคณะ (2006)	- น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันแร่สังเคราะห์	- แบบแนวนอน - แบบแนวตั้ง ไหลลง - แบบแนวตั้ง ไหลขึ้น	- เส้นใยพอลิยูรี เทน	- รูปแบบแนวนอนมี ประสิทธิภาพมากกว่าแบบ แนวตั้งที่ความเร็ว วิกฤต - รูปแบบแนวตั้งไหลลงมี ประสิทธิภาพมากกว่าแบบ แนวตั้งไหลขึ้นที่ ความเร็ววิกฤต - เมื่อค่าความพรุนของชั้น ตัวกลางเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น - ความหนาชั้นตัวกลาง ส่งผลต่อประสิทธิภาพ เฉพาะแบบแนวตั้ง

ตารางที่ 2-4 สรุปผลการศึกษาระบบการโคอะเลสเซอร์ (ต่อ)

ผู้วิจัย	ชนิดน้ำเสีย	รูปแบบ โคอะเลสเซอร์	ชนิดตัวกลาง	ผลการศึกษา
Painmanakul และคณะ (2009)	- น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม สังเคราะห์	- แบบแนวตั้ง ไหลขึ้น	- เส้นใยสแตนเลส - เส้นใยพลาสติก	- เส้นใยพลาสติกมี ประสิทธิภาพมากกว่าเส้น ใยสแตนเลส - เมื่อความหนาของชั้น ตัวกลางเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลง - การวางตัวกลางแบบ 2 ชั้นทำให้ประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้นมากกว่าแบบชั้น เดียว
Sokolović และคณะ (2010)	- น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันดิบจาก พื้นที่ต่าง ๆ	- แบบแนวตั้ง (โมเดล “04”) - แบบแนวนอน (โมเดล “H”)	- พอลิสไตรีน แบบเม็ด - เส้นใยพอลิยูรี เทน	- ลักษณะคุณสมบัติของ น้ำเสียแต่ละชนิดจะส่งผล ต่อประสิทธิภาพที่แตกต่าง กัน - รูปแบบแนวนอนจะ รองรับความเร็วการไหล ของน้ำเสียได้สูงกว่าแบบ แนวตั้ง - โมเดล “H” มีประสิทธิ ภาพมากกว่าโมเดล “04”
Chawaloes phonsiya และ Painmanakul (2014)	- น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด สังเคราะห์	- แบบแนวตั้ง ไหลขึ้น	- เส้นใยพอลิโพร ไพลีน - พอลิโพรไพลีน แบบเม็ด - พอลิโพรไพลีน แบบ ทรงกระบอก กลวง	- เมื่อความเร็วการไหลของ น้ำเสียสูงขึ้นประสิทธิภาพ จะลดลง - อนุภาคน้ำมันขนาดเล็ก เมื่อผ่านชั้นตัวกลางจะมี ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น - ลักษณะตัวกลางแบบ ทรงกระบอกกลวงมี ประสิทธิภาพสูงที่สุด

ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาระบบการเมมเบรน

ผู้วิจัย	ชนิดน้ำเสีย	กระบวนการเมมเบรน	ชนิดโมดูล	ผลการศึกษา
Mohammadi และคณะ (2003)	- น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบ สังเคราะห์	- รีเวอร์สออสโมซิส	- แผ่นกรองพอลิเอไมด์	- ค่าฟลักซ์จะลดลงตามเวลา - เมื่อค่าความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น - เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันสูงขึ้นค่าฟลักซ์จะลดลง - เมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียสูงขึ้นค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น
Mohammadi และคณะ (2004)	- น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบ สังเคราะห์	- ไมโครฟิลเตรชัน	- ท่อกรองเซรามิก	- ท่อเซรามิกมีคุณสมบัติชอบน้ำ ช่วยให้การอุดตันของน้ำมันลดลง - ประสิทธิภาพในการเดินระบบมากกว่า 50%
Kumar และคณะ (2015)	- น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบ สังเคราะห์	- ไมโครฟิลเตรชัน	- ท่อกรองเซรามิก	- เมื่อค่าความดันสูงขึ้นค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพจะลดลง - เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นค่าฟลักซ์จะลดลงแต่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น - เมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียสูงขึ้นค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพจะลดลง

ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาระบบการเมมเบรน (ต่อ)

ผู้วิจัย	ชนิดน้ำเสีย	กระบวนการเมมเบรน	ชนิดโมดูล	ผลการศึกษา
บุญตรีย์ เชียวภักดี (2554)	- น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม สังเคราะห์ - น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด สังเคราะห์	- อัลตราฟิลเตร ชั้น	- แผ่นกรอง Regenerated cellulose	- ความเข้มข้นของน้ำเสีย และความดันไม่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพในการบำบัด - เมื่อความเร็วการไหล และค่าความดันเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น - ลักษณะการอุดตันบนผิว เมมเบรนเป็นแบบชั้นเค้ก - การใช้สารเคมีที่มีความ เข้มข้นเหมาะสม ในการ ทำความสะอาด จะช่วย ฟื้นฟูประสิทธิภาพของเมม เบรน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น พบว่าการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสามารถทำได้ด้วยกระบวนการบำบัดทางกายภาพ ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีประสิทธิภาพและข้อจำกัดในการเดินระบบที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือกระบวนการโคalesceเซอร์ (Coalescer) และกระบวนการเมมเบรน (Membrane) โดยทั้งสองกระบวนการสามารถนำไปใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ ซึ่งกลไกการทำงานและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเมื่อเดินระบบทั้งสองร่วมกันยังเป็นประเด็นที่น่าสนใจและต้องมีการศึกษาค้นคว้าต่อไป

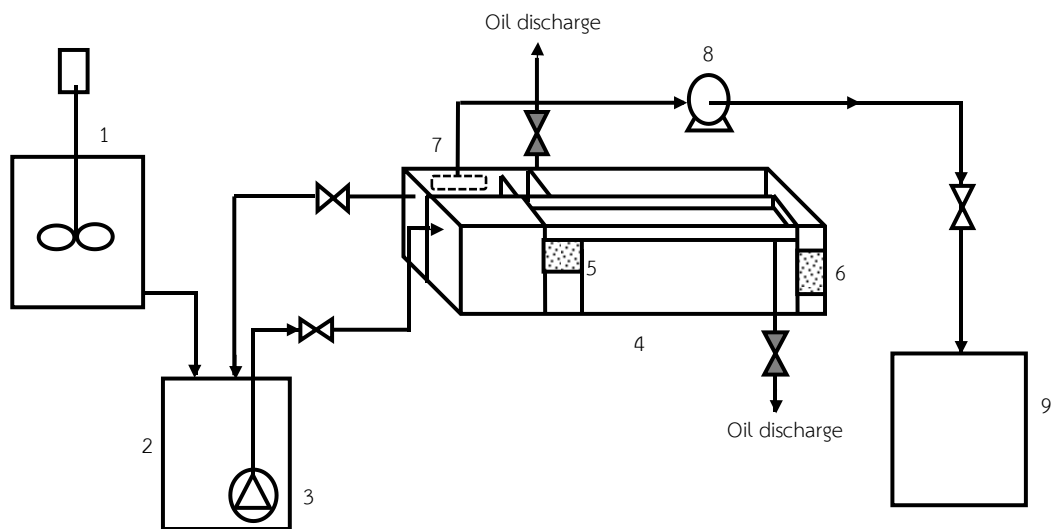
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำกระบวนการโคalesceเซอร์มาใช้ร่วมกับกระบวนการเมมเบรน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดข้อจำกัดของการอุดตันของเมมเบรนและลดความถี่ในการทำความสะอาดเมมเบรน พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย รวมถึงเข้าใจถึงกลไกและตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัด เช่น ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นของน้ำเสีย รูปแบบของอุปกรณ์โคalesceเซอร์และเมมเบรน เป็นต้น

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 การติดตั้งชุดการทดลอง

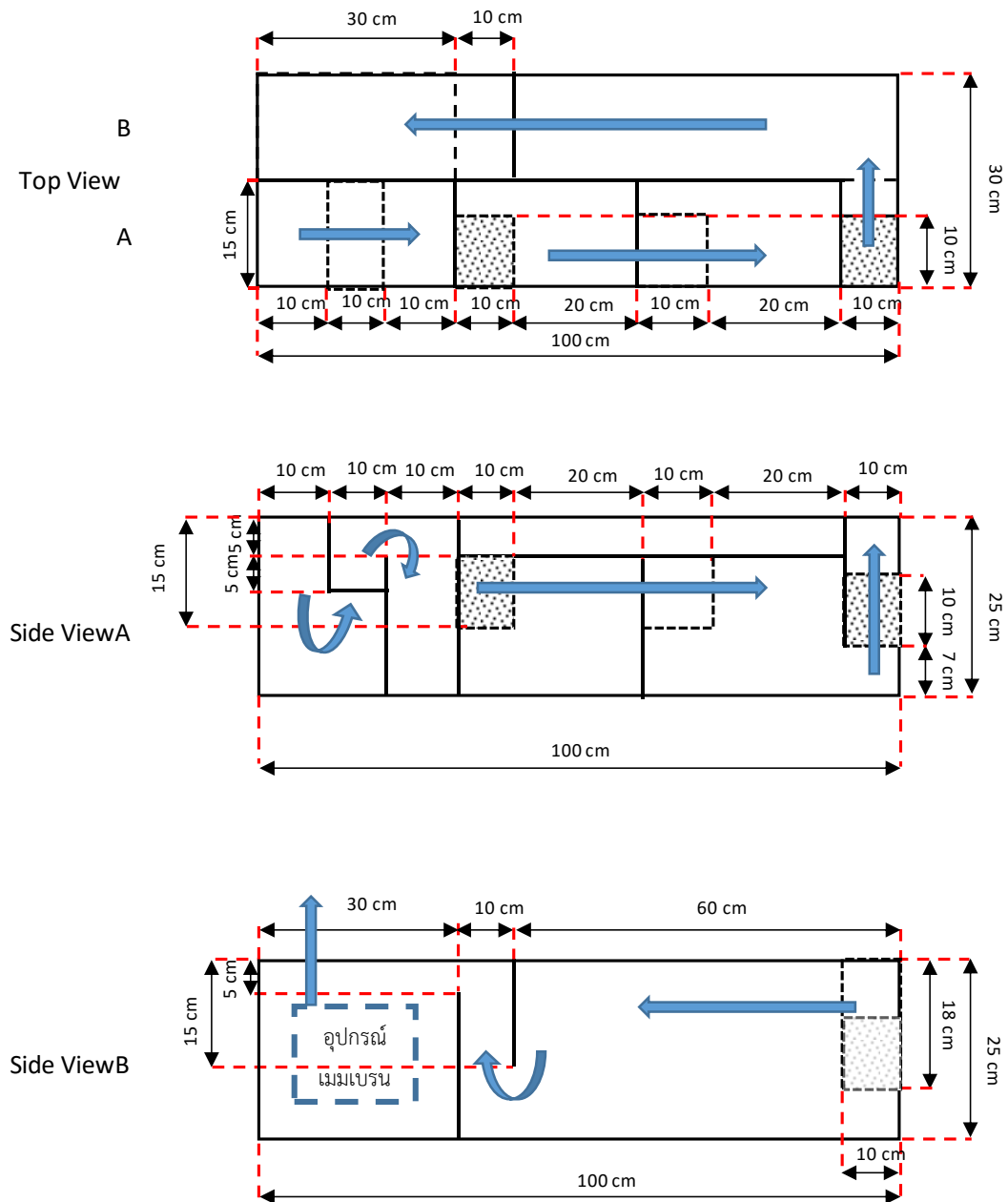



- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| 1) เครื่องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ | 7) อุปกรณ์เมตร |
| 2) ถังพักน้ำเสีย | 8) เครื่องสูบน้ำไดอะแฟรม |
| 3) เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม | 9) ถังเก็บน้ำขาออก |
| 4) ถังปฏิกริยา | ☒ valve normally open |
| 5) อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน | ☒ Valve normally closed |
| 6) อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง | |

รูปที่ 3-1 แผนผังการติดตั้งชุดการทดลองของกระบวนการร่วม



รูปที่ 3-2 การติดตั้งอุปกรณ์



หมายเหตุ :  เส้นทางไหลของน้ำ
รูปที่ 3-3 ลักษณะและการไหลของน้ำในถังปฏิกริยา

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์

- 1) ถังปฏิกริยาทำจากอะคริลิกใส ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง 25 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3-2 การเดินระบบจะทำการเติมน้ำเสียที่ใช้วิเคราะห์ให้เต็มในถังทั้งหมดก่อน แล้วจึงเริ่มการทดลองในขั้นต่อไป

- 2) ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทำจากวัสดุพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) ซึ่งเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร และยาว 10 มิลลิเมตร



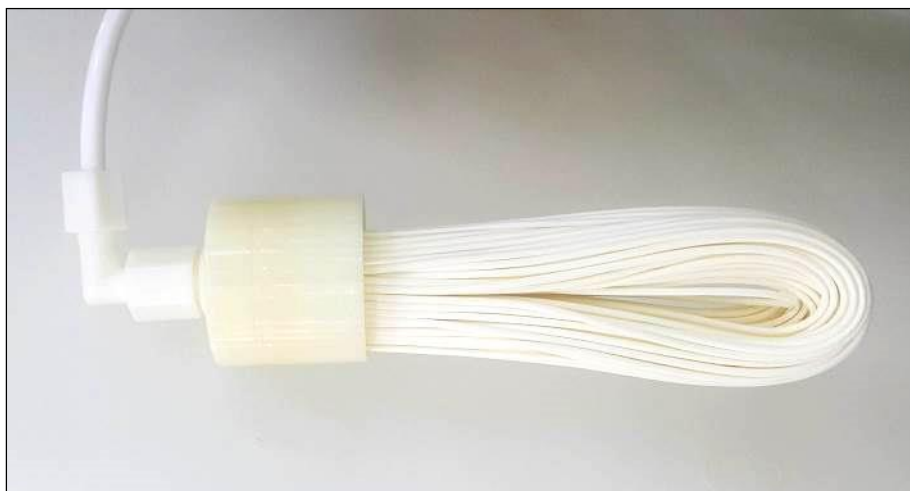
รูปที่ 3-4 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางโคอะเลสเซอร์

- 3) ชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมทำจากสแตนเลส มีความกว้าง 8.7 เซนติเมตร ยาว 8.7 เซนติเมตร และใช้ความสูง 3 ค่า คือ 3 5 และ 10 เซนติเมตร ก่อนเดินระบบทำการแช่ชั้นตัวกลางที่บรรจุตัวกลางไว้ในน้ำที่ผสมน้ำมันความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำมันก่อนนำไปทำการทดลอง



รูปที่ 3-5 ชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์

- 4) ชุดอุปกรณ์เมมเบรน เป็นแบบอัลตราฟิลเตรชันชนิดโมดูลเส้นใยกลวง ทำจากวัสดุพอลิซัลโฟน (Polysulfone, PSU) ซึ่งเป็นวัสดุชอบน้ำ (Hydrophilic) มีพื้นที่ผิวรวม 0.14 ตารางเมตร และขนาดรูพรุน 0.01 ไมครอน



รูปที่ 3-6 ลักษณะชิ้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์

- 6) เครื่องปั่นกวนสำหรับเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ยี่ห้อ MASTERMIX
- 7) เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible pump)
- 8) เครื่องสูบน้ำไดอะแฟรม (Diaphragm pump)
- 9) ถังพลาสติก ขนาด 30 และ 100 ลิตร
- 10) บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 11) กระดาษกรอง (Filter paper) ขนาด 47 มิลลิเมตร ยี่ห้อ WHATMAN
- 12) กล้องถ่ายภาพดิจิทัลไมโครสโคป ยี่ห้อ Dino-Lite
- 13) กล้องโทรศัพท์มือถือ ยี่ห้อ Samsung Note 4
- 14) เครื่องวัดความขุ่น ยี่ห้อ Hach รุ่น 2100P
- 15) เครื่องชั่งละเอียด รุ่น ML104 บริษัท Mettler Toledo
- 16) นาฬิกาจับเวลา
- 17) อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี
 - ตู้อบแห้ง (Hot air oven) บริษัท Memment รุ่น 600 สามารถให้ความร้อนอยู่ระหว่าง 150 ± 2 °C

- หลอดทดลอง (Test tube) ขนาด 16 x 150 มิลลิเมตร พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluororthylene, TFE)
- ปิเปต (Pipette) ขนาด 1 5 10 และ 25 มิลลิลิตร
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กระบอกลูกสูบ (Cylinder) ขนาด 200 500 และ 1,000 มิลลิลิตร

3.1.3 สารเคมี

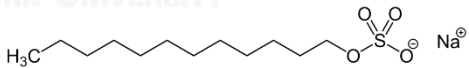
- 1) น้ำมันปาล์ม (Refined Palm oil) สำหรับการประกอบอาหาร ยี่ห้อ มรกต

ตารางที่ 3-1 สมบัติของน้ำมันปาล์ม (Chempro, 2017)

ความหนาแน่น (kg/m ³) ที่ 25 °C	887.5
ความหนืด (mPas) ที่ 25 °C	77.19

- 2) สารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulphate, SDS)

ตารางที่ 3-2 สมบัติของสารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

IUPAC name	Sodium lauryl sulfate
สูตรโครงสร้าง	C ₁₂ H ₂₅ SO ₄ Na 
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	288.372
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.01
CMC (mM) ที่ 25 °C	8.2

- 3) น้ำประปา (Tap water)
- 4) ทราเยแก้ว (Glass bead) ขนาด 100-200 ไมครอน
- 5) ชุดสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ค่าซีไอดี
 - สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS, NH₄Fe(SO₄)₂•12H₂O)
 - สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇)

- สารละลายเฟอโรอิน (Ferroin Indicator)
 - ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
 - กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4)
 - น้ำกลั่น
- 6) สีย้อมอนุภาคน้ำมัน Oil red O ($\text{C}_{26}\text{H}_{24}\text{N}_4\text{O}$)
- 7) ชุดสารเคมีสำหรับวิเคราะห์รูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์
- สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
 - สีย้อม (Dye)
 - สีสผสมอาหาร (Food coloring)

3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์	รูปตัวอย่างการวิเคราะห์
ค่าซีไอดี	Dichromate close reflux method ⁽ⁿ⁾	
ค่าความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น	 www.hach.com

ตารางที่ 3-3 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์ (ต่อ)

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์	รูปตัวอย่างการวิเคราะห์
ค่าของแข็งแขวนลอย	ชั่งน้ำหนัก	
ขนาดอนุภาคน้ำมัน	กล้องถ่ายภาพจุลทรรศน์ไมโครสโคป	
อัตราการไหลของน้ำเสีย และปริมาตรน้ำที่กรอง	กระบอกตวง	 www.il.mahidol.ac.th

ที่มา : (ก) APHA, AWWA and WEF, 1998

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม เตรียมโดยปั่นกวนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร กับน้ำประปา และผสมกับสารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที ใช้น้ำเสียจริงจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยในงานวิจัยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 7 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ และน้ำเสียจริง เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ก่อนการทดลอง

การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นตัวกลางในช่วง 3-10 เซนติเมตร และเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลของน้ำเสียในช่วง 6.1-18.9 เมตรต่อชั่วโมง ทดลองด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนและแบบแนวตั้ง เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด และการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคน้ำมัน

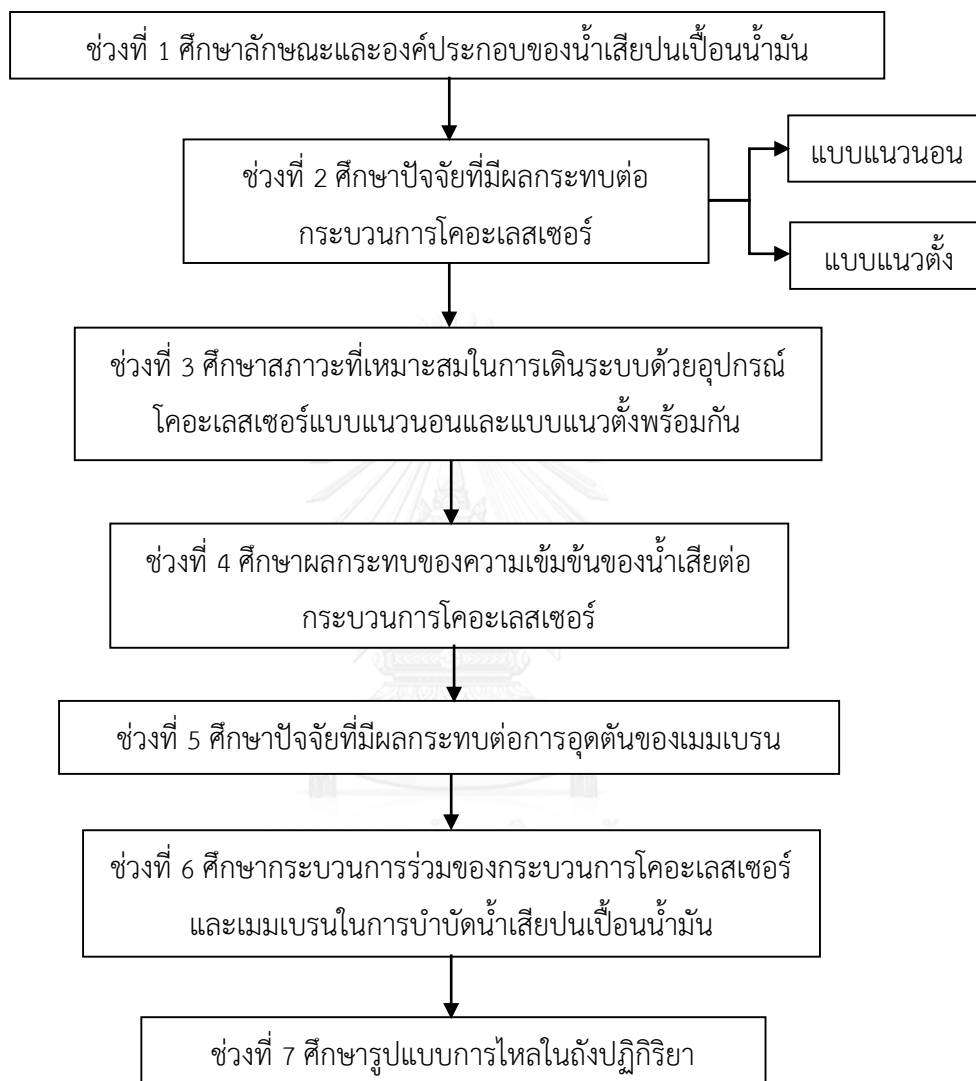
การทดลองช่วงที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนร่วมกับแนวตั้ง โดยใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมจากการทดลองในช่วงที่ 2 พร้อมทั้งทดสอบปัจจัยการเปลี่ยนแปลงระยะการตกตะกอนในช่วง 30-60 เซนติเมตร และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ชนิดต่าง ๆ

การทดลองช่วงที่ 4 ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของน้ำเสียที่เปลี่ยนแปลงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยเตรียมน้ำเสียที่ใช้ทดลองที่ความเข้มข้นในช่วง 0.5-2 กรัมต่อลิตร ทดลองด้วยกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนและแนวตั้ง เพื่อเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

การทดลองช่วงที่ 5 ศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความเร็วในการอุดตันของกระบวนการเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มในช่วงระหว่าง 0.5-2 กรัมต่อลิตร เปรียบเทียบความเร็วในการอุดตันของเมมเบรน และศึกษาวิธีการล้างย้อนเพื่อลดการอุดตันของเมมเบรน รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันของเมมเบรน

การทดลองช่วงที่ 6 ศึกษากระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ และน้ำเสียจริง โดยใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมจากการทดลองในช่วงต้น เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

การทดลองช่วงที่ 7 ศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสีละลายน้ำเป็นสารชี้วัด วิเคราะห์หาค่ากราฟ E curve เพื่อใช้ระบุลักษณะรูปแบบการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์โคอะเลสเซอร์



รูปที่ 3-7 แผนผังวิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

การทดลองที่ 1.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ทดลองเพื่อศึกษาลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยเตรียมน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น และขนาดของอนุภาคน้ำมัน

1. ตัวแปรในการทดลอง

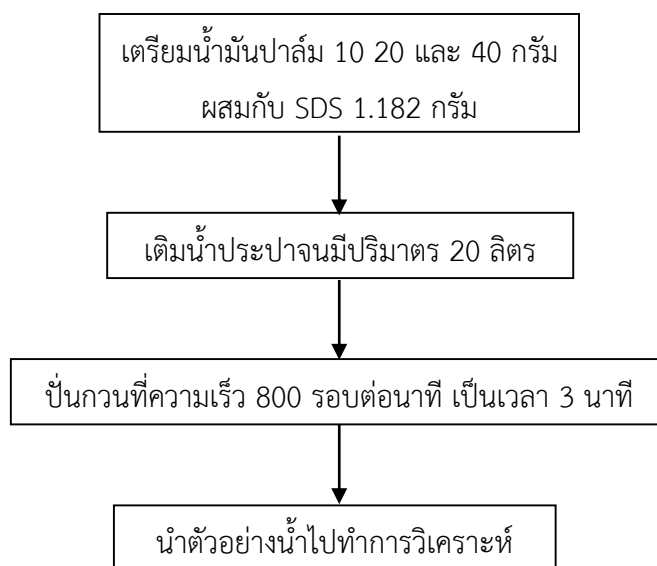
ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำมัน	น้ำมันปาล์ม
2. ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น ขนาดอนุภาคน้ำมัน

2. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมน้ำมันปาล์ม 10 20 และ 40 กรัม ผสมกับโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) 1.182 กรัม ในถังขนาด 30 ลิตร
- 2) เติมน้ำประปาลงในถังจนมีปริมาตร 20 ลิตร
- 3) นำไปปั่นจนผสมที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ น้ำมันเกิดการผสมและกระจายตัวทั่วทุกส่วนในน้ำ
- 4) นำตัวอย่างน้ำไปทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น และขนาดอนุภาคน้ำมัน



รูปที่ 3-8 แผนผังการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองที่ 1.2 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริง

ทดลองเพื่อศึกษาลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจริงที่ใช้ในการทดลอง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากอ่างล้างจานของโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น และค่าของแข็งแขวนลอย

1. ตัวแปรในการทดลอง

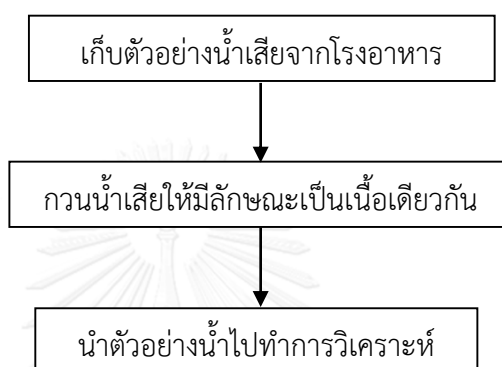
ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของเสีย	น้ำเสียจากโรงอาหาร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	ตามค่าที่วิเคราะห์จากตัวอย่างน้ำเสีย
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น ค่าของแข็งแขวนลอย

2. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากอ่างล้างจานของโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปริมาตร 100 ลิตร
- 2) กวนน้ำเสียให้เข้ากัน โดยมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งถัง
- 3) นำตัวอย่างน้ำเสียไปทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น และค่าของแข็งแขวนลอย



รูปที่ 3-9 แผนผังการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียจริง

3.3.2 ศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโคอะเลสเซอร์

การทดลองที่ 2.1 ศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เมื่อความหนาชั้นตัวกลางและความเร็วการไหลของน้ำเสียมีค่าแตกต่างกัน

ทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยทางกายภาพที่มีต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง โดยใช้ความหนาของชั้นตัวกลาง 3 5 และ 10 เซนติเมตร และความเร็วการไหลของน้ำเสีย 6.1 11.6 และ 18.9 เมตรต่อชั่วโมง ทำการทดลองด้วยโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน และแบบแนวตั้ง เก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีไอดี และขนาดของอนุภาคน้ำมัน

1. ตัวแปรในการทดลอง

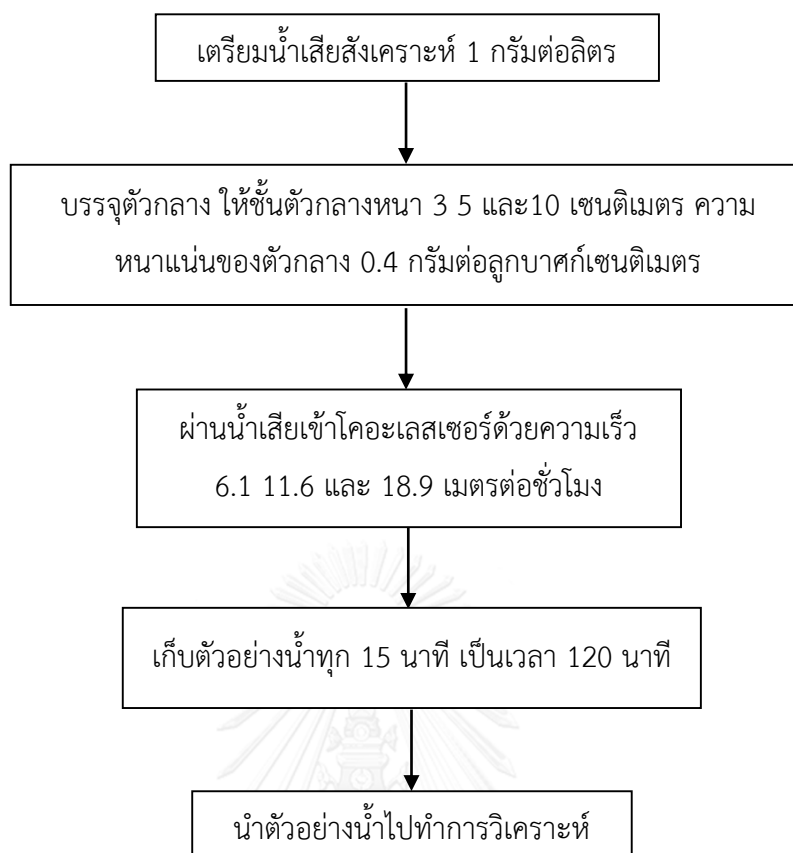
ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นตัวกลาง และความเร็วการไหลของน้ำเสียต่ออุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำเสีย	น้ำเสียสังเคราะห์
2. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1 กรัมต่อลิตร
3. ชนิดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน และแนวตั้ง
4. ชนิดตัวกลางโคอะเลสเซอร์	พอลิโพรไพลีนแบบทรงกระบอกกลาง
5. ความหนาแน่นตัวกลางโคอะเลสเซอร์	0.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเร็วการไหลของน้ำเสีย	6.1 11.6 และ 18.9 เมตรต่อชั่วโมง
2. ความหนาแน่นของชั้นตัวกลาง	3 5 และ 10 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	ค่าซีไอดี ขนาดอนุภาคน้ำมัน

2. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์ม 1 กรัมต่อลิตร
- 2) บรรจุตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ในชั้นตัวกลางหนา 3 5 และ 10 เซนติเมตร โดยให้มีความหนาแน่นของตัวกลาง 0.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- 3) ผ่านน้ำเสียเข้าสู่อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ด้วยเครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม โดยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนจะผ่านน้ำเสียจากด้านซ้ายไปด้านขวา และแบบแนวตั้งจะผ่านน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (จากรูปที่ 3-3) และควบคุมความเร็วของการไหลของน้ำเสียอยู่ที่ 6.1 11.6 และ 18.9 เมตรต่อชั่วโมง
- 4) เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 15 นาที เป็นเวลา 120 นาที
- 5) นำตัวอย่างน้ำไปทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี และขนาดของอนุภาคน้ำมัน



รูปที่ 3-10 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอสเซอร์เมื่อความหนาชั้นตัวกลางและความเร็วการไหลของน้ำเสียมีค่าแตกต่างกัน

3.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อเดินระบบโคเอสเซอร์แบบ แนวนอนและแนวตั้งพร้อมกัน

การทดลองที่ 3.1 ศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอสเซอร์เมื่อมีระยะการตกตะกอนที่แตกต่างกัน

ทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของระยะการติดตั้งและระยะการตกตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอสเซอร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์โคเอสเซอร์แบบแนวนอนและแบบแนวตั้งในถังปฏิกรณ์ ตามลำดับ (จากรูปที่ 3-1) เตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ผสมกับทรายแก้ว (Glass bead) ปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร เก็บตัวอย่างน้ำหลังจากผ่านอุปกรณ์โคเอสเซอร์แบบแนวตั้งที่ระยะการตกตะกอน 30 และ 60 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น และค่าของแข็งแขวนลอย

1. ตัวแปรในการทดลอง

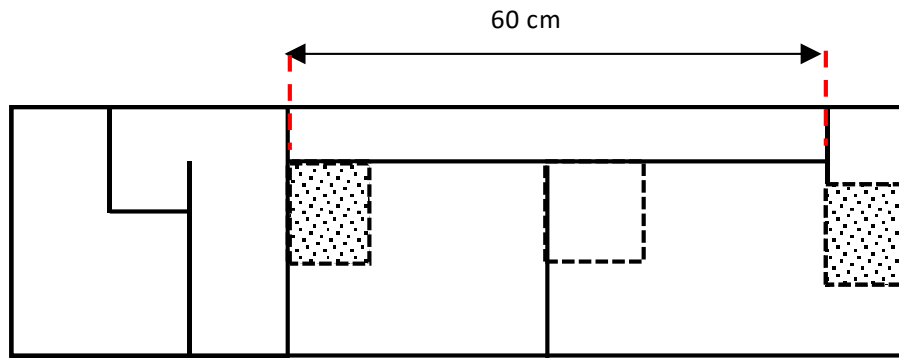
ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบต่ออุปกรณ์โอะเลสเซอร์เมื่อมีระยะเวลาการตกตะกอนแตกต่างกัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำเสีย	น้ำเสียสังเคราะห์
2. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1 กรัมต่อลิตร
3. ปริมาณทรายแก้ว	5 กรัมต่อลิตร
4. ชนิดของอุปกรณ์โอะเลสเซอร์	โอะเลสเซอร์แบบแนวนอนร่วมกับแบบแนวตั้ง
5. ชนิดของตัวกลาง	พอลิโพรไพลีนแบบทรงกระบอกกลาง
6. ความหนาแน่นของตัวกลาง	0.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
7. ความหนาของชั้นตัวกลาง	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
8. ความเร็วการไหลของน้ำเสีย	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ระยะเวลาการตกตะกอน	30 และ 60 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น ค่าของแข็งแขวนลอย

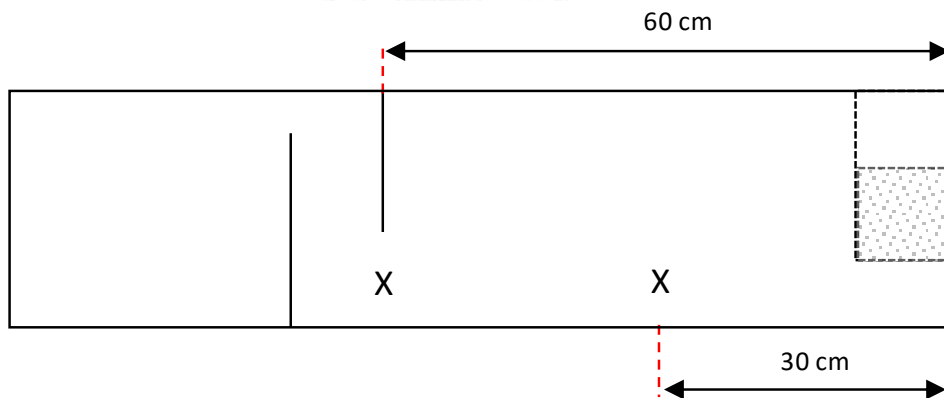
2. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์ม 1 กรัมต่อลิตร ผสมกับทรายแก้วปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร
- 2) ติดตั้งชุดอุปกรณ์โอะเลสเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง โดยติดตั้งให้ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์โอะเลสเซอร์แบบแนวนอนและแนวตั้งที่ 60 เซนติเมตร



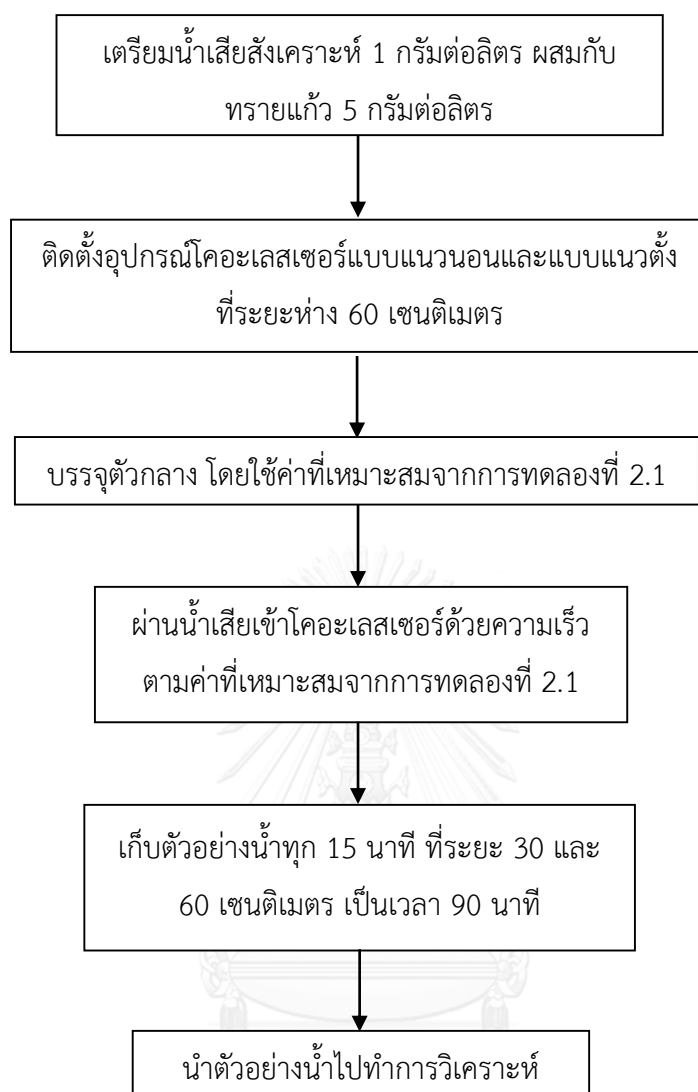
รูปที่ 3-11 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แนวตั้งและแนวนอน

- 3) นำตัวกลางบรรจุลงในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยใช้ความหนาชั้นตัวกลาง ตามค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
- 4) ผ่านน้ำเสียเข้าสู่อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยควบคุมความเร็วของการไหลของน้ำเสีย ตามค่าที่เหมาะสมของการทดลองที่ 2.1
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 15 นาที ที่ระยะการตกตะกอน 30 และ 60 เซนติเมตร เป็นเวลา 90 นาที



รูปที่ 3-12 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

- 6) นำตัวอย่างน้ำไปทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น และค่าของแข็งแขวนลอย



รูปที่ 3-13 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคะเลสเซอร์
เมื่อมีระยะการตกตะกอนที่แตกต่างกัน

3.3.4 ศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโคะเลสเซอร์

การทดลองที่ 4.1 ศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคะเลสเซอร์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียมีค่าแตกต่างกัน

ทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคะเลสเซอร์ โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นของ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ทำการทดลองด้วยกระบวนการร่วมโคะเลสเซอร์แบบแนวนอนและแนวตั้ง เก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีไอดี และค่าความขุ่น

1. ตัวแปรในการทดลอง

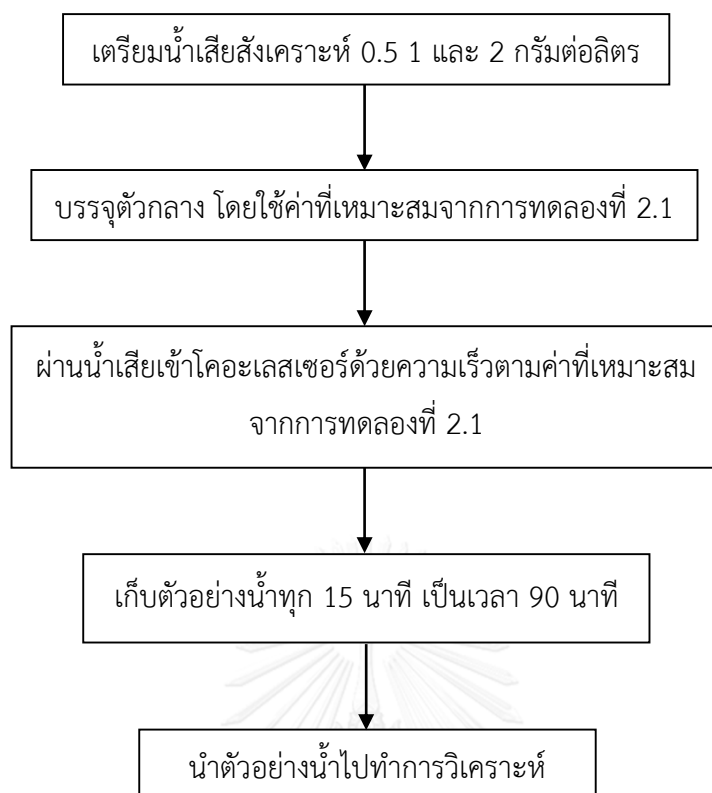
ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบต่ออุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เมื่อมีความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำเสีย	น้ำเสียสังเคราะห์
2. ชนิดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	โคอะเลสเซอร์แบบแวนอนร่วมกับแนวตั้ง
3. ความเร็วการไหลของน้ำเสีย	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
4. ความหนาของชั้นตัวกลาง	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น

2. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์ม 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
- 2) นำตัวกลางบรรจุลงในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยใช้ความหนาชั้นตัวกลาง ตามค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
- 3) ผ่านน้ำเสียเข้าสู่อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยควบคุมความเร็วการไหลของน้ำเสีย ตามค่าที่เหมาะสมของการทดลองที่ 2.1
- 4) เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 15 นาที เป็นเวลา 90 นาที
- 5) นำตัวอย่างน้ำไปทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี และค่าความขุ่น



รูปที่ 3-14 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอสเสอร์เมื่อมี
ความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน

3.3.5 ศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเมมเบรน

การทดลองที่ 5.1 ศึกษาความเร็วในการอุดตันของอุปกรณ์เมมเบรนเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียมีค่าแตกต่างกัน

ทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยทางกายภาพที่มีต่อการอุดตันของเมมเบรน โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ทดลองด้วยอุปกรณ์เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันชนิดโมดูลเส้นใยกลวง ดำเนินการกรองจนกระทั่งฟลักซ์ในการกรองน้ำน้อยกว่า 50% จึงทำการล้างย้อนโดยการเป่าลมย้อนกลับไปยังเมมเบรนเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเดินระบบต่อไป ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น และค่าฟลักซ์

1. ตัวแปรในการทดลอง

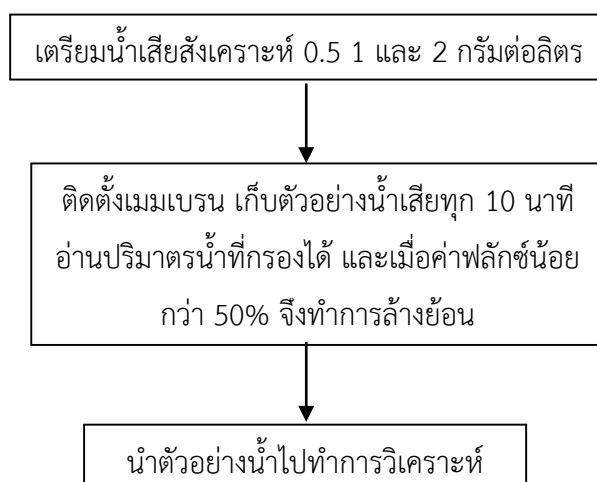
ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบต่ออุปกรณ์เมมเบรนเมื่อมีปัจจัยทางกายภาพแตกต่างกัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำเสีย	น้ำเสียสังเคราะห์
2. ชนิดของอุปกรณ์เมมเบรน	อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนโมดูลเส้นใยกลวง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	ค่าซีโอดี
	ค่าความขุ่น
2. ค่าฟลักซ์	ปริมาณน้ำที่กรองได้ต่อเวลาในการกรองต่อพื้นที่ผิวของเมมเบรน

2. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์ม 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
- 2) ติดตั้งระบบกรองโดยวางเมมเบรนจุ่มลงไปในถังน้ำเสีย เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 10 นาที อ่านปริมาตรน้ำที่กรองได้ เติมน้ำจนกระทั่งฟลักซ์ในการกรองน้ำน้อยกว่า 50% จึงทำการล้างย้อน
- 3) นำตัวอย่างน้ำไปทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี และค่าความขุ่น



รูปที่ 3-15 แผนผังการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออุปกรณ์เมมเบรน

3.3.6 ศึกษากระบวนการร่วมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

การทดลองที่ 6.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน

ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน โดยใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมจากการทดลองในช่วงต้น ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น ค่าของแข็งแขวนลอย และค่าฟลักซ์

1. ตัวแปรในการทดลอง

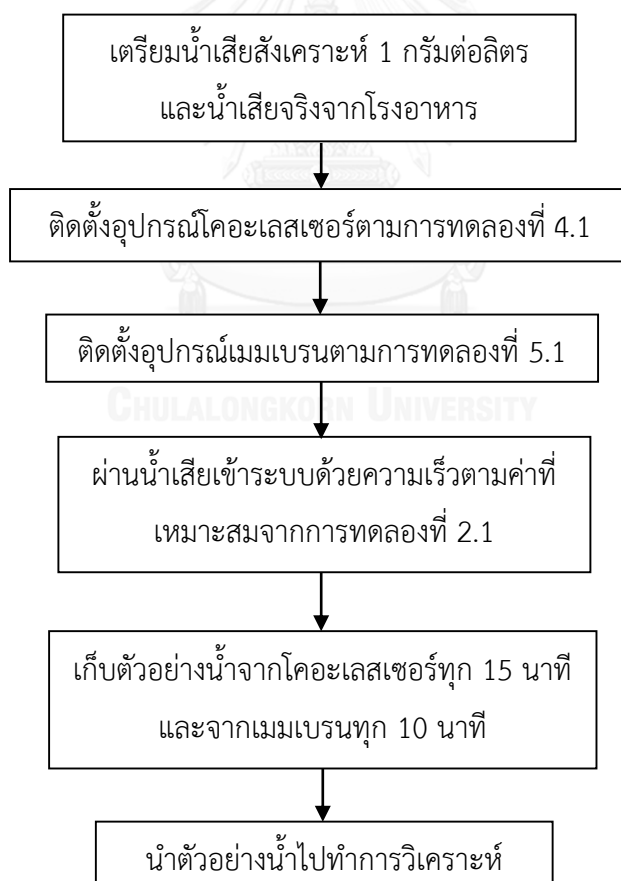
ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการร่วม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของอุปกรณ์	อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ร่วมกับอุปกรณ์เมมเบรน
2. สภาวะการเดินระบบ	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 4.1 และ 5.1
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำเสีย	น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น ค่าของแข็งแขวนลอย
2. ค่าฟลักซ์	ปริมาณน้ำที่กรองได้ต่อเวลาในการกรองต่อพื้นที่ผิวของเมมเบรน

2. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร และน้ำเสียจริงจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2) ติดตั้งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์และใช้ค่าที่เหมาะสมตามการทดลองที่ 4.1 เตินระบบโคอะเลสเซอร์เป็นเวลา 60 นาที
- 3) ติดตั้งอุปกรณ์เมมเบรนและใช้ค่าที่เหมาะสมตามการทดลองที่ 5.1 เตินระบบเมมเบรนต่อจากระบบโคอะเลสเซอร์
- 4) ผ่านน้ำเสียเข้าระบบ โดยควบคุมความเร็วการไหลของน้ำเสียจากค่าที่เหมาะสมของการทดลองที่ 2.1
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำโคอะเลสเซอร์ทุก 15 นาที และเมมเบรนทุก 10 นาที
- 6) นำตัวอย่างน้ำไปทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น และค่าของแข็งแขวนลอย



รูปที่ 3-16 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

3.3.7 ศึกษาารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก

การทดลองที่ 7.1 ศึกษาารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์โดยใช้โซเดียมคลอไรด์และสีละลายน้ำเป็นสารชี้วัด

ทำการทดลองเพื่อศึกษาารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์ เก็บข้อมูลโดยการวัดค่าการนำไฟฟ้าเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารชี้วัด และวัดค่าความเข้มข้นเมื่อใช้สีละลายน้ำเป็นสารชี้วัด วิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก เพื่อหากราฟ E curve เทียบกับกราฟทางทฤษฎี

1. ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 3-11

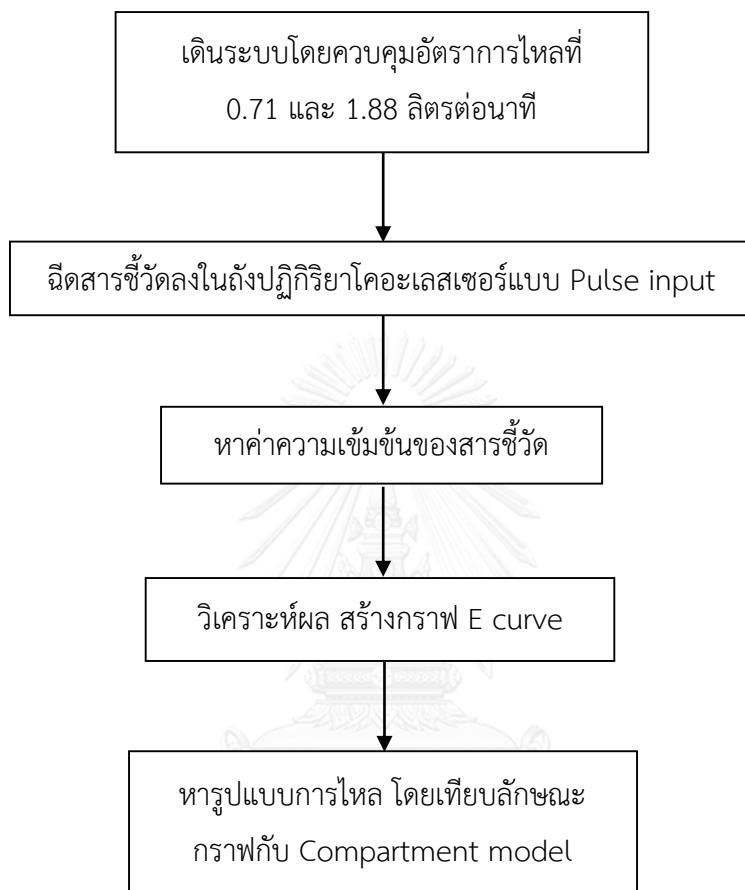
ตารางที่ 3-11 ตัวแปรในการศึกษาารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของอุปกรณ์ 2. วิธีการจ่ายสารชี้วัด	ถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์ Pulse input
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. สารชี้วัด 2. วิธีการเก็บข้อมูล 3. อัตราการไหล	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสีละลายน้ำ วัดค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเข้มข้น 0.71 และ 1.88 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ข้อมูลที่ตรวจวัด	ค่าความเข้มข้นของสารชี้วัดที่เวลาต่าง ๆ

2. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ให้น้ำประปาเข้าไปในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์แบบต่อเนื่อง โดยควบคุมอัตราการไหลที่ 0.71 และ 1.88 ลิตรต่อนาที
- 2) ฉีดสารละลายโซเดียมคลอไรด์/สีละลายน้ำซึ่งเป็นสารชี้วัด ลงในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์แบบทันทีภายในครั้งเดียว (Pulse input)
- 3) วัดค่าการนำไฟฟ้า/ค่าความเข้มข้น ที่เวลาต่าง ๆ แล้วคำนวณความหาเข้มข้นของสารชี้วัด

- 4) วิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก สร้างกราฟ E curve
 5) นำกราฟที่ได้เทียบกับ Compartment model เพื่อหารูปแบบการไหล
 ของถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์



รูปที่ 3-17 แผนผังการศึกษาารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาลักษณะและสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.1.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ผสมกับสารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulphate, SDS) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบ ทำให้น้ำเสียเกิดเป็นอิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion) โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ค่าความขุ่น วิเคราะห์โดยเครื่องวัดความขุ่น ค่าซีโอดี (COD) วิเคราะห์โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) และขนาดอนุภาคน้ำมัน วิเคราะห์โดยการย้อมสีอนุภาคน้ำมันด้วยสารละลาย Oil Red O แล้วถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลไมโครสโคปที่กำลังขยาย 100 เท่า ใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคน้ำมัน และคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) ได้จากสมการ 4-1 ซึ่งผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4-1

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

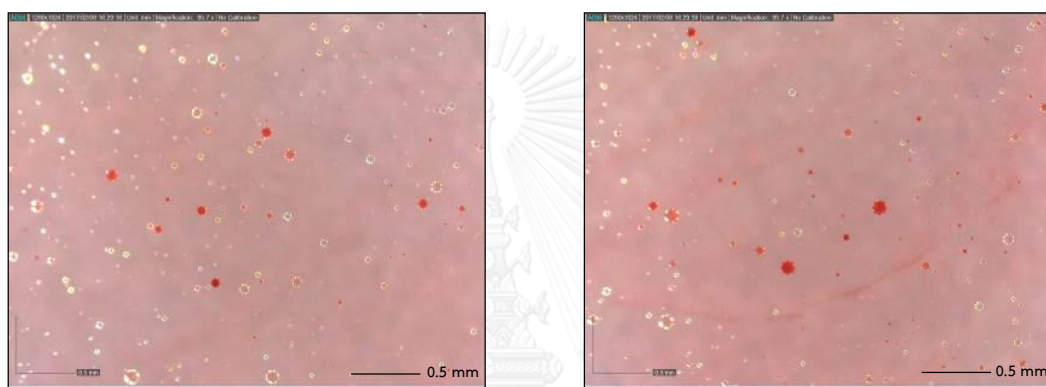
โดยที่ D_{mean} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคน้ำมันเฉลี่ย (ไมครอน)
 d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคน้ำมัน (ไมครอน)
 n คือ จำนวนอนุภาคน้ำมัน

ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์

ตัวแปร	ความเข้มข้นน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)		
	0.5	1	2
ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	827±23	1,333±46	2,098±91
ค่าความขุ่น (NTU)	157.6	327.7	710.0
ขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ย (ไมครอน)	4.14	4.53	4.94

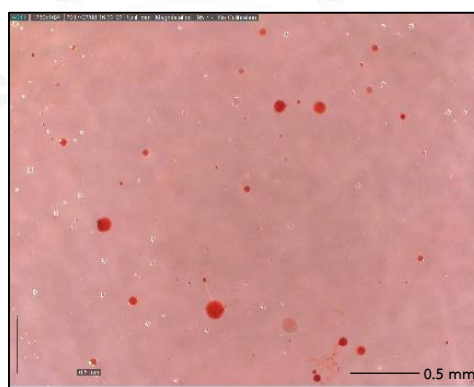
จากตารางที่ 4-1 เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น พบว่าจะทำให้ค่าซีไอดีและค่าความขุ่นเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของน้ำมันก็ไม่ได้ส่งผลต่อขนาดอนุภาคน้ำมันมากนัก เนื่องจากลักษณะการเกิดอิมัลชันจะมาจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมอยู่ และแรงในการปั่นกวนที่ทำให้อนุภาคน้ำมันเกิดการแตกตัว ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นน้ำมันจึงส่งผลแค่ทำให้อนุภาคน้ำมันในน้ำเสียนี้อาจมีจำนวนเพิ่มขึ้นโดยที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ภาพถ่ายอนุภาคน้ำมัน และการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันขนาดต่าง ๆ ในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ



(ก)

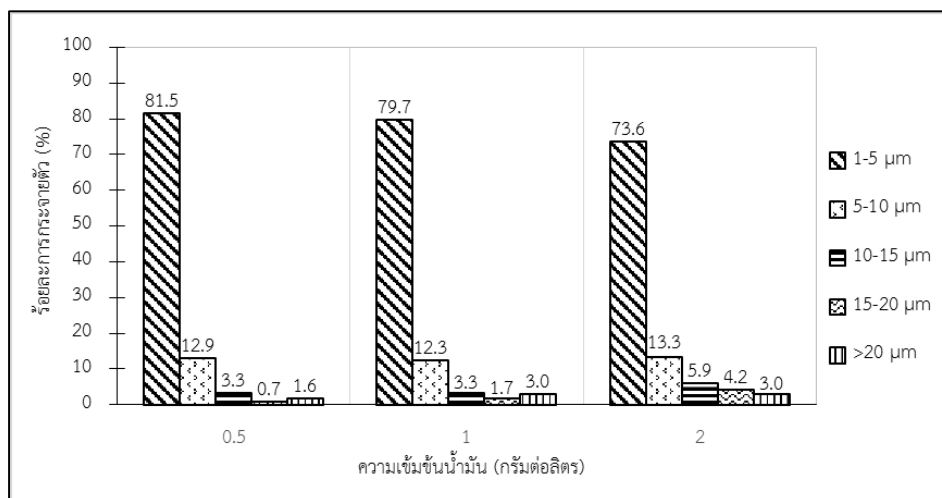
(ข)



(ค)

รูปที่ 4-1 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์

(ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1 กรัมต่อลิตร และ (ค) 2 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4-2 ร้อยละการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากรูปที่ 4-1 และ 4-2 เมื่อใช้กล้องถ่ายภาพอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์และนำมาวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค พบว่าขนาดอนุภาคน้ำมันที่ได้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1-5 ไมครอน เป็นส่วนใหญ่ แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้มีลักษณะเป็นอิมัลชันชั้นสอง (Secondary emulsion) (Rachu, 2005) โดยมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กกว่า 20 ไมครอน ซึ่งจะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูง และกำจัดออกได้ยากด้วยวิธีการตกตะกอนโดยใช้แรงโน้มถ่วงแบบทั่วไป อ้างอิงจากกฎของสโตค (สมการที่ 2-1) ความเร็วในการลอยตัวที่คำนวณได้ของอนุภาคน้ำมันที่มีขนาด 4.14 ไมครอน จะมีค่าเท่ากับ 9.53×10^{-7} เมตรต่อวินาที หรือภายใน 1 วัน อนุภาคน้ำมันสามารถเคลื่อนที่ได้ประมาณ 8 เซนติเมตรเท่านั้น ดังนั้น ในขั้นต่อไปจึงทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ช่วยในการรวมอนุภาคน้ำมันเล็ก ๆ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น

4.1.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริง

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจริงจากอ่างล้างจานของโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 100 ลิตร วิเคราะห์หาค่าซีไอดี ค่าความขุ่น และปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) ของตัวอย่างน้ำเสีย พบว่าได้ผลดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจริง

ตัวแปร	ค่า
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	38,646±426
ค่าความขุ่น (NTU)	7643.0
น้ำหนักของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,815



รูปที่ 4-3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงอาหาร

จากรูปที่ 4-3 พบว่าน้ำเสียมีลักษณะเป็นสีส้มขุ่น มีกลิ่นเล็กน้อย มีคราบไขมันและเศษอาหารปะปนอยู่ เมื่อทำการกวนผสมจะเกิดฟองอากาศขึ้นเป็นปริมาณมาก เนื่องจากการผสมของน้ำยาล้างจานซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวในปริมาณมาก น้ำเสียจากโรงอาหารจึงมีลักษณะเป็นอิมัลชันที่มีความเสถียร ทำให้ยากต่อการแยกโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลกหรือการใช้ถังตกไขมันตามปกติ ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวด้วยสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการเมมเบรนในส่วนต่อไป

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสม และการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาปัจจัยและตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้จะมี 2 รูปแบบ คือ โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง (Vertical coalescer) และโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน (Horizontal coalescer) ลิตร วัสดุตัวกลางที่ใช้อ้างอิงจากงานวิจัยของสุรียพร เบญจประดิษฐ์ (2556) ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ตัวกลาง 3 ชนิดคือ พอลิโพรไพลีนแบบเม็ด พอลิโพรไพลีนแบบเส้นใย และพอลิโพรไพลีนแบบทรงกระบอกกลวง พบว่าตัวกลางพอลิโพรไพลีนรูปแบบทรงกระบอกกลวงมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสูงสุด ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวกลางพอลิโพรไพลีนรูปแบบทรงกระบอกกลวงในการทดลอง ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองนี้ คือ ความเร็วการไหลของน้ำเสีย และความหนาของชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ประสิทธิภาพของกระบวนการคำนวณได้จากค่าร้อยละของการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย (%COD_{eff}) ดังสมการที่ 4-2 และทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคน้ำมันของน้ำเสียหลังผ่านชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ เพื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคน้ำมันก่อนและหลังบำบัด เพื่อยืนยันว่ากระบวนการโคอะเลสเซอร์ทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น และช่วยให้การแยกมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

$$\% \text{COD}_{\text{eff}} = \frac{\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}}}{\text{COD}_{\text{in}}} \times 100 \quad (4-2)$$

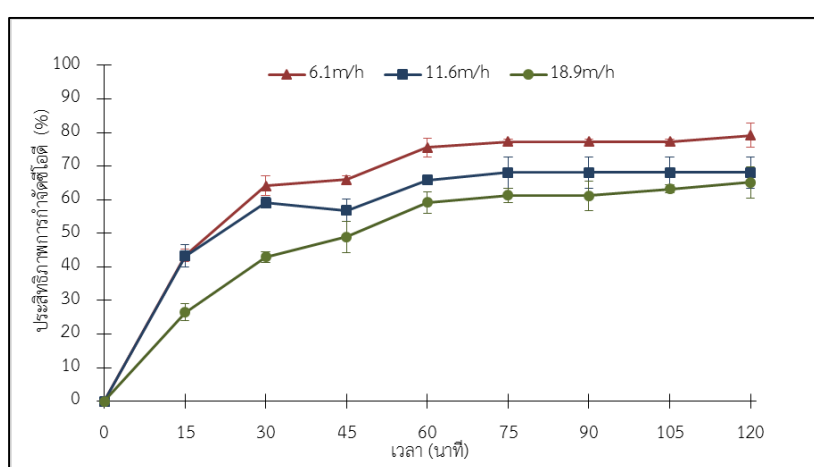
โดยที่ %COD_{eff} คือ ค่าร้อยละของการกำจัดซีโอดี (%)
 COD_{in} คือ ค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 COD_{out} คือ ค่าซีโอดีของน้ำเสียออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

4.2.1 การศึกษาผลของความเร็วยการไหลของน้ำเสีย

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร บรรจุตัวกลางพอลิโพรไพลีนรูปแบบทรงกระบอกกลวงลงในชั้นตัวกลางหนา 10 เซนติเมตร ทำการศึกษาความเร็วยการไหลของน้ำเสีย 3 ค่า คือ 6.1 11.6 และ 18.9 เมตรต่อชั่วโมง เติมน้ำในระบบในถังปฏิกิริยาเป็นเวลา 120 นาที เก็บตัวอย่างน้ำทุก 15 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ผลหาค่าซีโอดี และขนาดอนุภาคน้ำมัน

4.2.1.1 ผลของความเร็วการไหลสำหรับโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง

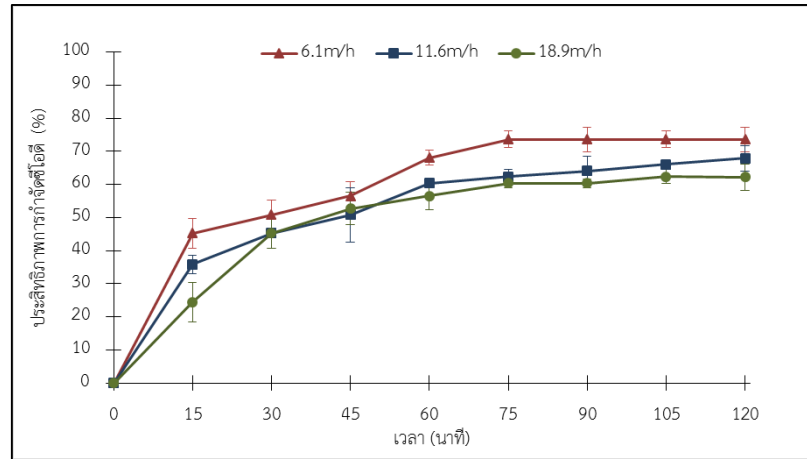
จากรูปที่ 4-4 แสดงผลการศึกษาผลของความเร็วการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลา และจากการทดลองความเร็วการไหลของน้ำเสียที่เหมาะสมที่สุดคือ 6.1 เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุดอยู่ที่ $79.19 \pm 3.64\%$ และเมื่อเพิ่มความเร็วการไหลเป็น 11.6 และ 18.9 พบว่าประสิทธิภาพจะมีค่าลดลงเป็น $68.10 \pm 4.69\%$ และ $65.20 \pm 4.67\%$ ตามลำดับ



รูปที่ 4-4 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน; ความหนาชั้นตัวกลาง 10 เซนติเมตร

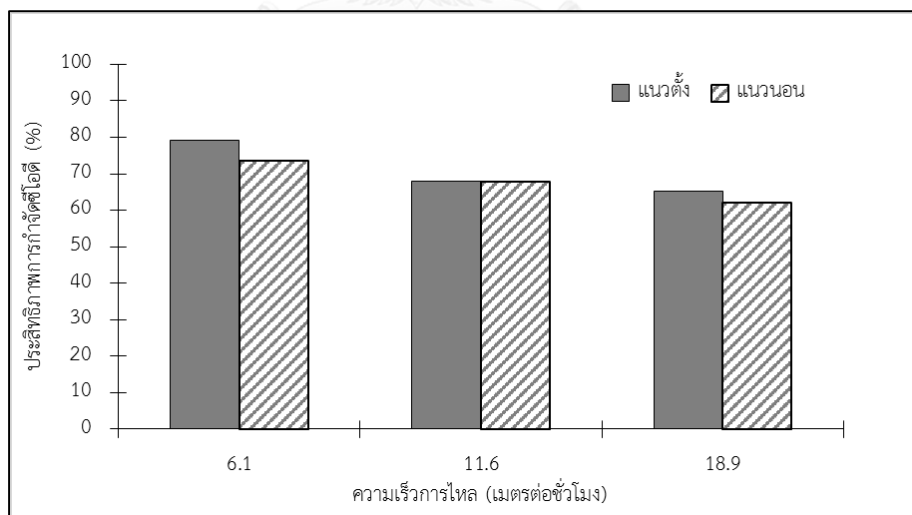
4.2.1.2 ผลของความเร็วการไหลสำหรับโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน

การศึกษาผลของความเร็วการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนพบว่าสอดคล้องกับการทดลองของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 4-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของความเร็วการไหลของน้ำเสีย 6.1 11.6 และ 18.9 เมตรต่อชั่วโมง จะมีค่าสูงสุดที่ $73.53 \pm 3.77\%$ $67.86 \pm 3.90\%$ และ $62.20 \pm 4.03\%$ ตามลำดับ



รูปที่ 4-5 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน; ความหนาชั้นตัวกลาง 10 เซนติเมตร

ผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า ปัจจัยของความเร็วการไหลของน้ำเสียส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ แสดงดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดซีโอดีที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-6 พบว่าเมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ทั้ง 2 แบบมีค่าลดลง เนื่องจากที่ความเร็วการไหลต่ำ (6.1 เมตรต่อชั่วโมง) อนุภาคน้ำมันจะไหลช้าและถูกกักอยู่ในชั้นตัวกลางได้นาน ทำให้มีโอกาสรวมตัวกันเป็น

อนุภาคนาโนใหญ่ได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคน้ำมันที่อยู่ในชั้นตัวกลางหลุดออกจากตัวกลางง่ายขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนของทำ ทำให้มีเวลาในการกักอยู่ในชั้นตัวกลางน้อยลง อนุภาคน้ำมันจึงไม่สามารถรวมตัวกันได้ภายในเวลาที่ออกแบบไว้ ทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกมาจากชั้นตัวกลางมีขนาดเล็ก นอกจากนี้เมื่อความเร็วการไหลสูงจะทำให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำในถังปฏิกรณ์ ทำให้อนุภาคน้ำมันหลังออกจากชั้นตัวกลางเกิดการแตกตัวและมีขนาดเล็กลง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของกระบวนการโคอะเลสเซอร์จึงลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kosal และคณะ (2014) ที่ทำการศึกษการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากกลีเซอรอลโดยใช้กระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าลดลง และจากงานวิจัยของ Agarwal และคณะ (2013) ซึ่งศึกษาเรื่องการแยกอิมัลชันด้วยตัวกลางเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลของน้ำเสียในช่วง 0.6-1.8 เมตรต่ออนาที พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วการไหลของน้ำเสียให้สูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชันลดลง แสดงให้เห็นว่าความเร็วการไหลของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

4.2.2 การศึกษาผลของความหนาชั้นตัวกลาง

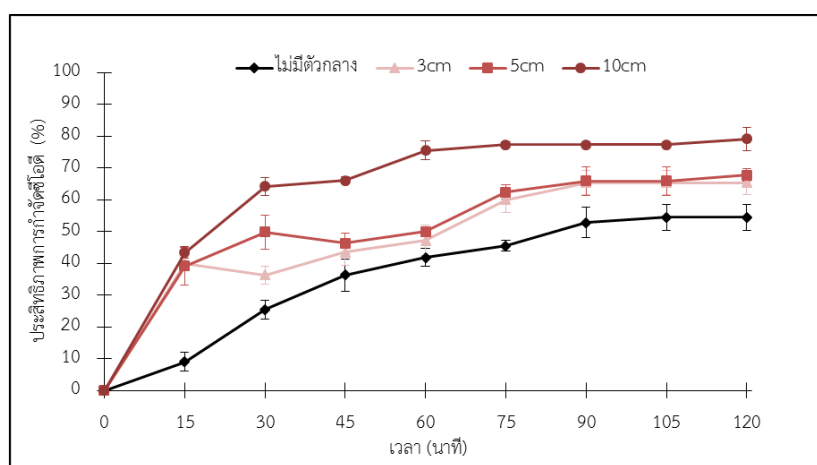
การทดลองนี้ใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ใช้ความเร็วการไหลของน้ำเสียที่เหมาะสมจากการทดลองที่แล้วคือ 6.1 เมตรต่อชั่วโมง ทำการศึกษาความหนาของชั้นตัวกลาง 4 ค่า คือ 3 5 และ 10 เซนติเมตร และไม่มีชั้นตัวกลาง เติระบบในถังปฏิกรณ์เป็นเวลา 120 นาที เก็บตัวอย่างน้ำทุก 15 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ผลหาค่าซีโอดี และขนาดอนุภาคน้ำมัน

4.2.2.1 ผลของความหนาชั้นตัวกลางสำหรับโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง

รูปที่ 4-7 แสดงผลการศึกษาผลของความหนาชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง พบว่าความหนาของชั้นตัวกลางที่ 10 เซนติเมตร จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุดที่ $79.19 \pm 3.64\%$ นอกจากนี้ เมื่อมีความหนาลดลงที่ 3 และ 5 เซนติเมตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง โดยมีค่าใกล้เคียงกันที่ $65.40 \pm 3.82\%$ และ $67.78 \pm 1.92\%$ ตามลำดับ อาจเนื่องจากความหนา 3 และ 5 เซนติเมตร มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จึงทำให้ประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 10 เซนติเมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ได้ก็มีค่าสูงขึ้นด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma และคณะ (2014) ซึ่งศึกษาการแยกน้ำและน้ำมันโดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แบบเส้นใยแก้วขนาดเล็ก ที่ความหนาชั้น

ตัวกลาง 2-20 มิลลิเมตร พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาชั้นตัวกลางของตัวกลางเส้นใยแก้ว จะทำให้ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำหลังการบำบัดมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาชั้นตัวกลางทำให้อนุภาคน้ำมันถูกกักอยู่ในชั้นตัวกลางได้นานขึ้น ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีเวลาในการเกิดการรวมตัวได้นานขึ้น

ดังนั้นความหนาชั้นตัวกลางที่เหมาะสมของโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ 10 เซนติเมตร

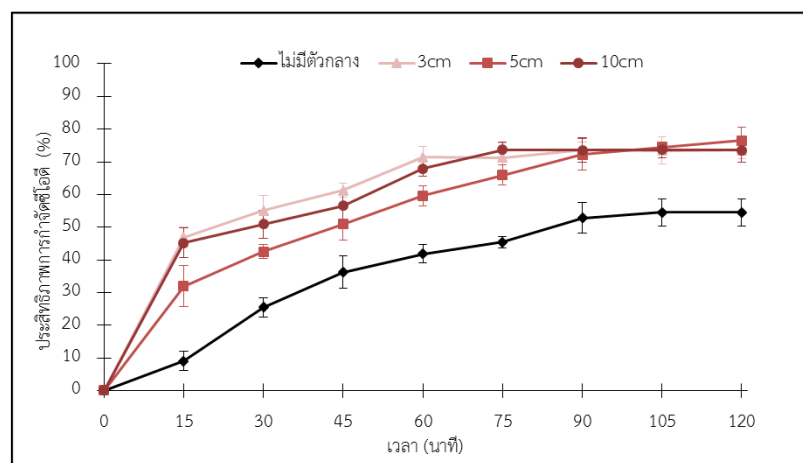


รูปที่ 4-7 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง ที่ความหนาชั้นตัวกลางแตกต่างกัน; ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง

4.2.2.2 ผลของความหนาชั้นตัวกลางสำหรับโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน

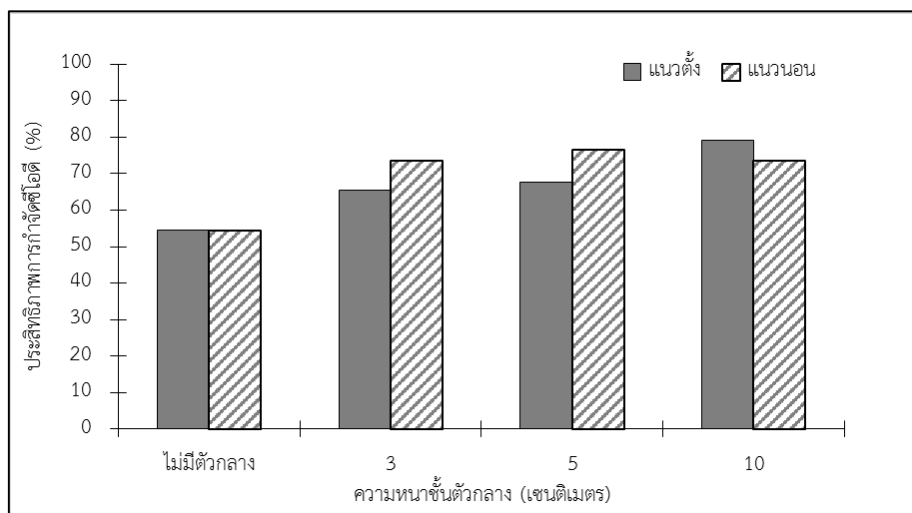
การศึกษาผลของความหนาชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนดังแสดงในรูปที่ 4-8 พบว่าผลของความหนาชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีค่าอยู่ในช่วง 74-77% ทั้งนี้ เพราะในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน แรงจากการไหลของน้ำเสีย (Hydrodynamic force) และแรงลอยตัวของอนุภาคน้ำมัน (Buoyancy force) มีทิศทางตั้งฉากกันและไม่ส่งผลต่อกันมากนัก (Sokolovic และคณะ, 2006) ในขณะที่อนุภาคน้ำมันที่ไหลเข้าสู่ชั้นตัวกลางในแนวนอนมีการกักอยู่และเกิดการรวมตัวกัน แรงลอยตัวในแนวตั้งก็ช่วยให้อนุภาคน้ำมันค้างอยู่ในชั้นตัวกลางได้นานขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจึงสูงขึ้น ซึ่งหากพิจารณาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง พบว่าแรงทั้งสองจะส่งผลเกี่ยวข้องกันเนื่องจากมีทิศทางเดียวกัน ดังนั้น เมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคน้ำมันในชั้นตัวกลางหลุดออกมาเร็วขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ในงานวิจัยนี้จึง

เลือกใช้ความหนาของชั้นตัวกลางที่ 3 เซนติเมตร สำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการดำเนินการ



รูปที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน ที่ความหนาชั้นตัวกลางแตกต่างกัน; ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง

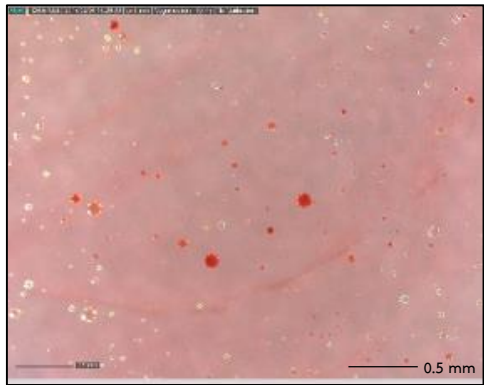
จากรูปที่ 4-9 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพใช้ชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทั้ง 3 การทดลอง พบว่าการเพิ่มความหนาของชั้นตัวกลางส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉพาะ โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งเท่านั้น สำหรับโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ การทดลองที่ใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทุกการทดลองมี ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่าการแยกด้วยแรงโน้มถ่วงโดยไม่ใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ($54.48 \pm 4.06\%$) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระบวนการโคอะเลสเซอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน



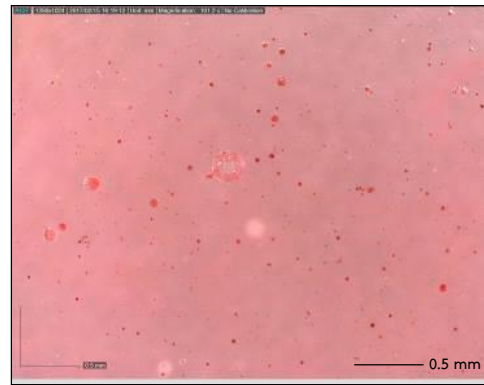
รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดซีไอโอดีที่ความหนาชั้นตัวกลางแตกต่างกัน

จากผลการทดลองในข้อ 4.2.2.1 และ 4.2.2.2 เพื่อยืนยันว่าขนาดอนุภาคน้ำมันหลังผ่านชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำการศึกษาและวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคน้ำมันโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลไมโครสโคป และใช้โปรแกรม ImageJ ในการคำนวณหาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน โดยพบว่าขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยของน้ำเสียเริ่มต้น คือ 4.53 ไมครอน เติระบบด้วยความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง หลังจากให้น้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งหนา 3 และ 10 เซนติเมตร พบว่าขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 6.92 และ 7.41 ไมครอน ตามลำดับ อธิบายได้จากกลไกการทำงานของโคอะเลสเซอร์ โดยอนุภาคน้ำมันที่ไหลผ่านชั้นตัวกลางจะเกิดการปะทะ (Collision) และเกาะติด (Attachment) อยู่บนผิวตัวกลาง เมื่อมีอนุภาคน้ำมันอื่น ๆ ไหลผ่านก็จะเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและรวมตัวกัน หลังจากทีอนุภาครวมตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะหลุดจากชั้นตัวกลางตามแรงการไหลของน้ำเสีย และแยกตัวออกจากน้ำได้เร็วขึ้น ซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การส่งถ่ายอนุภาคน้ำมันเข้าสู่สัมผัสผิวตัวกลาง 2) การจับยึดระหว่างอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางและการไหลผ่านชั้นตัวกลาง 3) การรวมตัวและหลุดออกจากชั้นตัวกลาง จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการบำบัดโดยใช้ตัวกลางของโคอะเลสเซอร์ช่วยให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอโอดีเพิ่มขึ้น

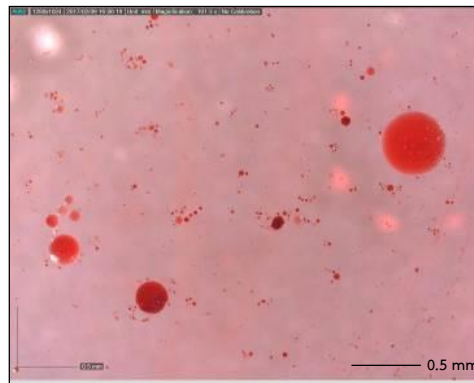
สำหรับภาพถ่ายอนุภาคน้ำมัน และการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย แสดงดังรูปที่ 4-10 และ 4-11 ตามลำดับ



(ก)

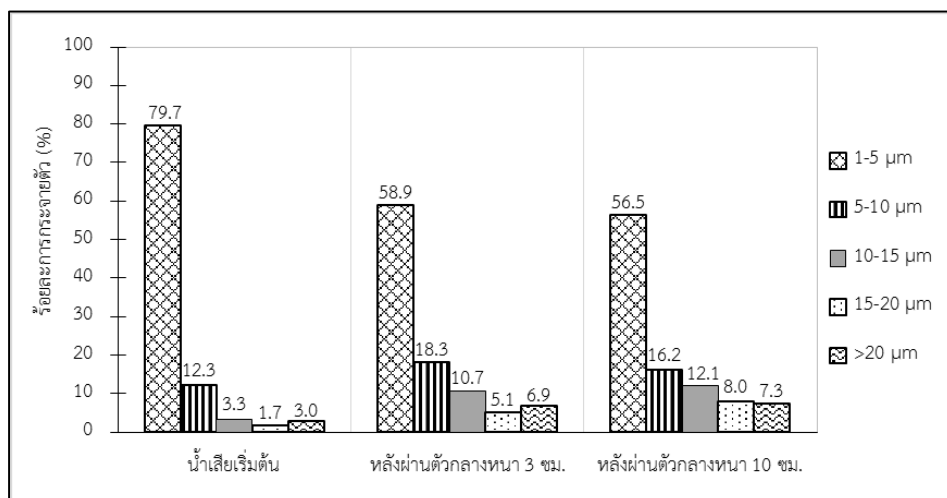


(ข)



(ค)

รูปที่ 4-10 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันที่เปลี่ยนแปลง (ก) น้ำเสียเริ่มต้น (ข) น้ำเสียหลังผ่านตัวกลางหนา 3 เซนติเมตร และ (ค) น้ำเสียหลังผ่านตัวกลางหนา 10 เซนติเมตร



รูปที่ 4-11 ร้อยละการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันก่อนและหลังผ่านชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์

จากรูปที่ 4-11 จะเห็นได้ว่าอนุภาคน้ำมันขนาด 1-5 ไมครอนในน้ำเสียเริ่มต้น มีการกระจายตัวลดลงจาก 79.7% เป็น 58.9% และ 56.5% ที่ความหนาชั้นตัวกลาง 3 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ และพบว่ามีมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นของอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดมากกว่า 20 ไมครอน จาก 3.0% เป็น 6.9% และ 7.3% ตามลำดับ ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันสามารถลอยตัวแยกออกจากน้ำได้เร็วขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจึงมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ กชกร ก้องกังวาลย์ (2552) ซึ่งศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แบบเส้นใยสแตนเลส และเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา พบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคหลังผ่านการบำบัดด้วยโคอะเลสเซอร์ อนุภาคน้ำมันจะมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยจะมีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่มากขึ้น และมีอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กน้อยลง ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวจึงสรุปได้ว่ากระบวนการโคอะเลสเซอร์สามารถทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันขนาดเล็ก ๆ ให้กลายเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4-3 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	ตัวแปร	
	ความเร็วการไหลของน้ำเสีย (เมตรต่อชั่วโมง)	ความหนาชั้นตัวกลาง (เซนติเมตร)
แบบแนวตั้ง	6.1	10
แบบแนวนอน		3

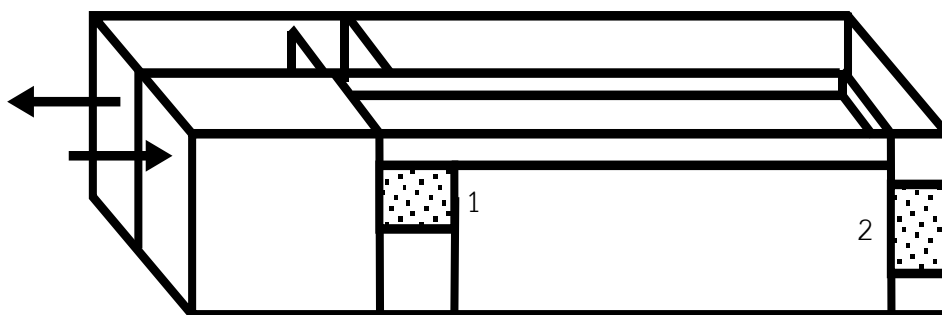
จากการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ และได้สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ดังตารางที่ 4-3 แล้ว ในขั้นต่อไปจะเป็นการทดลองหาประสิทธิภาพโดยใช้กระบวนการร่วมของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอนร่วมกัน เพื่อใช้ในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสีย

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งและแนวนอนในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นเมื่อระยะการตกตะกอนแตกต่างกัน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการใช้โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งร่วมกับแนวนอนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ โดยใช้น้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เติมน้ำโดยใช้เวลาไหลของน้ำเสีย 6.1 เมตรต่อชั่วโมง ใช้ความหนาของชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง 10 เซนติเมตร และใช้ความหนาของชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน 3 เซนติเมตร ติดตั้ง

อุปกรณ์ดังรูปที่ 4-12 โดยให้ห่างกัน 60 เซนติเมตร เดินระบบในถังปฏิบัติการเป็นเวลา 90 นาที เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะห่างจากชั้นตัวกลางของโคอะเลสเซอร์ 30 และ 60 เซนติเมตร ทุก 15 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ผลหาค่าซีไอดี และค่าความขุ่น ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและความขุ่นของกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-4



รูปที่ 4-12 แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

1) โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน และ 2) โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง

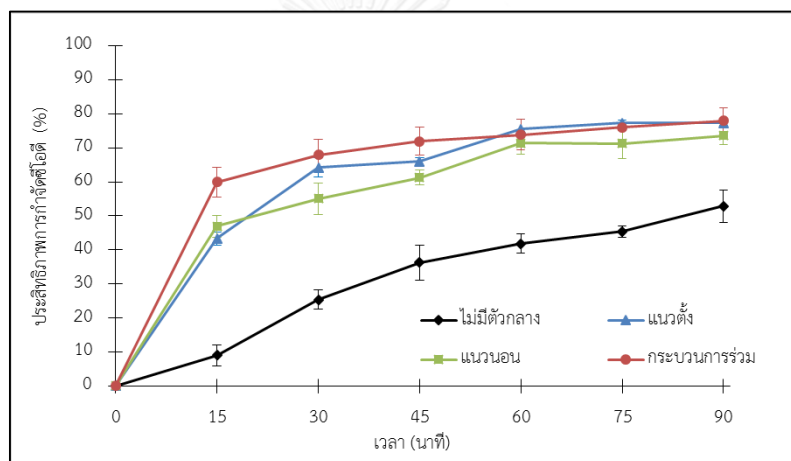
ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและความขุ่นของกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์

ตัวแปร	น้ำเสียเข้า	น้ำเสียออก			
		ระยะ 30 เซนติเมตร	ประสิทธิภาพ (%)	ระยะ 60 เซนติเมตร	ประสิทธิภาพ (%)
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,333±46	400±0	70.59±0.00	293±46	77.94±3.89
ค่าความขุ่น (NTU)	327.7	67.9	79.28	66.1	79.83

จากตารางที่ 4-4 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและการกำจัดความขุ่นมีค่าสูงสุดที่ 77.94±3.89% และ 79.83% ตามลำดับ ที่ระยะเก็บน้ำตัวอย่าง 60 เซนติเมตร โดยมีค่าซีไอดีหลังการบำบัด 293±46 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความขุ่น 66.1 NTU เมื่อเปรียบเทียบผลจากการเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะ 30 เซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและความขุ่นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าในอนาคตสามารถออกแบบให้ถังปฏิบัติการมีขนาดเล็กลงได้ โดยที่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์มากนัก

4.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ชนิดต่าง ๆ

รูปที่ 4-13 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน และกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์ที่ใช้ อุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 74-78% อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่เวลา 15 นาที พบว่ากระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ $59.93 \pm 4.33\%$ และยังมีค่าสูงกว่าการบำบัดโดยไม่ใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ $52.83 \pm 4.73\%$ ซึ่งต้องใช้เวลาลงถึง 90 นาทีในการเดินระบบ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์ยังเหมาะสมสำหรับในกรณีที่เวลาเดินระบบหรือพื้นที่การบำบัดมีจำกัด



รูปที่ 4-13 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของโคอะเลสเซอร์ชนิดต่าง ๆ

4.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ผสมด้วยทรายแก้ว (Glass bead) ขนาด 100-200 ไมครอน ปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร เดินระบบโดยใช้ความเร็วการไหลน้ำเสีย 6.1 เมตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำ 40 มิลลิลิตร ทุก 30 นาที เป็นเวลา 90 นาที แล้วกรองด้วยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน อบให้แห้ง และนำไปชั่งน้ำหนัก โดยประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย แสดงได้ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ตัวอย่างน้ำเสีย	การกำจัดของแข็งแขวนลอย	
	น้ำหนักตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ (%)
น้ำเสียเริ่มต้น	3,035	-
นาที่ที่ 30	200	93.41
นาที่ที่ 60	113	96.29
นาที่ที่ 90	105	96.54

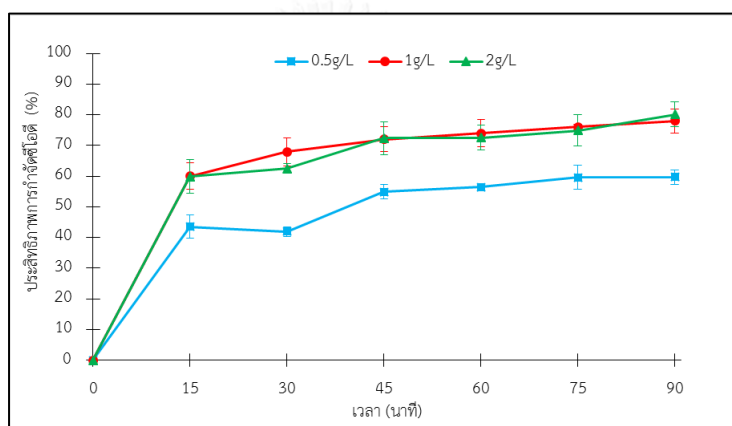
จากตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์มีค่าสูงสุดที่ 96.54% โดยมีน้ำหนักตะกอนที่เหลือ 105 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโคอะเลสเซอร์สามารถใช้ในการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการออกแบบถึงปฏิกิริยาให้มีบริเวณตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการบำบัด และหลังบำบัดจากกระบวนการโคอะเลสเซอร์ รวมทั้งชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ยังทำหน้าที่คล้ายชั้นกรองในกระบวนการกรอง (Filtration) ทำให้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้

4.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

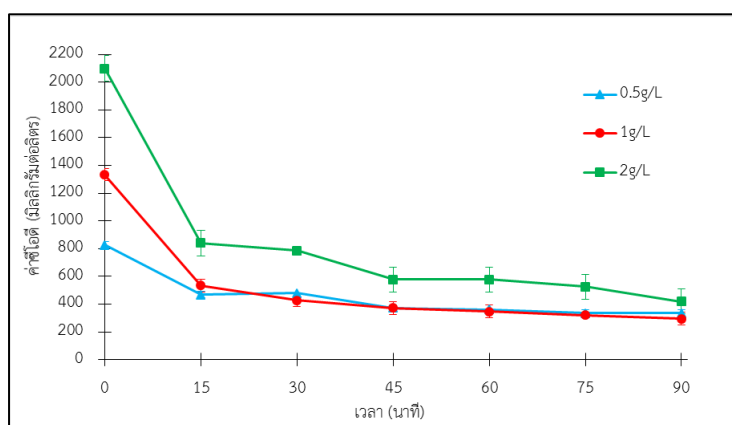
4.4.1 ผลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติ

รูปที่ 4-14 แสดงผลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติ ทดลองโดยน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร เตินระบบด้วยกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์ในสภาวะที่เหมาะสมตามการทดลองในเบื้องต้น พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติมีค่าสูงสุดใกล้เคียงกันที่ 78-80% ทั้งความเข้มข้น 1 และ 2 กรัมต่อลิตร โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Motta และคณะ (2014) ซึ่งทำการศึกษาระบบการร่วมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบ ในการทดลองได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ความเข้มข้นน้ำมัน 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของทั้ง 2 ความเข้มข้นมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นได้ว่าความเข้มข้นของน้ำเสียไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรพบว่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำจะมีปริมาณอนุภาค

น้ำมันที่กระจายตัวอยู่น้อย ทำให้โอกาสในการชนกันและเกิดการรวมตัวลดน้อยลง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติที่ได้จึงมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4-15 ทั้งนี้ ค่าซีโอติของน้ำเสียเริ่มต้นในแต่ละการทดลองจะมีค่าไม่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าปริมาณอนุภาคน้ำมันที่กระจายตัวในน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งหลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์แล้วพบว่า ค่าซีโอติที่เหลือในน้ำเสียมีค่าต่ำสุดใกล้เคียงกันที่ 293-333 มิลลิกรัมต่อลิตร ในความเข้มข้น 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร สำหรับที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 2 กรัมต่อลิตร มีค่าซีโอติเหลืออยู่ต่ำสุดที่ 420 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณอนุภาคน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสียเริ่มต้นสูงกว่าที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการกักที่มากกว่าเพื่อให้อนุภาคน้ำมันที่เหลือมีโอกาสชนกันและเกิดการรวมตัวได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้ซีโอติหลังการบำบัดมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้เวลาในการเดินระบบที่เท่ากัน



รูปที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาของกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์ ที่ความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน; ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4-15 ค่าซีโอติของน้ำเสียความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

4.4.2 ผลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น

ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)	ความขุ่น (NTU)		ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	หลังบำบัด	
0.5	157.6	52.8	66.50
1	327.7	66.1	79.83
2	710.0	120.0	83.10

จากตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร มีค่าอยู่ที่ 66.50% 79.83% และ 83.10% จะเห็นได้ว่าความขุ่นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสีย ดังนั้นน้ำเสียที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร จะมีอนุภาคน้ำมันกระจายตัวอยู่เยอะทำให้มีโอกาสในการเกิดการรวมตัวและแยกออกจากน้ำเสียได้ดีกว่า ทำให้อนุภาคน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสียลดลงมากกว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตรจึงมีค่าสูงกว่าที่ 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นในน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์ พบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 2 กรัมต่อลิตร กลับมีค่าความขุ่นเหลืออยู่มากที่สุดที่ 120 NTU ซึ่งมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลองในข้อ 4.4.1 ดังนั้นวิธีแก้ไขเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น จึงควรเพิ่มเวลาในการกักให้นานขึ้น เพื่อช่วยเพิ่มโอกาสในการชนกันและเกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียได้มากขึ้นนั่นเอง

อย่างไรก็ตามจากการทดลองในการกำจัดความขุ่นในน้ำเสียของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ พบว่ายังคงเหลือความขุ่นในน้ำเสียหลังการบำบัดอยู่ประมาณ 50-120 NTU ซึ่งยังไม่ผ่านตามมาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ต้องมีความขุ่นไม่เกิน 5 NTU (World Health Organization, 2006) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาการใช้กระบวนการเมมเบรนในขั้นตอนถัดไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความขุ่นที่เหลืออยู่หลังการบำบัดด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

การทดลองนี้ใช้กระบวนการเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยเลือกใช้เมมเบรนชนิดโมดูลเส้นใยกลวง (Hollow fiber membrane) ทำจากพอลิซัลโฟน (Polysulfone, PSU) ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) มีพื้นที่ผิวรวม 0.14 ตารางเมตร และขนาดรูพรุน 0.01 ไมครอน น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ทำการกรองโดยเก็บตัวอย่างน้ำทุก 10 นาที จนกระทั่งค่าฟลักซ์เริ่มลดลงต่ำกว่า 50% จึงทำการล้างย้อนเพื่อลดการอุดตันของเมมเบรน การล้างย้อนใช้วิธีเป่าลมไหลย้อนกลับไปยังอุปกรณ์เมมเบรนเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเดินระบบกรองอีกครั้ง การทดลองนี้จะทำการศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียที่มีต่อฟลักซ์ (Permeate Flux) และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่น โดยฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน (J_p) สามารถคำนวณได้จากสมการ 4-3

$$J_p = \frac{V}{t \cdot A} \quad (4-3)$$

โดยที่ J_p	คือ	ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน (ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)
V	คือ	ปริมาตรน้ำที่กรองได้ (ลิตร)
t	คือ	เวลาที่ใช้ในการกรอง (ชั่วโมง)
A	คือ	พื้นที่ผิวเมมเบรน (ตารางเมตร)



รูปที่ 4-16 ลักษณะอุปกรณ์เมมเบรน

4.5.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของกระบวนการเมมเบรน

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของกระบวนการเมมเบรนที่ความเข้มข้นน้ำเสีย 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร แสดงได้ดังตารางที่ 4-7 และ 4-8

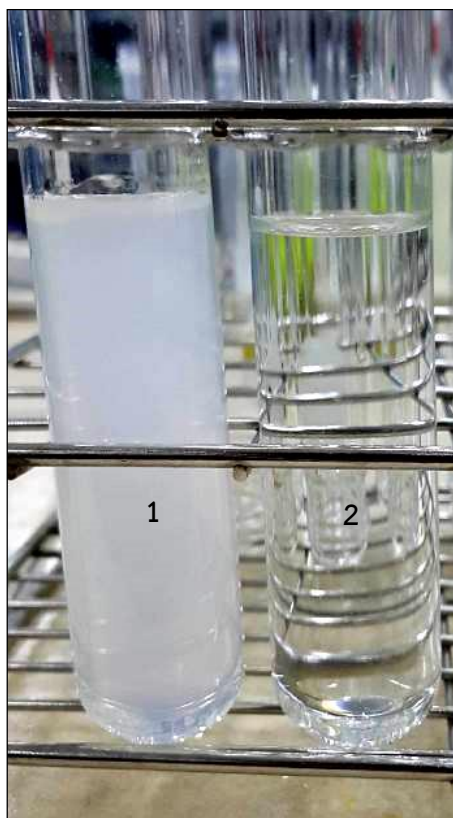
ตารางที่ 4-7 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของกระบวนการเมมเบรน

ความเข้มข้นน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	หลังบำบัด	
0.5	927±22	229±0	75.33±0.58
1	1,575±88	229±44	83.79±3.35
2	2,050±87	350±87	82.97±3.85

ตารางที่ 4-8 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของกระบวนการเมมเบรน

ความเข้มข้นน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)	ความขุ่น (NTU)		ประสิทธิภาพ (%)
	เริ่มต้น	หลังบำบัด	
0.5	167.7	1.3	99.22
1	378.3	1.8	99.52
2	703.7	2.8	99.60

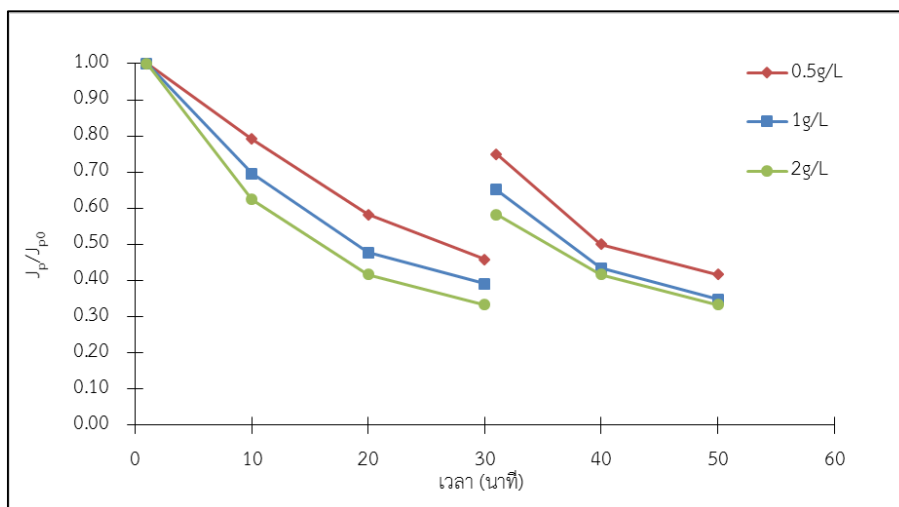
จากตารางที่ 4-7 และ 4-8 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการเมมเบรนอยู่ในช่วง 75-83% ซึ่งมีค่าซีโอดีหลังการบำบัดที่ 229-350 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้มีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ด้วย ซึ่งสารลดแรงตึงผิวนี้สามารถละลายในน้ำได้จึงไม่อยู่ในรูปสารแขวนลอย ทำให้มีบางส่วนที่หลุดออกมากับน้ำหลังการกรองได้ (Majewska-Nowak และคณะ, 2008) ส่งผลให้ค่าซีโอดีที่ได้เกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นพบว่าสูงถึง 99% โดยสามารถสังเกตลักษณะของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดได้มีลักษณะใส ไม่มีสี ดังแสดงในรูปที่ 4-17 เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นหลังการบำบัดพบว่า ผ่านตามมาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่มีความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU (World Health Organization, 2006)



รูปที่ 4-17 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรน
1) น้ำเสียเริ่มต้น และ 2) หลังผ่านกระบวนการเมมเบรน

4.5.2 ผลของความเข้มข้นของน้ำมันต่อการอุดตันของเมมเบรน

การศึกษาการอุดตันของเมมเบรน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ อัตราส่วนระหว่างค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำเสีย ณ เวลาต่าง ๆ (J_p) และค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำเสีย เริ่มต้น (J_{p0}) หรือ J_p/J_{p0} เทียบกับเวลาที่ใช้ในการกรอง ดังรูปที่ 4-18 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์จะ ลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลา เนื่องจากเกิดชั้นเค้ก (Cake formation) อุดตันที่ผิวหน้าเมมเบรน (ปทุมทรีย์ เขียวภักดี, 2554) ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรนมีน้อยลง ค่าฟลักซ์ที่ได้จึงลดลง จากการ ทดลองเมื่อเดินระบบ 30 นาที พบว่า อัตราส่วนของค่าฟลักซ์มีค่าลดลงเหลือประมาณ 30-40% จึง หยุดเดินระบบและทำการล้างย้อน โดยพบว่าสามารถช่วยเพิ่มค่าฟลักซ์ได้สูงขึ้นเป็น 60-70% เมื่อ พิจารณาผลของความเข้มข้นของน้ำเสีย พบว่า ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์ ลดลง โดยน้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้อยจะเกิดการอุดตันได้ช้ากว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงค่าฟลักซ์ที่ ได้จึงมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงจะมีอนุภาคน้ำมันกระจายตัวอยู่ในปริมาณมาก ส่งผลให้มีการสะสมและเกิดเป็นชั้นเค้กที่ผิวเมมเบรนได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4-18 ค่าฟลักซ์ของน้ำเสียน้ำความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จะเห็นได้ว่ากระบวนการเมมเบรนมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียทุกความเข้มข้น อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของน้ำเสียที่มากขึ้นก็ส่งผลต่อการอุดตันบนผิวเมมเบรนได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งการใช้กระบวนการบำบัดขั้นต้นมาช่วยลดปริมาณอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าสู่เมมเบรน จะทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้ช้าลง ดังนั้น ในการทดลองถัดไปจึงได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคเอสเซอร์และเมมเบรน

4.6 การศึกษากระบวนการร่วมของโคเอสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ และการบำบัดน้ำเสียจริง น้ำเสียสังเคราะห์จะใช้น้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจริงเก็บตัวอย่างจากโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการทดลองโดยเดินระบบด้วยอุปกรณ์โคเอสเซอร์ตามสภาวะการทดลองที่เหมาะสม (ความหนาชั้นตัวกลางโคเอสเซอร์แนวตั้ง 10 เซนติเมตร และแนวนอน 3 เซนติเมตร ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง) เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นทำการกรองโดยใช้เมมเบรนจนกระทั่งอัตราส่วนของค่าฟลักซ์ (J_p/J_{p0}) ลดน้อยกว่า 50% จึงทำการล้างย้อน วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและความขุ่น และความเร็วในการเกิดการอุดตันของเมมเบรน

4.6.1 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการร่วม

4.6.1.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4-9

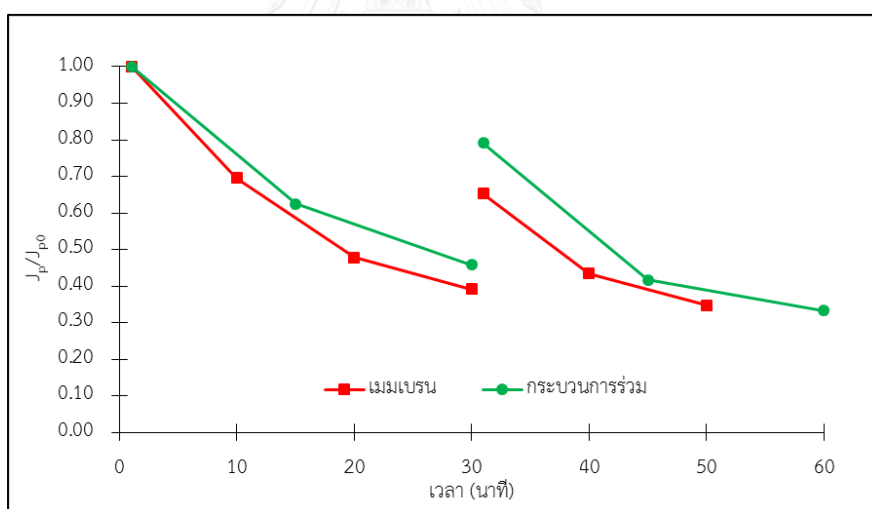
ตารางที่ 4-9 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการร่วม

ระยะเวลา (นาท)	กระบวนการ	การกำจัดซีโอดี		การกำจัดความขุ่น	
		ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ประสิทธิภาพ (%)	ค่าความ ขุ่น (NTU)	ประสิทธิภาพ (%)
0	โคอะเลสเซอร์	1,575±43	-	344.3	-
15		738±0	53.10±1.25	189.0	45.11
30		615±43	60.97±1.62	127.7	62.91
45		517±0	67.17±0.87	115.3	66.51
60		418±43	73.38±3.37	88.8	74.21
61	เมมเบรน	320±43	79.73±2.12	3.8	98.90
75		271±85	82.76±5.70	2.5	99.27
90		246±43	84.34±2.95	2.4	99.30
91		246±43	84.34±2.95	2.9	99.16
105		246±43	84.34±2.95	2.7	99.22
120		246±43	84.42±2.25	2.4	99.30

จากตารางที่ 4-9 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุดมีค่า 73.38±3.37% และเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในกระบวนการเมมเบรนที่ 84.42±2.25% โดยมีค่าซีโอดีของน้ำเสียหลังการบำบัดที่ 246±43 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นก็มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์สามารถกำจัดความขุ่นได้สูงสุดที่ 74.21% และมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ดีมากในกระบวนการเมมเบรนโดยประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 99.30% มีค่าความขุ่นหลังการบำบัดที่ 2.4 NTU จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการร่วมของโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนสามารถใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.6.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการลดการเกิดการอุดตัน

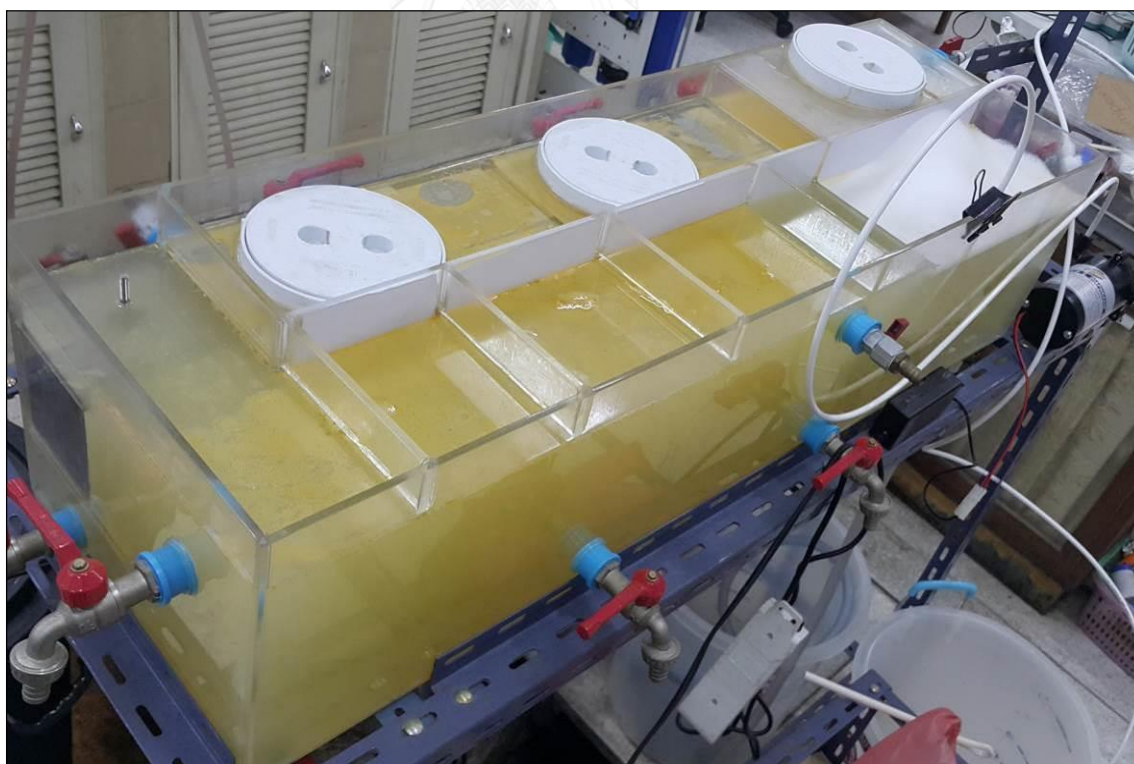
จากรูปที่ 4-19 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของของกระบวนการร่วมและกระบวนการเมมเบรน โดยพบว่าค่าฟลักซ์ของกระบวนการร่วมมีอัตราการลดลงน้อยกว่ากระบวนการเมมเบรน เนื่องจากในกระบวนการร่วมมีการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ก่อนเข้ากระบวนการเมมเบรน ทำให้อนุภาคน้ำมันที่เข้าสู่เมมเบรนลดลง ส่งผลให้การอุดตันที่ผิวเมมเบรนเกิดขึ้นน้อยลง ค่าฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าสูงกว่าการบำบัดด้วยกระบวนการเมมเบรนเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Motta และคณะ (2014) ซึ่งทำการศึกษาระบบการร่วมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดิบ พบว่า การใช้กระบวนการร่วมในการบำบัดน้ำเสีย ช่วยให้ความเร็วในการอุดตันของเมมเบรนลดลง จึงทำให้ลดความถี่ในการล้างย้อนได้ นอกจากนี้เมื่อทำการล้างย้อน พบว่า กระบวนการร่วมจะฟื้นฟูค่าฟลักซ์ได้ดีกว่ากระบวนการเมมเบรน เนื่องจากในกระบวนการร่วมจะมีการบำบัดขั้นต้นเพื่อลดจำนวนอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าสู่เมมเบรนให้น้อยลง จึงทำให้เกิดการสะสมของชั้นเค้กน้อยลง ดังนั้น ในการล้างย้อนจึงสามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้ง่ายกว่า และทำให้เมมเบรนมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-19 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการร่วมกับกระบวนการเมมเบรน

4.6.2 การบำบัดน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการร่วม

ตัวอย่างน้ำเสียจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียที่เกิดจากการทำความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับประทานอาหารเช้า มีน้ำยาล้างจานซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างน้ำเสียมีลักษณะเป็นสีส้มขุ่น มีเศษอาหารและน้ำมันปะปนอยู่ และมีฟองอากาศลอยอยู่ที่ผิวน้ำ ลักษณะการบำบัดน้ำเสียจริงของกระบวนการร่วม แสดงได้ดังรูปที่ 4-20



รูปที่ 4-20 การบำบัดน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการร่วม

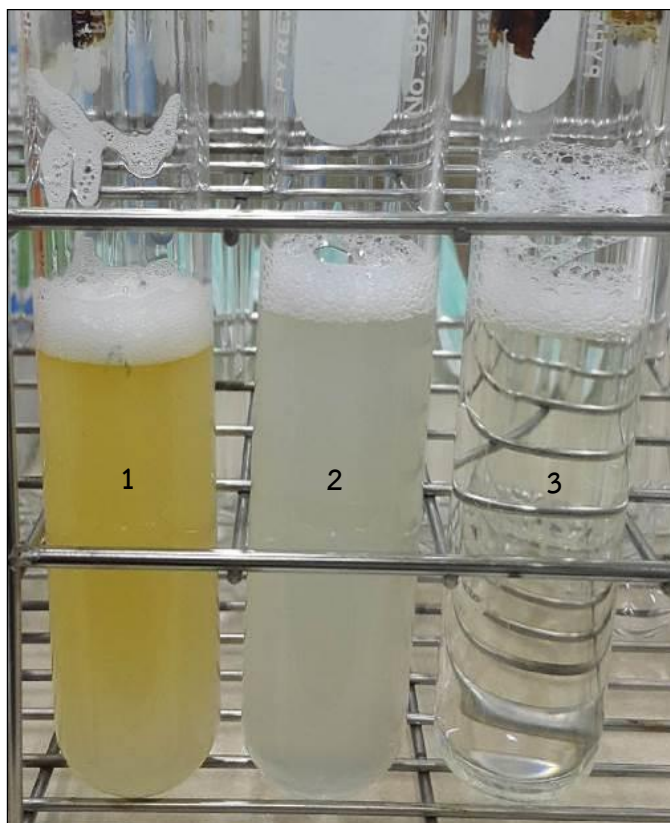
4.6.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริง แสดงดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงของกระบวนการร่วม

ระยะเวลา (นาท)	กระบวนการ	การกำจัดซีไอดี		การกำจัดความขุ่น	
		ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ประสิทธิภาพ (%)	ค่าความ ขุ่น (NTU)	ประสิทธิภาพ (%)
0	โคอะเลสเซอร์	38,646±426	-	7,643.0	-
15		3,643±43	90.57±0.19	461.0	93.97
30		3,151±43	91.85±0.2	372.7	95.12
45		2,978±43	92.29±0.17	338.7	95.57
60		2,905±43	92.48±0.03	322.7	95.78
61	เมมเบรน	1,502±43	96.11±0.14	4.3	99.94
65		1,280±43	96.69±0.13	2.3	99.97
66		1,280±43	96.69±0.07	2.4	99.97
70		1,280±43	96.69±0.13	1.9	99.98

จากตารางที่ 4-10 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำจริงของกระบวนการร่วม จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพมีลักษณะคล้ายกับการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีที่ 96.69±0.13% มีค่าซีไอดีหลังการบำบัดที่ 1,280±43 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ 99.98% โดยมีค่าความขุ่นหลังการบำบัดที่ 1.9 NTU จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการร่วมมีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเสียที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าเกิดการอุดตันของเมมเบรนอย่างรวดเร็วภายในเวลา 5 นาที ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีการปนเปื้อนของน้ำมันและเศษอาหาร ซึ่งแม้จะมีส่วนที่ถูกกำจัดไปกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์ แต่ก็ยังคงมีน้ำมันและเศษอาหารที่เหลืออยู่บางส่วนทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้อย่างรวดเร็ว สำหรับค่าซีไอดีของน้ำเสียหลังการบำบัดที่เกินมาตรฐานนั้น เกิดจากการที่น้ำเสียมีน้ำยาล้างจานปนเปื้อนในปริมาณมาก และมีส่วนที่สามารถผ่านเมมเบรนและออกมากับน้ำที่กรองได้ ส่งผลให้ค่าซีไอดีที่ได้มีค่าสูง โดยลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดของกระบวนการร่วม แสดงดังรูปที่ 4-21



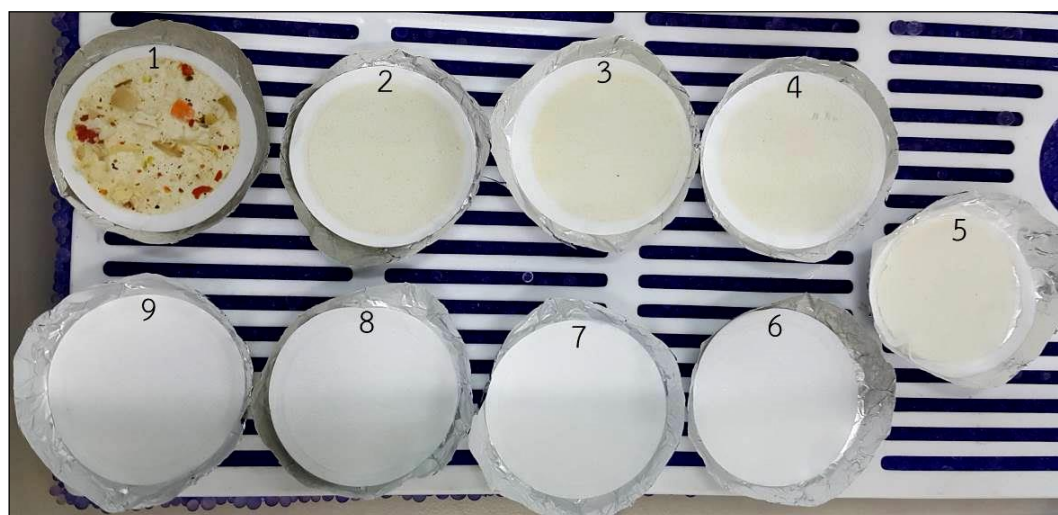
รูปที่ 4-21 ลักษณะน้ำเสียจริงที่ใช้ในกระบวนการร่วม
 1) น้ำเสียเริ่มต้น 2) หลังผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์
 และ 3) หลังผ่านกระบวนการเมมเบรน

4.6.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย

เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีการปนเปื้อนของเศษอาหารในปริมาณมาก ในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของกระบวนการร่วม โดยทำการกรองตัวอย่างน้ำ 40 มิลลิลิตร ด้วยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน อบให้แห้ง และนำไปชั่งน้ำหนัก ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย และลักษณะตะกอนน้ำเสียที่ตกค้างบนกระดาษกรองที่เวลาต่าง ๆ หลังผ่านกระบวนการบำบัด แสดงได้ดังตารางที่ 4-11 และรูปที่ 4-22 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-11 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของกระบวนการร่วม

ลักษณะน้ำเสีย	การกำจัดของแข็งแขวนลอย	
	น้ำหนักระตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ (%)
น้ำเสียเริ่มต้น	2,815	-
หลังผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์ 60 นาที	383	86.41
หลังผ่านกระบวนการเมมเบรน 5 นาที	5	99.82

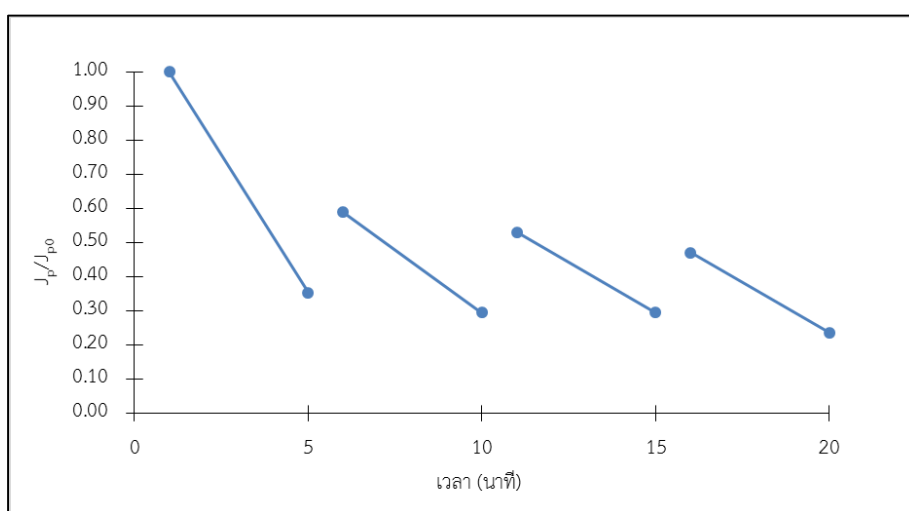


รูปที่ 4-22 ลักษณะตะกอนของน้ำเสียที่ตกค้างบนกระดาษกรองก่อนและหลังการบำบัด
 1) น้ำเสียเริ่มต้น 2-5) หลังผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์ นาทีที่ 15 30 45 และ 60 ตามลำดับ
 6-9) หลังผ่านกระบวนการเมมเบรน นาทีที่ 61 65 66 และ 70 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4-11 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการร่วมมีค่าสูงสุดที่ 99.82% โดยมีน้ำหนักระตะกอนที่เหลือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการร่วมนอกจากจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นแล้ว ยังสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ดีด้วย เนื่องจากถังปฏิกรณ์มีบริเวณตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการบำบัด และหลังบำบัดจากโคอะเลสเซอร์ ทำให้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยบางส่วนที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้ และเมื่อผ่านเมมเบรนก็สามารถกักตะกอนไว้ได้ทั้งหมด ทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่มีค่าน้อยมาก

4.6.2.3 การศึกษาการอุดตันของเมมเบรนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง

เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีเศษอาหารและน้ำมันปนอยู่ในปริมาณมาก ถึงแม้จะมีการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ แต่ก็ยังไม่สามารถบำบัดได้ทั้งหมด จึงทำให้เกิดการสะสมและอุดตันที่เมมเบรนอย่างรวดเร็ว โดยในการทดลองนี้พบว่าเมื่อนำการกรองเพียง 5 นาที ค่าฟลักซ์ที่ได้ก็มีค่าลดลงเหลือแค่ 35% จึงจำเป็นต้องทำการล้างย้อนทุก 5 นาที ดังรูปที่ 4-23 ซึ่งพบว่าหลังการล้างย้อนมีค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นเป็น 59% และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อทำการกรองอีกครั้ง โดยในการทดลองนี้เมื่อกรองได้ประมาณ 4 ครั้ง พบว่า การเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์หลังการล้างย้อนมีค่าน้อยกว่า 50% จึงหยุดทำการทดลอง



รูปที่ 4-23 ค่าฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียจริง ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน จะเห็นได้ว่ากระบวนการร่วมนี้สามารถใช้ในการกำจัดซีโอดี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียได้ดี อย่างไรก็ตามกระบวนการเมมเบรนที่ใช้ในการทดลองยังมีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาการดำเนินการ และเกิดการอุดตันได้รวดเร็วเมื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจริงที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน และการปนเปื้อนของของแข็งแขวนลอยที่สูง ในการใช้งานจริงของกระบวนการร่วมที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงอาจต้องเพิ่มเวลาในการเดินระบบโคอะเลสเซอร์ก่อนเดินระบบเมมเบรน เพื่อช่วยลดการอุดตันของเมมเบรน นอกจากนี้อาจใช้การบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการอื่น ๆ เช่น ถังตกตะกอน กระบวนการไฮโดรไซโคลอน เพื่อช่วยกำจัดของแข็งแขวนลอย และอนุภาคน้ำมันบางส่วน ให้แยกออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการร่วมต่อไป

4.7 การศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution, RTD)

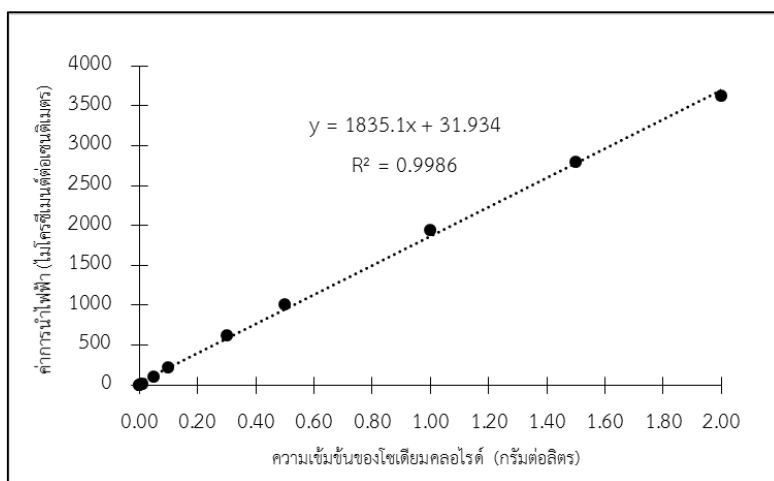
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยใช้น้ำประปา และทำการฉีดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl) ซึ่งใช้เป็นสารชี้วัด (Tracer) ลงในน้ำในทันทีภายในครั้งเดียว เรียกว่าการให้สารชี้วัดแบบพัลส์ (Pulse input experiments) จากนั้นจึงทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่เวลาต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution function) หรือ $E(t)$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-4 แล้วนำไปสร้างกราฟ E curve เพื่อใช้อธิบายรูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์ตามแบบจำลอง Compartment model โดยการนำไปเทียบกับแบบจำลองทางทฤษฎีที่ใกล้เคียงกัน

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (4-4)$$

โดยที่ $E(t)$ คือ สัดส่วนความเข้มข้นของสารชี้วัดที่ใช้ ในช่วงเวลา t ถึง $t + dt$
 $C(t)$ คือ ความเข้มข้นของสารชี้วัดที่ใช้ ในช่วงเวลาใด ๆ

4.7.1 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.001-2 กรัมต่อลิตร แล้ววัดค่าการนำไฟฟ้าของโซเดียมคลอไรด์ในแต่ละความเข้มข้น แล้วนำไปสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-24

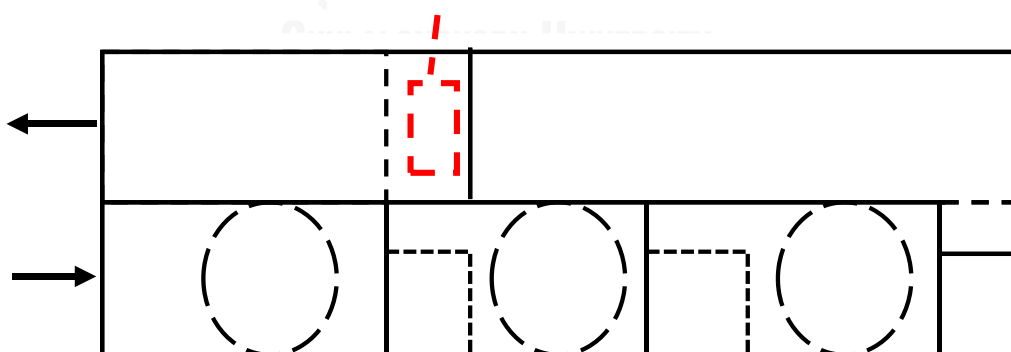


รูปที่ 4-24 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์

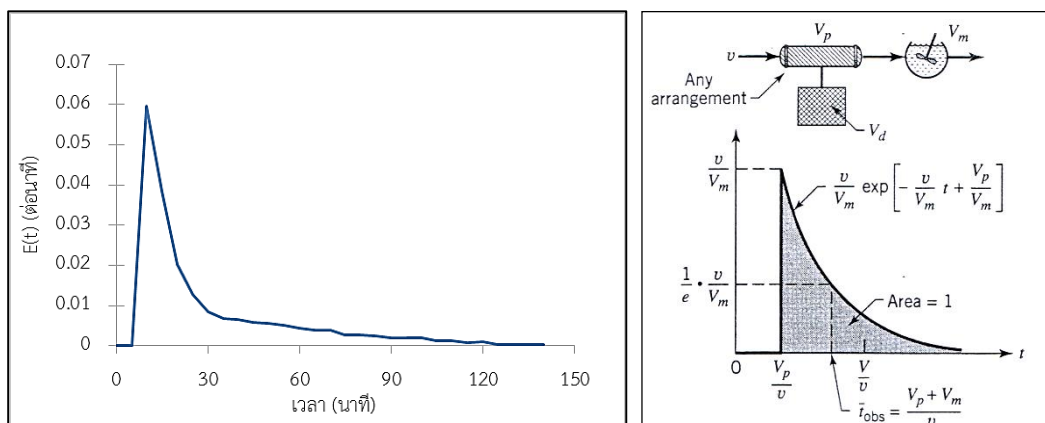
จากรูปที่ 4-24 เมื่อสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ จะได้สมการความสัมพันธ์คือ $y = 1835.1x + 31.934$ มีความเชื่อมั่นที่ $R\text{-square} = 0.9986$ ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์จากการวัดค่าการนำไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์ได้ในขั้นตอนถัดไป

4.7.2 การสร้างกราฟ E curve เพื่อหารูปแบบการไหล

เดินระบบถังปฏิกรณ์โคเคเลสเซอร์โดยไม่ใส่ชิ้นตัวกลางด้วยน้ำประปา อัตราการไหล 1.88 ลิตรต่อนาที เตรียมโซเดียมคลอไรด์ซึ่งเป็นสารชี้วัด ความเข้มข้น 300 กรัมต่อลิตรผสมกับสีย้อมเพื่อสังเกตการไหลของน้ำ ฉีดสารละลายปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงไปในน้ำแบบพัลส์ วัดค่าการนำไฟฟ้าที่ทางออกของถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4-25 ทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก E(t) และได้กราฟ E curve ดังแสดงในรูปที่ 4-26



รูปที่ 4-25 ตำแหน่งการวางเครื่องตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์โคเคเลสเซอร์



รูปที่ 4-26 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์โคเคสเซอร์เมื่อใช้ไซเดียมคลอไรด์เป็นสารชีวัดที่อัตราการไหล 1.88 ลิตรต่อนาที เทียบกับกราฟจากทฤษฎี

จากรูปที่ 4-26 พบว่ารูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์โคเคสเซอร์ มีลักษณะใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมสมบูรณ์ผสมกับถังปฏิกรณ์แบบท่อ (Completely mixed and Plug flow reactor) (Levenspiel, 1999) เมื่อคำนวณเวลากักเฉลี่ย (Mean residence time, \bar{t}) จากสมการที่ 4-5 เทียบกับเวลากักที่ออกแบบไว้ (Ideal residence time, Θ) จะมีค่าเท่ากับ 30.04 และ 33.14 นาที ตามลำดับ ซึ่งเวลากักเฉลี่ยที่มีค่าน้อยกว่าตามที่ออกแบบไว้ แสดงให้เห็นว่าภายในถังปฏิกรณ์จะมีบริเวณที่ไม่เกิดการไหลของน้ำ (Dead zone) ทำให้ปริมาณของถังที่เกิดปฏิกริยาลดลง สารชีวัดจึงออกมาเร็วกว่าเวลาตามที่ได้ออกแบบไว้

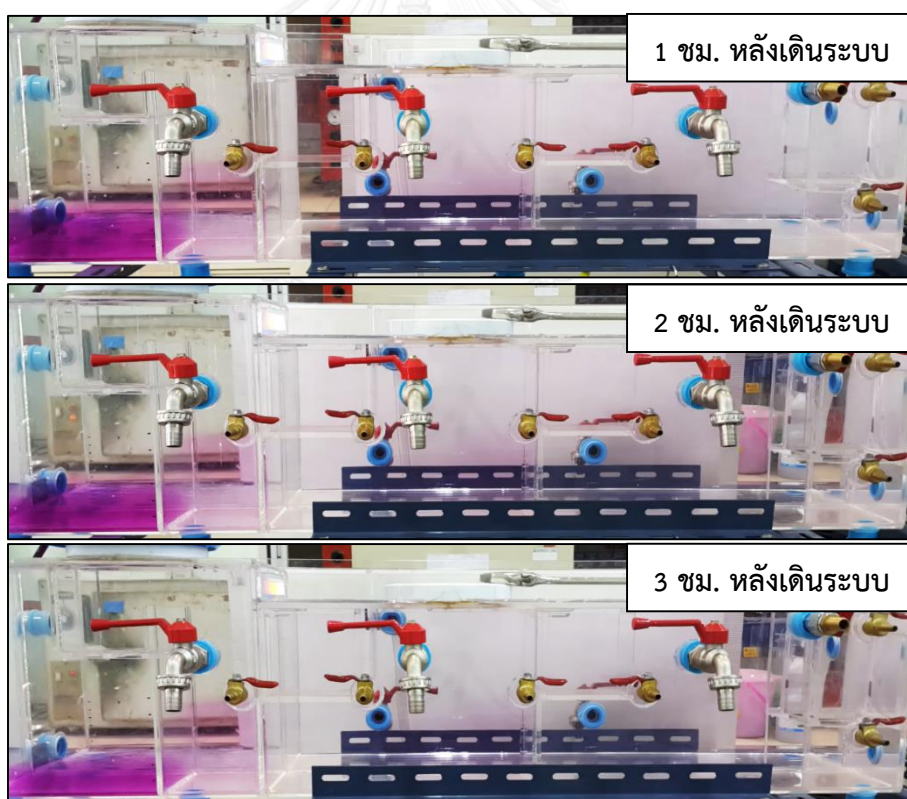
$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} E(t)dt} \quad (4-5)$$

โดยที่ \bar{t} คือ เวลาเฉลี่ยที่สารชีวัดอยู่ในถังปฏิกรณ์
 t คือ เวลากักสารในถังปฏิกรณ์
 $E(t)$ คือ สัดส่วนความเข้มข้นของสารชีวัดที่ใช้ ในช่วงเวลา t ถึง $t + dt$

เมื่อพิจารณาเวลากักเฉลี่ย (Mean residence time, \bar{t}) ที่ 30.04 นาที เทียบกับเวลากักเฉลี่ยที่ได้จากกราฟ E curve (Mean observe residence time, \bar{t}_{obs}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31.76 นาที (คำนวณจากสมการในรูปที่ 4-26) พบว่าเวลากักเฉลี่ยที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าเวลากักเฉลี่ยที่ได้จากกราฟ E curve แสดงว่าเกิดความผิดพลาดในการทดลองเนื่องจากสารชีวัดที่ใช้ไม่สามารถออกจากถังปฏิกรณ์ได้ทั้งหมด ทำให้เวลากักเฉลี่ยที่ได้จากกราฟ E curve มีค่าไม่ถูกต้อง ซึ่งเมื่อพิจารณา

ดูจากรูปที่ 4-25 จะเห็นได้ว่าการตกค้างของสารชีววัตถุอยู่ในถัง (สีที่เติมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์) ซึ่งไม่สามารถไหลออกจากถังได้ทั้งหมด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าการทดลองที่ถูกต้องได้

การทดลองข้างต้นเป็นการหารูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาที่อัตราการไหล 1.88 ลิตรต่ออนาที เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 0.71 ลิตรต่ออนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ใช้ในงานวิจัยการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ (ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง) พบว่าชั้นของสีที่จมตัวลงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่เวลานาน ดังรูปที่ 4-27 จึงสรุปได้ว่าเกิดการตกตะกอนของสารชีววัตถุ และเป็นข้อจำกัดในการศึกษาการกระจายของเวลากัก ผลดังกล่าวอาจเนื่องมาจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้มีความหนาแน่นที่หนักกว่าน้ำ ด้วยความเร็วน้ำที่ต่ำเกินไป จึงไม่สามารถพาสารดังกล่าวให้ไหลไปตามกระแสไปได้ทั้งหมด และเนื่องจากถังปฏิกิริยาโคอะเลสเซอร์ที่ออกแบบไว้มีส่วนที่ถูกออกแบบไว้เพื่อใช้สำหรับการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอย ทำให้โซเดียมคลอไรด์บางส่วนติดค้างอยู่ในถังปฏิกิริยา จึงไม่สามารถคำนวณการกระจายของเวลากักได้ ในการทดลองถัดไปจะใช้สีเพียงอย่างเดียวเป็นสารชีววัตถุในการคำนวณการกระจายของเวลากัก



รูปที่ 4-27 ลักษณะการตกตะกอนของสารชีววัตถุ ณ เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 0.71 ลิตรต่ออนาที

4.7.3 การศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักโดยใช้สีละลายน้ำเป็นสารชี้วัด

การทดลองนี้จะใช้สีที่ละลายน้ำได้เป็นสารชี้วัดในการศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากัก โดยฉีดสีที่ละลายน้ำได้ลงไปใต้น้ำในรูปแบบพัลส์ บันทึกการไหลของสีในถังปฏิกิริยาเป็นไฟล์วิดีโอ วิเคราะห์ความเข้มสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ และคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก ($E(t)$) สร้างกราฟ E curve เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทฤษฎีในการใช้อธิบายรูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยา

4.7.3.1 การศึกษาความเร็วในการแพร่กระจายของสีในน้ำ

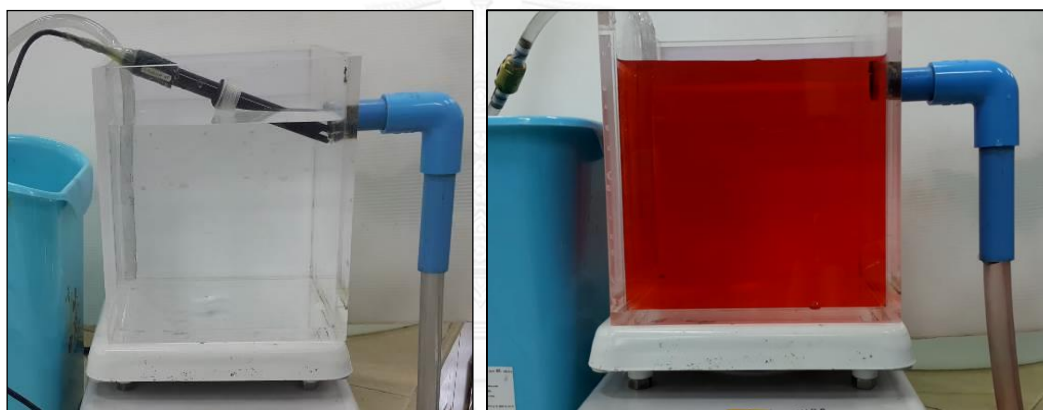
รูปที่ 4-28 เป็นการศึกษาความเร็วในการแพร่กระจายของสีในน้ำเพื่อหาสีที่เหมาะสมในการทดลอง ศึกษาสีที่ใช้ทดลอง 2 ชนิด คือ สีผสมอาหาร (Food coloring) และสีย้อม (Dye) โดยใช้น้ำประปา 1 ลิตร พบว่าสีผสมอาหารสามารถแพร่กระจายได้ทั้งหมดภายในเวลา 5 นาที ซึ่งเร็วกว่าสีย้อมที่ใช้เวลาถึง 12 นาที ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้สีผสมอาหารเป็นสารชี้วัดในการศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากัก



รูปที่ 4-28 ลักษณะการแพร่กระจายของสีย้อมและสีผสมอาหารในน้ำ

4.7.3.2 การศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาขนาดเล็กเมื่อใช้สารซีวัดโซเดียมคลอไรด์เทียบกับสีผสมอาหาร

การทดลองนี้จะทำการศึกษารูปแบบการไหลเมื่อใช้สีผสมอาหารเป็นสารซีวัด โดยเปรียบเทียบกับการใช้โซเดียมคลอไรด์ ทดลองโดยใช้ถังปฏิกริยาขนาดเล็กลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4-29 ทดลองโดยใช้อัตราเร็วการไหล 2 ค่า คือ 0.81 และ 3.16 ลิตรต่อนาที ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ และวัดค่าความเข้มข้นเมื่อใช้สีผสมอาหาร ทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก E(t) จะได้กราฟ E curve ที่อัตราเร็วการไหล 0.81 และ 3.16 ลิตรต่อนาที ของโซเดียมคลอไรด์ และสีผสมอาหาร ดังแสดงในรูปที่ 4-30 และ 4-31 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบลักษณะของกราฟ E(t) ของทั้ง 2 การทดลองว่ามีลักษณะการไหลที่คล้ายกันหรือไม่ เพื่อนำใช้ในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์ในการทดลองถัดไป

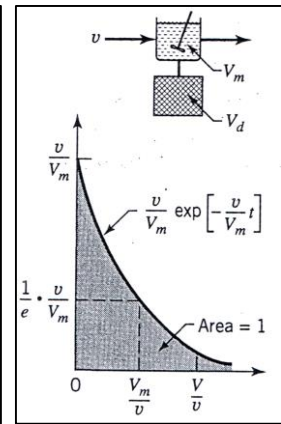
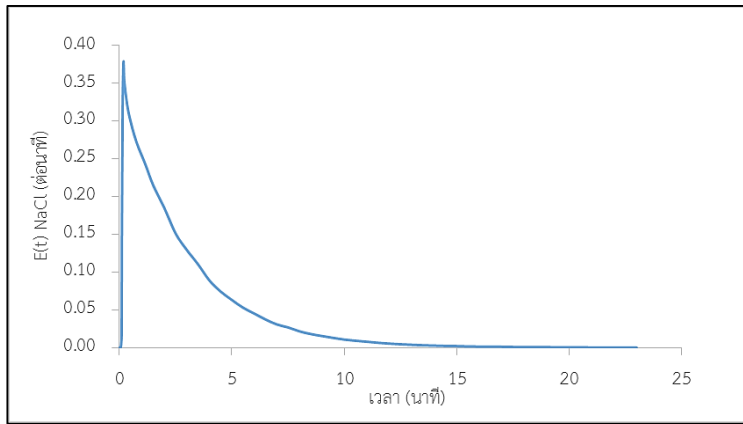


(ก)

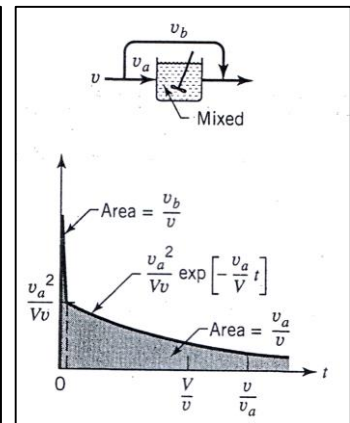
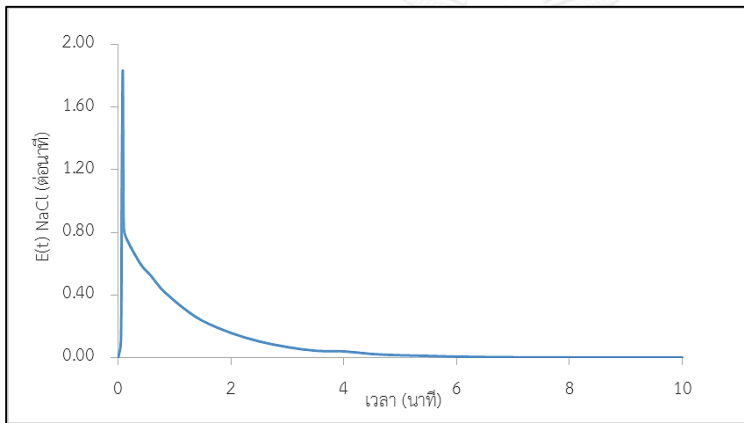
(ข)

รูปที่ 4-29 ลักษณะการศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาขนาดเล็ก

(ก) วัดค่าการนำไฟฟ้า และ (ข) วัดความเข้มข้น

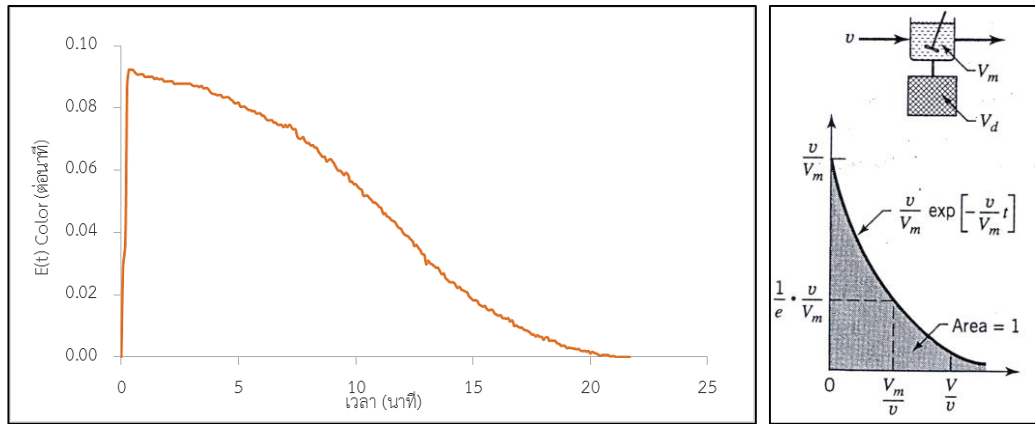


(ก)

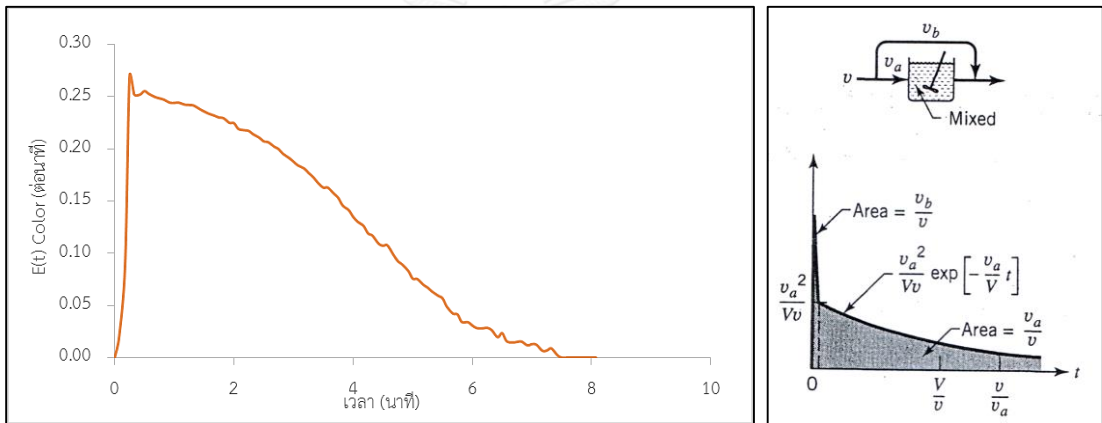


(ข)

รูปที่ 4-30 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็กเมื่อใช้ไซโตเดียมคลอไรด์เป็นสารชี้วัด เทียบกับกราฟจากทฤษฎี (ก) 0.81 ลิตรต่อนาที และ (ข) 3.16 ลิตรต่อนาที



(ก)



(ข)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

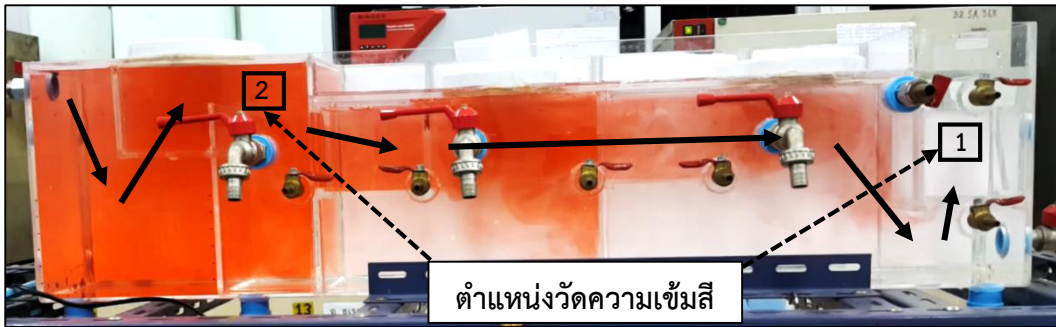
รูปที่ 4-31 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็กเมื่อใช้สีผสมอาหารเป็นสารชี้วัด เทียบกับกราฟจากทฤษฎี (ก) 0.81 ลิตรต่อนาที และ (ข) 3.16 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4-30 เป็นกราฟ E curve ของการวัดค่าการนำไฟฟ้า จะเห็นว่าที่อัตราการไหล 0.81 ลิตรต่อนาที กราฟมีลักษณะใกล้เคียงกับถังปฏิกริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ คำนวณเวลากักเฉลี่ย (\bar{t}) มีค่าเท่ากับ 1.63 นาที ซึ่งน้อยกว่าเวลากักที่ออกแบบไว้ (Θ) ที่มีค่าเท่ากับ 3.89 นาที แสดงว่าภายในถังมีบริเวณที่ไม่เกิดการไหลของน้ำ (Dead zone) สำหรับที่อัตราการไหล 3.16 ลิตรต่อนาที กราฟมีลักษณะใกล้เคียงกับถังปฏิกริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ แต่กราฟมีจุดพีคสูงขึ้นในช่วงต้นแสดงว่าภายในถังมีบริเวณที่น้ำไหลลัดออกไปก่อน (Short circuit) คำนวณเวลากักเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.50 นาที ซึ่งน้อยกว่าเวลากักที่ออกแบบไว้ที่มีค่าเท่ากับ 1.00 นาที

รูปที่ 4-31 เป็นกราฟ E curve ของการวัดค่าความเข้มข้น พบว่ากราฟที่ออกมา มีลักษณะที่ค่อนข้างแตกต่างจากแบบจำลองทางทฤษฎี แต่สามารถบอกคร่าว ๆ ได้ว่ามีลักษณะเป็นถังปฏิกริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ คำนวณค่าเวลากักเฉลี่ย (\bar{t}) ของการทดลองที่อัตราการไหล 0.81 และ 3.16 ลิตรต่อนาที มีค่า 6.57 และ 2.48 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเวลากักที่ได้ออกแบบไว้ แสดงว่าเกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สาเหตุอาจมาจากการใช้การวัดความเข้มข้น ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่ถูกต้อง เช่น แสงจากภายนอก ความคมชัดของไฟลิวีดีโอ และเงาสะท้อนจากถังปฏิกริยา เป็นต้น นอกจากนี้ ความหนาของถังปฏิกริยาก็ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความเข้มข้นมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการวัดความเข้มข้นจะวัดจากด้านข้าง ซึ่งภายในถังปฏิกริยาจะมีจุดที่สีซ้อนทับกันทำให้จุดที่ต้องการวัดมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าที่ได้ไม่ถูกต้อง ดังนั้น วิธีการวัดความเข้มข้นในการหารูปแบบการไหล จะนั้นไม่สามารถนำไปคำนวณหาเวลาในการกักได้ แต่สามารถใช้ระบุลักษณะการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบคร่าว ๆ และสังเกตการไหลของน้ำด้วยตาเปล่าได้

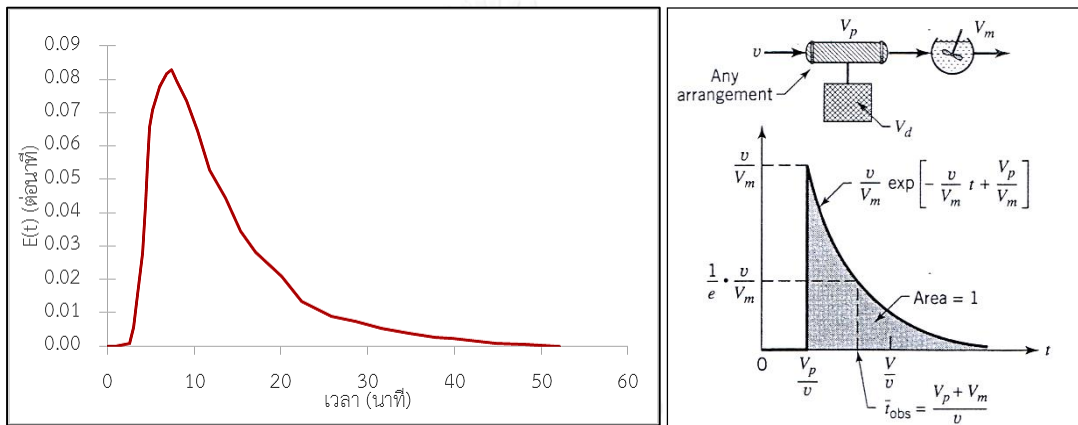
4.7.4 การศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์โดยใช้สีผสมอาหารเป็นสารชี้วัด

การศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักโดยการใส่สีผสมอาหารเป็นสารชี้วัด เติมนระบบด้วยอัตราการไหล 1.88 ลิตรต่อนาที บันทึกไฟลิวีดีโอการไหลของน้ำในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์ วัดค่าความเข้มข้นตามตำแหน่งในรูปที่ 4-32 เพื่อศึกษารูปแบบการไหลในแต่ละส่วนของถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์ โดยจุดที่ 1 เป็นจุดที่น้ำไหลออกจากบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ และจุดที่ 2 ซึ่งเป็นจุดที่น้ำไหลเข้าบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม ImageJ จะได้กราฟ E curve ของจุดที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4-33 และ 4-34 ตามลำดับ

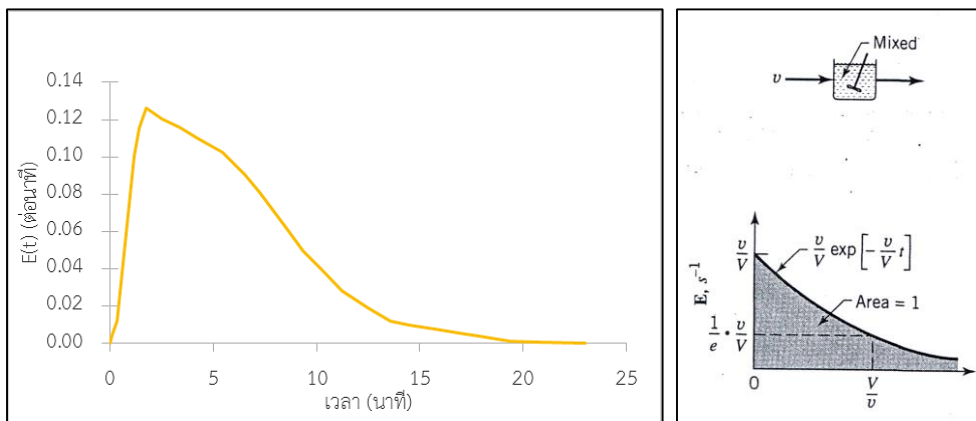


→ ทิศทางการไหลของน้ำ

รูปที่ 4-32 ลักษณะการไหลของสึผสมอาหารในถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์

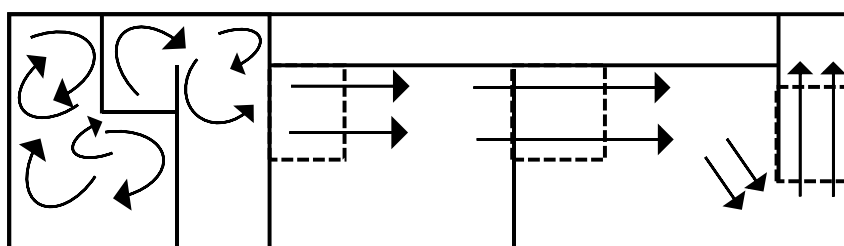


รูปที่ 4-33 กราฟ E curve จุดที่ 1 ของถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์เมื่อใช้สึผสมอาหารเป็นสารชี้วัด ที่อัตราการไหล 1.88 ลิตรต่อนาที เทียบกับกราฟจากทฤษฎี



รูปที่ 4-34 กราฟ E curve จุดที่ 2 ของถังปฏิกริยาโคอะเลสเซอร์เมื่อใช้สึผสมอาหารเป็นสารชี้วัด ที่อัตราการไหล 1.88 ลิตรต่อนาที เทียบกับกราฟจากทฤษฎี

จากรูปที่ 4-33 และ 4-34 เป็นการวัดค่าความเข้มข้นที่จุดที่ 1 ซึ่งเป็นจุดที่น้ำไหลออกจากบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ จะเห็นว่ากราฟ E curve ที่ได้มีลักษณะกราฟใกล้เคียงกับกราฟ E curve ของโซเดียมคลอไรด์ในรูปที่ 4-26 ดังนั้นถึงปฏิกิริยาโคอะเลสเซอร์จึงมีรูปแบบการไหลใกล้เคียงกับถึงปฏิกิริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ผสมกับถึงปฏิกิริยาแบบท่อ และเมื่อทำการวัดค่าความเข้มข้นที่จุดที่ 2 ซึ่งเป็นจุดที่น้ำไหลเข้าบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ พบว่ากราฟ E curve มีลักษณะรูปแบบการไหลใกล้เคียงกับถึงปฏิกิริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ ดังนั้น จึงสามารถจำลองรูปแบบการไหลในถึงปฏิกิริยาโคอะเลสเซอร์ได้ดังรูปที่ 4-35



รูปที่ 4-35 การจำลองรูปแบบการไหลในถึงปฏิกิริยาโคอะเลสเซอร์

ถึงแม้วิธีการการวัดความเข้มข้นจะไม่สามารถนำไปใช้คำนวณเวลากักที่ถูกต้องได้ แต่ก็ทำให้สามารถระบุรูปแบบการไหลเบื้องต้นได้ ทำให้สามารถรู้ได้ว่าแต่ละส่วนของถึงปฏิกิริยามีลักษณะการไหลอย่างไร นอกจากนี้ วิธีการนี้ยังสามารถใช้วัดในจุดที่อุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าไม่สามารถเข้าไปได้ เช่น ถึงระบบปิด ถึงที่มีความซับซ้อน เป็นต้น ทำให้สามารถวิเคราะห์รูปแบบการไหลที่จุดนั้น ๆ ได้ แต่วิธีการนี้ก็ยังมีข้อจำกัด คือ ถึงปฏิกิริยาต้องเป็นถึงที่โปร่งใสเท่านั้น และจำเป็นต้องใช้การให้แสงสว่างที่สม่ำเสมออย่างต่อเนื่องในจุดที่ทำการวัดจึงจะสามารถวัดค่าความเข้มข้นได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น วิธีการหารูปแบบการไหลโดยใช้สปีดสมอาหารก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการศึกษารูปแบบการไหลในถึงปฏิกิริยาที่ทำได้ไม่ยาก และมีความรวดเร็ว

อย่างไรก็ตามการจำลองรูปแบบการไหลนี้ เป็นเพียงการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของน้ำในถึงปฏิกิริยาโคอะเลสเซอร์เท่านั้น ไม่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

การนำกระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในอนาคต ในการออกแบบควรมีการพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เพื่อให้อุปกรณ์ที่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยตัวแปรสำคัญที่ควรพิจารณามีดังนี้

1. ตัวแปรที่มีผลต่อการเดินระบบของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ คือ ความเร็วการไหลของน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลาง ลักษณะและชนิดของตัวกลาง และความหนาของชั้นตัวกลาง
2. ตัวแปรที่มีผลต่อการเดินระบบของกระบวนการเมมเบรน คือ ความเข้มข้นของน้ำเสียและปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ระบบ และลักษณะและวิธีการล้างย้อน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากชุมชนด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน ซึ่งทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด คือ ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ความหนาของชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ความเข้มข้นของน้ำเสีย ความเร็วในการดูดตันของเมมเบรน และวิธีการล้างย้อน ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยของกระบวนการร่วม รวมทั้งศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์โคอะเลสเซอร์ ซึ่งสามารถทำการสรุปผลได้ดังนี้

1. จากการศึกษาผลของความเร็วการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ พบว่า ความเร็วการไหลส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอน จากการทดลองโดยใช้ความเร็วการไหลของน้ำเสีย 6.1-18.9 เมตรต่อชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีอยู่ที่ 65-79% โดยเมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียลดลง ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วการไหลต่ำ อนุภาคน้ำมันจะไหลช้าและถูกกักอยู่ในชั้นตัวกลางได้นาน ทำให้มีโอกาสรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จากการทดลองในงานวิจัยนี้ความเร็วการไหลของน้ำเสียที่ 6.1 เมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วการไหลที่เหมาะสมที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของกระบวนการโคอะเลสเซอร์สูงสุดอยู่ที่ 79%

2. จากการศึกษาผลของความหนาของชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ พบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นตัวกลางส่งผลต่อประสิทธิภาพเฉพาะโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้งเท่านั้น สำหรับโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จากการทดลองโดยใช้ความหนาของชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่ 3-10 เซนติเมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีจะอยู่ที่ 65-79% ซึ่งมากกว่าการบำบัดแบบไม่ใช้ตัวกลางที่ 54% และขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 4.53 ไมครอน เป็น 6.92-7.41 ไมครอน โดยเมื่อความหนาชั้นตัวกลางเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความหนาชั้นตัวกลางทำให้อนุภาคน้ำมันถูกกักอยู่ในชั้นตัวกลางได้นานขึ้น ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีเวลาในการเกิดการรวมตัวได้นานขึ้น จากการทดลองในงานวิจัยนี้ความหนาของชั้นตัวกลาง 10 เซนติเมตร เป็นความเร็วการไหลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง โดยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของกระบวนการโคอะเลสเซอร์มีค่าสูงสุดที่ 79%

สำหรับโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนประสิทธิภาพที่ได้ใกล้เคียงกันที่ 74-77% เนื่องจากแรงจากการไหลของน้ำเสีย และแรงลอยตัวของอนุภาคน้ำมัน มีทิศทางตั้งฉากกันและไม่ส่งผลต่อกันมากนัก ประสิทธิภาพที่ได้จึงใกล้เคียงกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความหนาชั้นตัวกลางที่ 3 เซนติเมตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ 74%

3. จากการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมโคอะเลสเซอร์แนวตั้งและแนวนอนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ โดยติดตั้งชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนตามด้วยชั้นตัวกลางแบบแนวตั้ง ใช้เวลาเดินระบบ 90 นาที เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะห่างจากชั้นตัวกลาง 30 และ 60 เซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดจากทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุดที่ 78% ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ 80% และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดที่ 97% นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำหลังเดินระบบกระบวนการร่วมที่ 15 นาที พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่าการบำบัดแบบไม่ใช้ตัวกลาง ดังนั้นกระบวนการร่วมจึงเหมาะสำหรับการบำบัดเมื่อเวลาเดินระบบหรือพื้นที่การบำบัดมีจำกัด

4. จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ พบว่า ความเข้มข้นของน้ำเสียไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของกระบวนการโคอะเลสเซอร์มากนัก แต่เมื่อความเข้มข้นมีค่าน้อย ๆ ประสิทธิภาพของกระบวนการโคอะเลสเซอร์จะลดลง เนื่องจากอนุภาคน้ำมันเกิดโอกาสในการชนกันและรวมตัวกันลดน้อยลง

5. จากการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ โดยใช้เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันชนิดโมดูลเส้นใยกลวงเดินระบบโดยจุ่มเมมเบรนให้อยู่ในระดับครึ่งหนึ่งของระดับน้ำ จากการทดลองพบว่า กระบวนการเมมเบรนมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุดที่ 84% ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ 99% และเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มขึ้น จะทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้เร็วขึ้น จำเป็นต้องมีการล้างย้อนเพื่อฟื้นฟูค่าฟลักซ์ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้วิธีล้างย้อนโดยการเป่าลมกลับไปยังอุปกรณ์เมมเบรนเป็นเวลา 5 นาที พบว่า สามารถฟื้นฟูค่าฟลักซ์จาก 30-40% ได้สูงขึ้นเป็น 60-70%

6. จากการศึกษากระบวนการร่วมของโคอะเลสเซอร์และเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ทดลองโดยเดินระบบโคอะเลสเซอร์เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเดินระบบเมมเบรนจนกระทั่งค่าฟลักซ์ต่ำกว่า 50% จึงทำการล้างย้อน พบว่า กระบวนการร่วมสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ และน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจริงจากโรงอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุดที่ 84% และประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ 99% สำหรับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

สูงสุดที่ 97% ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ 99% และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดที่ 99% สำหรับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจริง

7. ถึงปฏิกิริยาโคอะเลสเซอร์มีรูปแบบการไหลเป็นแบบถังปฏิกิริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ ผสมกับถังปฏิกิริยาแบบท่อ (Completely mixed and plug flow reactor) โดยพื้นที่บริเวณห้องตกตะกอนก่อนเข้าโคอะเลสเซอร์มีรูปแบบการไหลเป็นถังปฏิกิริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ และพื้นที่บริเวณที่ติดตั้งชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์มีรูปแบบการไหลเป็นถังปฏิกิริยาแบบท่อ

ตารางที่ 5-1 สรุปตัวแปรของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน

กระบวนการ	ตัวแปร	ค่าการออกแบบ
โคอะเลสเซอร์	วัสดุตัวกลาง	พอลิโพรไพลีน
	ลักษณะตัวกลาง	ทรงกระบอกกลวง
	ความหนาชั้นตัวกลาง - โคอะเลสเซอร์แบบแนวตั้ง - โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอน	10 เซนติเมตร 3 เซนติเมตร
	การติดตั้งอุปกรณ์	โคอะเลสเซอร์แบบแนวนอนตาม ด้วยแบบแนวตั้ง
	ความเร็วการไหลน้ำเสีย	6.1 เมตรต่อชั่วโมง
เมมเบรน	วัสดุเมมเบรน	พอลิซัลโฟน
	ลักษณะเมมเบรน	อัลตราฟิลเตรชัน โมดูลเส้นใยกลวง
	การติดตั้งอุปกรณ์	จุ่มเมมเบรน ให้อยู่ในระดับ 1/2 ของระดับน้ำ
	วิธีการล้างย้อน	เป่าลมย้อนกลับไปยังเมมเบรน
	เวลาในการล้างย้อน	5 นาที
กระบวนการร่วม	การติดตั้งอุปกรณ์	โคอะเลสเซอร์ตามด้วยเมมเบรน
	เวลาเดินระบบ - โคอะเลสเซอร์ - เมมเบรน	60 นาที หยุดเมื่อฟลักซ์ต่ำกว่า 50% เพื่อทำการล้างย้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนางานวิจัยในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในอนาคต มีดังต่อไปนี้

1. ควรศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่น ๆ เช่น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากปิโตรเลียม น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากอุตสาหกรรม น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากการรั่วไหลในทะเล เป็นต้น

2. ควรศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องเพื่อความคุ้มค่าในการบำบัด

3. ควรศึกษาหาวิธีการบำบัดด้วยเมมเบรนชนิดอื่น ๆ และศึกษาวิธีการล้างย้อนที่มีประสิทธิภาพ เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์เมมเบรน ทำให้ลดต้นทุนในการเดินระบบ

4. ควรศึกษาการออกแบบถังปฏิริยาโคอะเลสเซอร์ เช่น การปรับลดขนาดถังปฏิริยา การเพิ่มขนาดชั้นตัวกลางเพื่อรองรับอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น

5. ควรศึกษาการใช้กระบวนการร่วมกับกระบวนการบำบัดอื่น ๆ เช่น กระบวนการเติมอากาศ กระบวนการทางไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อลดข้อจำกัดของกระบวนการ และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรกช ก้องกังวาลย์ (2552). การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรมควบคุมมลพิษ (2551). คู่มือแนวทางการจัดการน้ำมันและไขมันจากบ่อดักน้ำมัน และการนำไปใช้ประโยชน์สำหรับร้านอาหาร แหล่งที่มา http://infofile.pcd.go.th/water/manual_Restaurant09.pdf [25 กันยายน 2558]
- จุฑารัตน์ หนูสุข (2546). การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินเพื่อการบำบัดขั้นที่สามสำหรับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปทุมทรัพย์ เทียวภักดี (2554). การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2557). สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2558 แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/download/document_tendency/journalofecon2558.pdf [23 กันยายน 2558]
- สุรีย์พร เบญจประดิษฐ์ (2556). กระบวนการร่วมของโคอะเลสเซอร์ไฟฟ้าเคมี และอัลตราฟิลเตรชันสำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

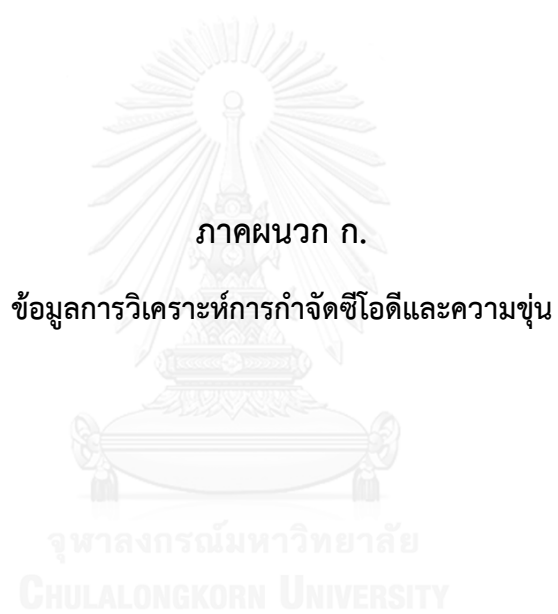
- Agarwal, S., Arnim, V. V., Stegmaier, T., Planck, H. and Agarwal, A. (2013). "Effect of Fibrous Coalescer Geometry and Operating Conditions on Emulsion Separation." Ind. Eng. Chem. Res. 52: 13164-13170.
- APHA, AWWA and WEF (1988). Standard method for the examination of water and wastewater. 20th ed. Baltimore: United Book Press.
- Aurrelle, Y. (1985). Treatment of Oil-Containing Wastewater. Bangkok: Department of Sanitary Engineering Chulalongkorn University.
- Chawaloeshonsiya, N. and Painmanakul, P. (2014). "Study of Cutting-Oil Emulsion Separation by Coalescer Process in Terms of Medium Characteristics and Bed Packing." Separation Science and Technology 49: 2960-2967.
- Chempro Technovation Pvt. Ltd. (2017). TOP-NOTCH TECHNOLOGY IN PRODUCTION OF OILS AND FATS Retrieved from <http://www.chempro.in/palmoilproperties.htm> [2017, June 25]
- Hwang, S. T. and Kammermeyer, K. (1975). Techniques of Chemistry Vol. VII. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Kosal, H., Pattanachot, W. and Suksaroj, C. (2014). "Treatment of oily wastewater from waste glycerol by acidification and the coalescer process." Desalination and Water Treatment 52: 2996-3003.
- Kumar, R. V., Ghoshal, A. K. and Pugazhenti, G. (2015). "Elaboration of novel tubular ceramic membrane from inexpensive raw materials by extrusion method and its performance in microfiltration of synthetic oily wastewater treatment." Journal of Membrane Science 490: 92-102.
- Lee, A., Elam, J. W. and Darling, S. B. (2016). "Membrane materials for water purification: design, development, and application." Environ. Sci.: Water Res. Technol 2: 17-42.

- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering* (3rd ed.). United States of America: John Wiley & Son, Inc.
- Li, J. and Gu, Y. (2005). "Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds." *Separation and Purification Technology* 42: 1-13.
- Ma, S., Kang, Y. and Cui, S. (2014). "Oil and Water Separation Using a Glass Microfiber Coalescing Bed." *Journal of Dispersion Science and Technology* 35: 103-110.
- Majewska-Nowak, K., Kabsch-Korbutowicz, M. and Winnicki, T. (2008). "Concentration of organic contaminants by ultrafiltration." *Desalination* 221: 358-369.
- Mohammadi, T., Kazemimoghadam, M. and M., S. (2003). "Modeling of membrane fouling and flux decline in reverse osmosis during separation of oil in water emulsions." *Desalination* 157: 369-375.
- Mohammadi, T., Pak, A., Karbassian, M. and Golshan, M. (2004). "Effect of operating conditions on microfiltration of an oil-water emulsion by a kaolin membrane." *Desalination* 168: 201-205.
- Motta, A., Borges, C., Esquerre, K. and Kiperstok, A. (2014). "Oil Produced Water treatment for oil removal by an integration of coalescer bed and microfiltration membrane processes." *Journal of Membrane Science* 469: 371-378.
- Osmonics Inc. (2010). *The Filtration Spectrum* Retrieved from http://www.coolabahwater.com.au/pdf/filtration_spectrum_chart.pdf [2015, July 28]
- Painmanakul, P., Kongkangwarn, K. and Chawaloeshonpiya, N. (2009). "Treatment of Oily Wastewater by Fibrous Coalescer Process: Stage Coalescer and Model Prediction." *International Scholarly and Scientific Research & Innovation* 3(10): 311-316.
- Rachu, S. (2005). *Computer program development for oily wastewater treatment process selection, design and simulation*. Doctoral dissertation, INSA-Toulouse.
- Sincero, A. P. and Sincero, G. A. (2003). *Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater*. London: IWA Publishing, CRC Press.

- Sokolović, R. M. S., Govedarica, D. D. and Sokolović, D. S. (2010). "Separation of oil-in-water emulsion using two coalescers of different geometry." Journal of Hazardous Materials 175: 1001-1006.
- Sokolović, R. M. S., Vulić, T. J. and Sokolović, S. M. (2006). "Effect of Fluid Flow Orientation on the Coalescence of Oil Droplets in Steady-State Bed Coalescers." Ind. Eng. Chem. Res. 45: 3891-3895.
- Türkman, A. and Uslu, O. (1991). "Oil-Water separations Oil recovery and Oily wastewater treatment." New Developments in Industrial Wastewater Treatment 191: 155-174.







ภาคผนวก ก.

ภาคผนวก ก-1 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียเป็นป้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยไม่ใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-1 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอทีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นป้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์

เวลา (นาที)	ความเร็วการไหล (m/h)											
	6.1				11.8				18.9			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	1419	-	350.3	-	1265	-	306.3	-	1368	-	345.7	-
15	1290	9.06	286.3	18.27	1006	20.34	234.0	23.60	1265	7.52	286.0	17.27
30	1058	25.44	232.3	33.69	723	42.77	167.7	45.25	826	39.54	185.0	46.49
45	903	36.26	186.3	46.82	645	49.02	122.7	59.94	697	49.02	140.3	59.42
60	826	41.81	145.7	58.41	516	59.19	109.7	64.19	594	56.64	118.3	65.78
75	774	45.42	131.7	62.40	516	59.19	105.0	65.72	619	54.68	111.0	67.89
90	671	52.83	109.0	68.88	516	59.07	95.1	68.95	516	62.20	100.2	71.02
105	645	54.48	100.3	71.37	516	59.19	88.3	71.17	568	58.39	96.4	72.11
120	645	54.48	92.6	73.57	542	57.11	84.7	72.35	542	60.35	89.5	74.11

ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษากำดับต้นน้ำเสียเป็นป้อนน้ำปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 3 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-2 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของกำบับต้นน้ำเสียเป็นป้อนน้ำปาล์มสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 3 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความเร็วการไหล (m/h)											
	6.1				11.8				18.9			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	1354	-	358.7	-	1169	-	286.7	-	1212	-	305.0	-
15	812	39.96	233.0	35.04	800	31.20	158.0	44.89	848	30.02	169.7	44.36
30	862	36.35	275.7	23.14	862	26.28	165.3	42.34	776	35.91	158.0	48.20
45	763	43.57	220.0	38.67	708	39.32	95.2	66.79	679	43.87	143.7	52.89
60	714	47.17	181.3	49.46	646	44.66	80.8	71.82	558	54.04	104.0	65.90
75	542	59.94	133.7	62.73	646	44.66	92.7	67.67	558	53.92	106.3	65.15
90	468	65.40	120.3	66.46	615	47.01	82.2	71.33	509	57.97	95.1	68.82
105	468	65.40	109.3	69.53	585	50.00	81.9	71.43	533	56.00	87.5	71.31
120	468	65.40	107.0	70.17	585	50.00	82.2	71.33	485	59.93	82.7	72.89

ภาคผนวก ก-3 ผลการศึกษากำดับน้ำเสียเป็นป้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 3 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-3 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอทีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นป้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 5 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความเร็วการไหล (m/h)											
	6.1				11.8				18.9			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	1378	-	354.3	-	1324	-	301.7	-	1285	-	333.0	-
15	837	39.07	248.3	29.92	745	43.33	152.3	49.52	970	24.51	176.3	47.06
30	689	49.81	186.7	47.30	717	45.56	134.3	55.49	813	36.64	141.0	57.66
45	738	46.30	197.0	44.40	662	49.63	95.5	68.35	761	40.69	138.0	58.56
60	689	50.00	140.3	60.40	579	55.93	90.6	69.97	682	46.94	117.3	64.77
75	517	62.41	111.0	68.67	607	53.33	90.3	70.07	630	50.98	114.0	65.77
90	468	65.93	102.3	71.13	552	58.15	88.8	70.57	525	59.07	99.6	70.09
105	468	65.93	97.7	72.42	552	58.15	90.9	69.87	498	61.27	93.2	72.01
120	443	67.78	91.1	74.29	552	58.15	82.1	72.79	498	61.15	77.8	76.64

ภาคผนวก ก-4 ผลการศึกษากำบัดน้ำเสียเป็นน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 10 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-4 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นน้ำมันปาล์มสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 10 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความเร็วการไหล (m/h)											
	6.1				11.8				18.9			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	1305	-	302.3	-	1135	-	278.3	-	1285	-	324.0	-
15	738	43.36	228.3	24.48	645	43.17	155.3	44.20	944	26.47	196.7	39.29
30	468	64.16	136.7	54.78	465	59.05	122.7	55.91	734	42.89	147.7	54.41
45	443	66.01	147.3	51.27	490	56.83	87.0	68.74	656	48.90	126.7	60.90
60	320	75.49	99.5	67.09	387	65.87	84.5	69.64	525	59.19	121.3	62.56
75	295	77.34	95.3	68.48	361	68.10	77.7	72.08	498	61.27	99.5	69.29
90	295	77.34	93.7	69.00	361	68.10	86.4	68.95	498	61.15	90.0	72.22
105	295	77.34	87.8	70.96	361	68.10	82.6	70.32	472	63.24	85.1	73.73
120	271	79.19	82.0	72.87	361	68.10	77.8	72.04	446	65.20	72.0	77.78

ภาคผนวก ก-5 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียเป็นน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แวนอนหนา 3 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-5 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แวนอนหนา 3 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความเร็วการไหล (m/h)											
	6.1				11.8				18.9			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	1329	-	330.7	-	1410	-	343.7	-	1342	-	341.0	-
15	705	46.94	221.3	33.08	868	38.56	184.0	46.46	903	32.68	190.3	44.19
30	597	55.02	145.3	56.06	814	42.27	166.7	51.50	826	38.45	151.7	55.51
45	515	61.27	121.0	63.41	786	44.34	148.7	56.74	748	44.23	143.7	57.86
60	380	71.45	109.7	66.83	678	51.85	138.0	59.85	542	59.59	116.0	65.98
75	380	71.32	102.3	69.07	597	57.73	123.0	64.21	490	63.40	108.3	68.24
90	353	73.53	99.1	70.03	542	61.55	119.0	65.38	439	67.21	98.0	71.26
105	353	73.41	93.4	71.76	542	61.55	104.3	69.65	439	67.32	91.0	73.31
120	353	73.53	88.8	73.15	542	61.44	96.3	71.98	439	67.32	85.7	74.87

ภาคผนวก ก-6 ผลการศึกษากำบัดน้ำเสียเป็นน้ำดื่มส่งเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แวนอนหนา 5 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-6 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอไซด์และความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นเพื่อนำมาปาส์ส่งเคราะห์ที่ใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แวนอนหนา 5 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความเร็วการไหล (m/h)											
	6.1				11.8				18.9			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	1275	-	298.7	-	1419	-	335.7	-	1295	-	329.0	-
15	868	31.94	217.7	27.12	826	41.72	191.7	42.90	1016	21.57	237.3	27.87
30	732	42.50	156.0	47.77	800	43.57	161.3	51.95	737	43.14	160.3	51.28
45	624	50.97	134.7	54.90	645	54.48	150.7	55.11	660	49.02	122.0	62.92
60	515	59.58	107.7	63.94	594	58.19	130.7	61.07	559	56.86	105.0	68.09
75	434	65.97	99.3	66.76	645	54.48	125.7	62.56	559	56.86	90.4	72.52
90	353	72.22	92.7	68.97	568	59.94	114.0	66.04	483	62.75	86.7	73.65
105	325	74.44	87.0	70.87	516	63.55	105.7	68.51	432	66.67	81.0	75.38
120	298	76.53	85.3	71.44	516	63.65	95.0	71.70	432	66.67	78.0	76.29

ภาคผนวก ก-7 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียบนเขื่อนน้ำม้นป่าส้มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แวนอนหนา 10 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหลแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-7 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียบนเขื่อนน้ำม้นป่าส้มสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แวนอนหนา 10 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความเร็วการไหล (m/h)											
	6.1				11.8				18.9			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	1305	-	301.7	-	1346	-	314.7	-	1346	-	300.7	-
15	714	45.21	0.2	99.93	863	35.84	179.7	42.90	1016	24.40	211.7	29.60
30	640	50.87	145.3	51.84	737	45.32	155.3	50.65	737	45.21	145.3	51.68
45	566	56.54	125.7	58.34	660	50.76	129.0	59.01	635	52.72	116.3	61.32
60	418	67.97	107.3	64.43	533	60.35	117.7	62.60	584	56.54	102.3	65.98
75	345	73.64	95.2	68.45	508	62.31	108.0	65.68	533	60.35	84.4	71.93
90	345	73.53	90.2	70.10	483	64.05	98.7	68.64	533	60.35	78.4	73.93
105	345	73.64	87.4	71.03	457	66.01	91.9	70.80	508	62.31	71.9	76.09
120	345	73.53	80.5	73.32	432	67.86	89.3	71.62	508	62.20	69.2	76.99

ภาคผนวก ก-8 ผลการศึกษการบำบัดน้ำเสียเป็นเบื้องต้นน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 10 เซนติเมตร รวมกับแวนอนหนา 10 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะ 30 เซนติเมตร ที่มีความเข้มข้นน้ำเสียแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-8 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นเบื้องต้นน้ำมันปาล์มสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 3 เซนติเมตร รวมกับแวนอนหนา 10 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะ 30 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/L)											
	0.5				1				2			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	853	-	157.6	-	1360	-	327.7	-	1993	-	710.0	-
15	547	35.93	107.7	31.66	747	45.10	158.0	51.79	1049	47.22	253.7	64.27
30	507	40.55	99.4	36.93	453	66.67	114.7	65.00	1049	47.22	230.3	67.56
45	413	51.52	76.5	51.46	453	66.67	105.3	67.87	839	57.91	192.3	72.92
60	360	57.79	62.9	60.09	453	66.67	88.9	72.87	734	63.25	155.7	78.07
75	347	59.38	60.5	61.61	427	68.63	81.0	75.28	682	65.60	135.7	80.89
90	333	60.97	53.3	66.18	400	70.59	67.9	79.28	577	70.94	127.7	82.01

ภาคผนวก ก-9 ผลการศึกษการบำบัดน้ำเสียเป็นอนำมัลมสังเคราะห์ โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 3 เซนติเมตร ร่วมกับแวนอนหนา 10 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะ 60 เซนติเมตร ที่มีความเข้มข้นน้ำเสียแตกต่างกัน

ตารางที่ ก-9 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอทีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นอนำมัลมสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 3 เซนติเมตร ร่วมกับแวนอนหนา 10 เซนติเมตร ที่ความเร็วการไหล 6.1 เมตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะ 60 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/L)														
	0.5						1						2		
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)			
0	827	-	157.6	-	1333	-	327.7	-	2098	-	710.0	-			
15	467	43.49	92.7	41.18	533	59.93	120.3	63.29	839	59.89	218.0	69.30			
30	480	41.90	88.2	44.04	427	67.89	111.7	65.91	787	62.45	211.0	70.28			
45	373	54.84	69.5	55.90	373	71.94	103.0	68.57	577	72.34	203.3	71.37			
60	360	56.43	61.6	60.91	347	73.90	93.0	71.62	577	72.53	181.0	74.51			
75	333	59.60	59.6	62.18	320	75.98	82.2	74.92	525	74.91	132.0	81.41			
90	333	59.68	52.8	66.50	293	77.94	66.1	79.83	420	80.04	120.0	83.10			

ภาคผนวก ก-10 ผลการศึกษากำจัดน้ำเสียเป็นเบื่อน้ำมีปาล์มสังเคราะห์ โดยใช้เมมเบรน ที่มีความเข้มข้นน้ำเสียแตกต่างกัน
 ตารางที่ ก-10 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นเบื่อน้ำมีปาล์มสังเคราะห์ที่ใช้เมมเบรน

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/L)											
	0.5				1				2			
	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
0	927	-	167.7	-	1575	-	378.3	-	2050	-	703.7	-
1	356	61.67	2.7	98.39	356	77.42	2.7	99.29	550	73.08	2.9	99.59
10	254	72.61	1.3	99.22	254	83.79	2.5	99.34	400	80.40	2.8	99.60
20	241	73.94	2.2	98.69	254	83.94	2.7	99.29	350	82.78	3.3	99.53
30	241	73.94	2.7	98.39	254	83.94	2.1	99.44	350	82.97	3.9	99.45
40	241	73.94	2.1	98.75	254	83.79	2.7	99.29	350	82.78	3.7	99.47
41	292	68.44	3.4	97.97	330	78.94	2.6	99.31	400	80.40	3.5	99.50
50	229	75.33	2.9	98.27	254	83.79	2.2	99.42	350	82.97	3.0	99.57
60	229	75.33	2.7	98.39	254	83.79	1.8	99.52	350	82.97	3.3	99.53

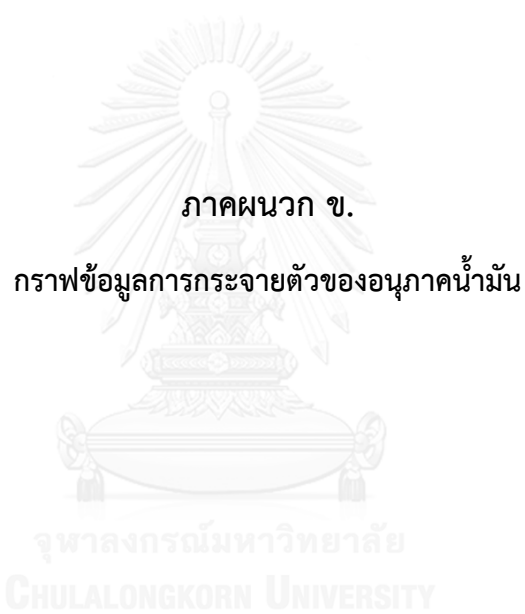
ภาคผนวก ก-11 ผลการศึกษากการบำบัดน้ำเสียเป็นเออน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้กระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน

ตารางที่ ก-11 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของการบำบัดน้ำเสียเป็นเออน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ที่ใช้กระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน

ชนิดน้ำเสีย	เวลา (นาที)	กระบวนการ	การกำจัดซีโอดี		การกำจัดความขุ่น	
			COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)
ชนิดน้ำเสียเป็นเออน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร	0	โคอะเลสเซอร์	1575	-	344.3	-
	15		738	53.10	189.0	45.11
	30		615	60.97	127.7	62.91
	45		517	67.17	115.3	66.51
	60		418	73.38	88.8	74.21
	61		320	79.73	3.8	98.90
เมมเบรน	75	เมมเบรน	271	82.76	2.5	99.27
	90		246	84.34	2.4	99.30
	91		246	84.34	2.9	99.16
	105		246	84.34	2.7	99.22
	120		246	84.42	2.4	99.30

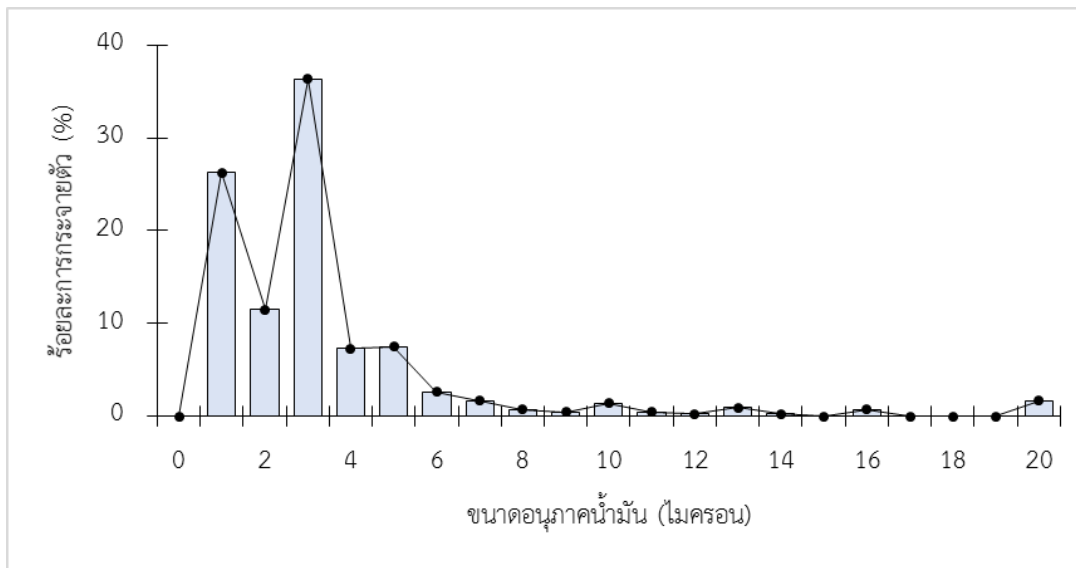
ภาคผนวก ก-12 ผลการศึกษากำบัดน้ำเสียแบบบ่อน้ำมันจริง โดยใช้กระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน
 ตารางที่ ก-12 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นของน้ำมันจริงโดยใช้กระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และเมมเบรน

ชนิดน้ำเสีย	เวลา (นาที)	กระบวนการ	การกำจัดซีโอดี		การกำจัดความขุ่น		การกำจัดของแข็งแขวนลอย	
			COD (mg/L)	COD Eff (%)	Turbidity (NTU)	Turbid Eff (%)	SS (mg/L)	SS Eff (%)
น้ำเสียบ่อน้ำมันจริงจาก โรงอาหาร	0		38646	-	7643.0	-	2815	-
	15	โคอะเลสเซอร์	3643	90.57	461.0	93.97	670	76.20
	30		3151	91.85	372.7	95.12	625	77.80
	45		2978	92.29	338.7	95.57	505	82.06
	60		2905	92.48	322.7	95.78	383	86.41
	61		1502	96.11	4.3	99.94	5	99.82
65	1280		96.69	2.3	99.97	10	99.64	
เมมเบรน	66		1280	96.69	2.4	99.97	5	99.82
	70		1280	96.69	1.9	99.98	5	99.82



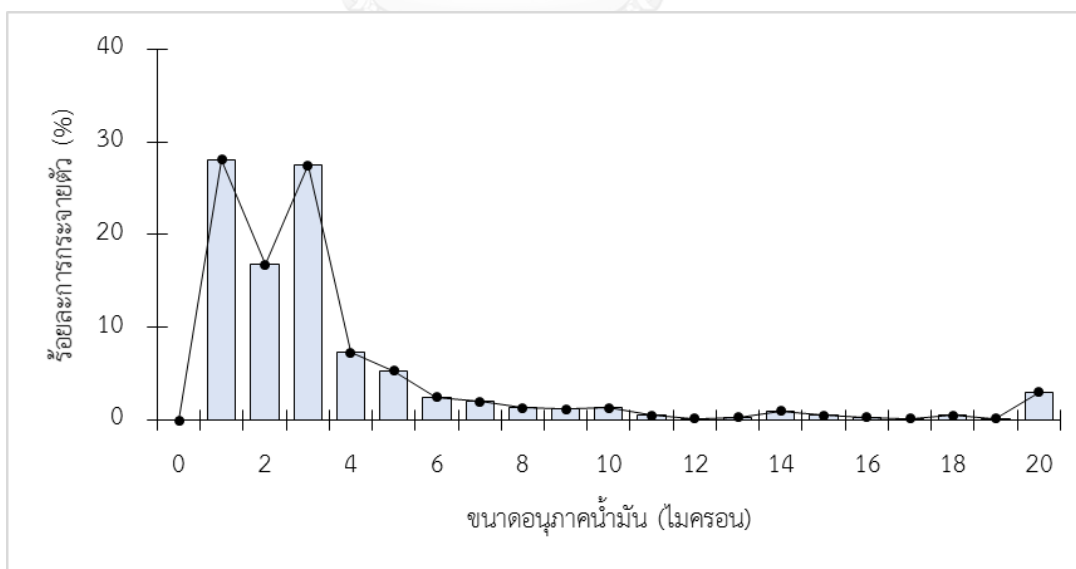
ภาคผนวก ข.

ภาคผนวก ข-1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของน้ำมันในน้ำเสียเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร



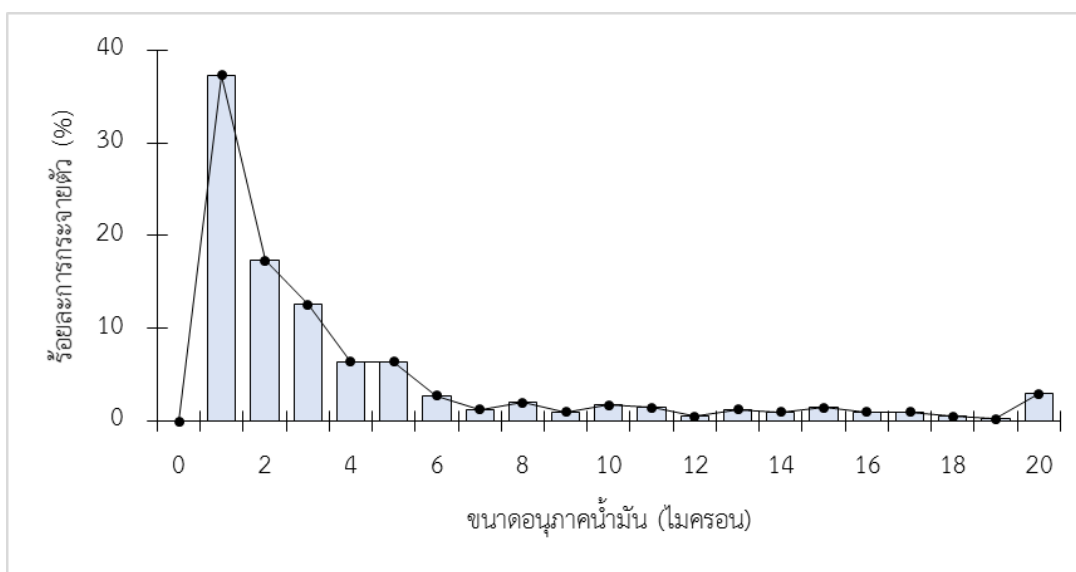
รูปที่ ข-1 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร

ภาคผนวก ข-2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของน้ำมันในน้ำเสียเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร



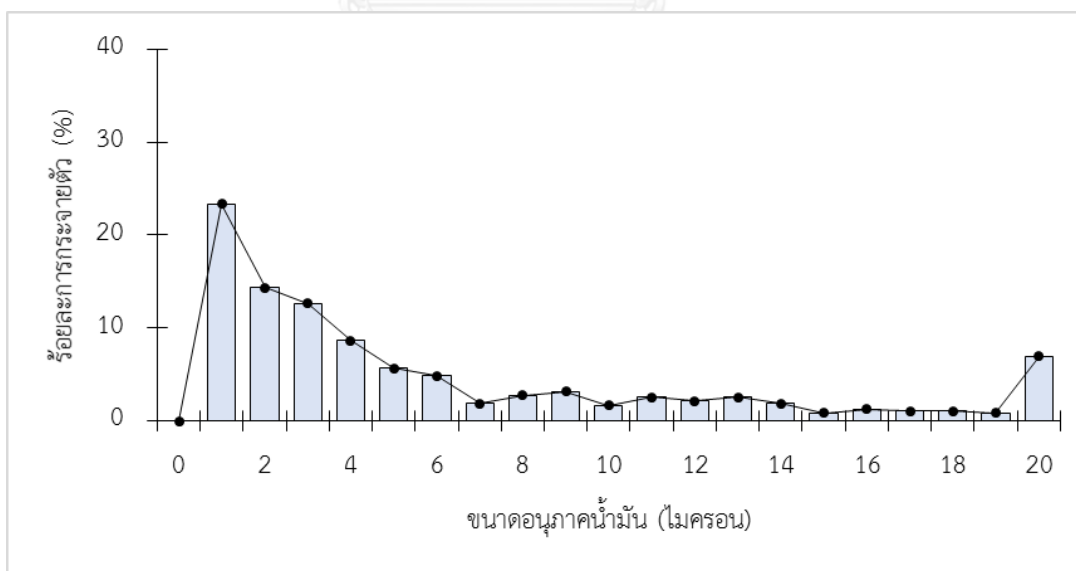
รูปที่ ข-2 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

ภาคผนวก ข-3 ผลการศึกษาการกระจายตัวของน้ำมันในน้ำเสียเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร



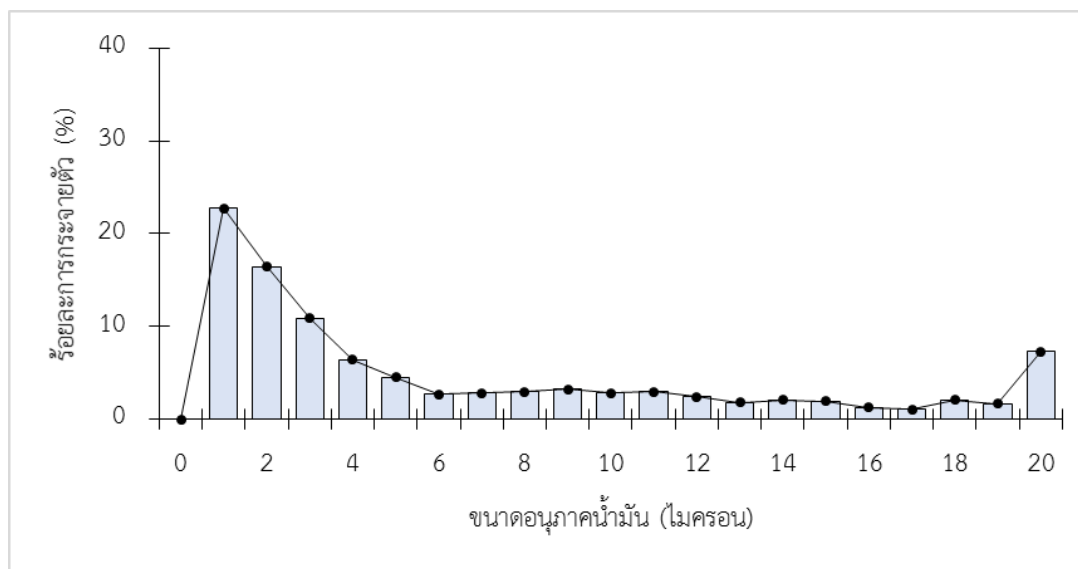
รูปที่ ข-3 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร

ภาคผนวก ข-4 ผลการศึกษาการกระจายตัวของน้ำมันในน้ำเสียความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เมื่อผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 3 เซนติเมตร



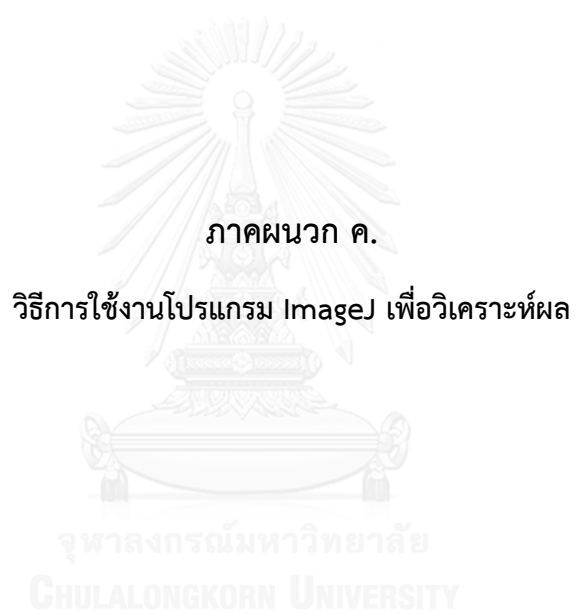
รูปที่ ข-4 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันเมื่อผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 3 เซนติเมตร

ภาคผนวก ข-5 ผลการศึกษาการกระจายตัวของน้ำมันในน้ำเสียความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เมื่อผ่าน
ตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 10 เซนติเมตร



รูปที่ ข-5 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันเมื่อผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์แนวตั้งหนา 10 เซนติเมตร

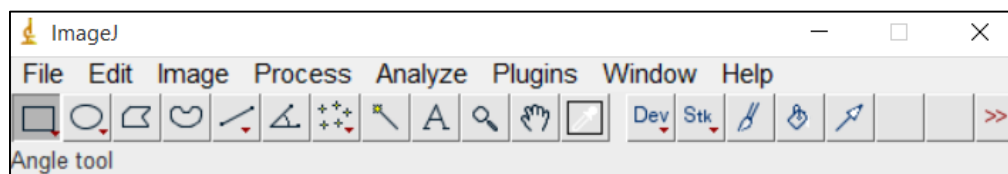




ภาคผนวก ค.

ภาคผนวก ค-1 วิธีการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคน้ำมัน



1. เปิดโปรแกรม ImageJ (ดังรูปที่ ค-1.1) จากนั้น กด File > Open... เพื่อเปิดภาพที่ต้องการวิเคราะห์ (ดังรูปที่ ค-1.2)

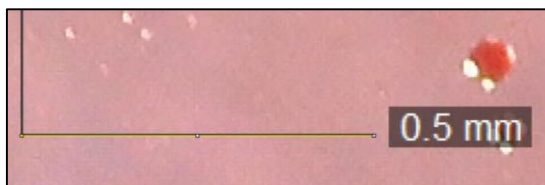


รูปที่ ค-1.1 โปรแกรม Image J

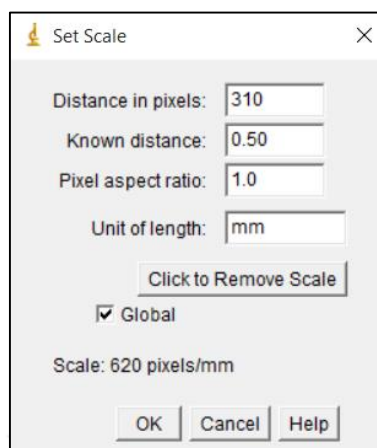


รูปที่ ค-1.2 ตัวอย่างภาพถ่ายอนุภาคน้ำมันที่ต้องการวิเคราะห์


2. ทำการ Set scale โดยคลิกที่เครื่องมือ Magnifying glass  เพื่อขยายภาพ จากนั้นคลิกที่เครื่องมือ Straight line selection  แล้วลากทับเส้น 0.5 mm (ดังรูปที่ ค-1.3) เพื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนขนาดของภาพ จากนั้นกด Analyze > Set Scale... ใส่ค่าในช่อง Known distance: เป็น 0.50 และในช่อง Unit of length: เป็น mm คลิกเลือกที่ Global แล้วกด OK (ดังรูปที่ ค-1.4)

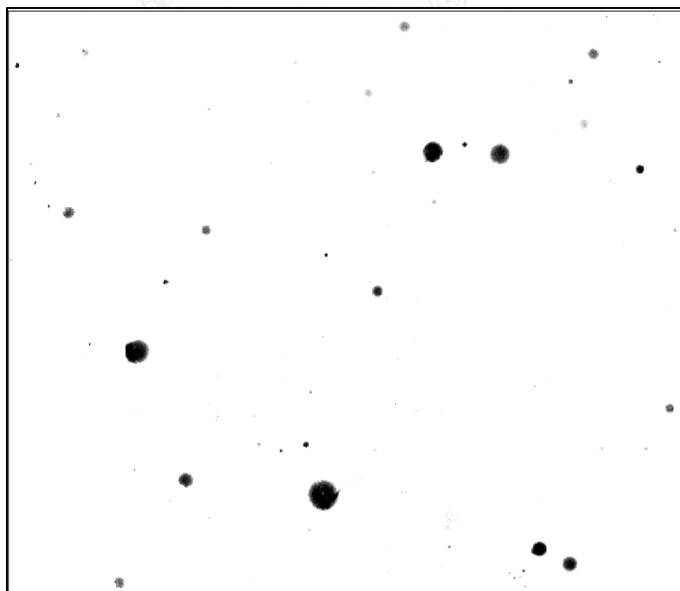


รูปที่ ค-1.3 การคลิกลากเส้นเพื่อ Set scale



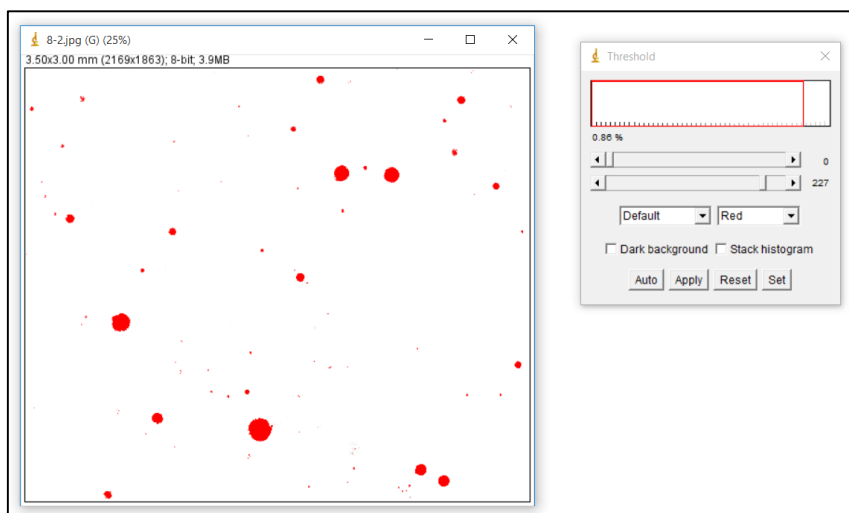
รูปที่ ค-1.4 การตั้งค่าเพื่อ Set scale

3. คลิกเครื่องมือ Rectangular selection  เพื่อเลือกส่วนของภาพเฉพาะที่ต้องการ จากนั้นกด Image > Crop จากนั้นเลือกชนิดของภาพ โดยไปที่ Image > Type > 8-bit แล้วปรับความคมชัดโดยไปที่ Image > Adjust > Brightness/Contrast... ดังแสดงในรูปที่ ค-1.5



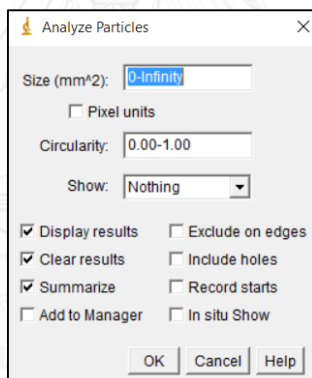
รูปที่ ค-1.5 ภาพที่ผ่านการปรับความคมชัดแล้ว

4. เลือกพื้นที่อนุภาคน้ำมันที่ต้องการวัด โดยไปที่ Image > Adjust > Threshold... แล้วปรับค่า Threshold จนครอบคลุมอนุภาคน้ำมันที่ต้องการวิเคราะห์ทั้งหมด จะได้ดังรูปที่ ค-1.6



รูปที่ ค-1.6 ภาพที่ผ่านการเลือกพื้นที่แล้ว

5. ทำการวิเคราะห์โดยกดที่ Analyze > Analyze Particle... แล้วตั้งค่าตามรูปที่ ค-1.7 จากนั้นกด OK จะได้ข้อมูลขนาดของพื้นที่ ตามรูปที่ ค-1.8 แล้วนำพื้นที่ที่ได้ไปคำนวณหาขนาดอนุภาค โดยใช้สูตร $Area = \pi r^2$



รูปที่ ค-1.7 การตั้งค่าเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล

File	Area	Mean	Min	Max
1	2.557E-5	82.20	0	199
2	2.557E-6	199.00	199	199
3	5.115E-6	113.50	28	199
4	2.557E-6	170.00	170	170
5	1.023E-5	0.00	0	0
6	1.023E-5	163.25	113	199
7	2.557E-6	113.00	113	113
8	1.023E-5	0.00	0	0
9	2.557E-6	199.00	199	199
10	2.557E-6	170.00	170	170
11	3.836E-5	56.67	0	199
12	1.790E-5	125.71	0	199
13	1.023E-5	0.00	0	0

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
8-2.jpg	423	0.115	2.719E-4	1.021	131.546

รูปที่ ค-1.8 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคน้ำมัน

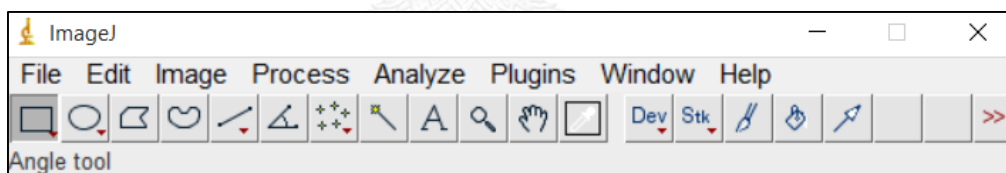
ภาคผนวก ค-2 วิธีการวิเคราะห์ RTD โดยการวัดความเข้มแสง

1. ใช้โปรแกรม VirtualDub + PluginFFMpeg แปลงไฟล์วิดีโอที่ถ่ายมาได้ให้เป็น AVI แบบ uncompressed ดังรูปที่ ค-2.1

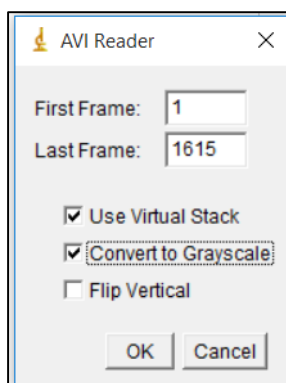


รูปที่ ค-2.1 โปรแกรม VirtualDub


2. เปิดโปรแกรม ImageJ (ดังรูปที่ ค-2.2) จากนั้น กด File > Import > AVI... เลือกค่าตามรูปที่ ค-2.3 แล้วกด OK เพื่อเปิดวิดีโอที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ ค-2.2 โปรแกรม Image J



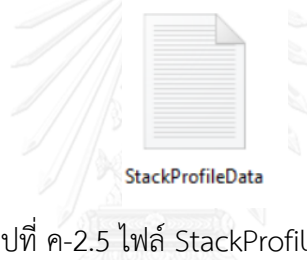
รูปที่ ค-2.3 การตั้งค่าเพื่อเปิดไฟล์วิดีโอ

- 3) คลิกเครื่องมือ Rectangular selection  เพื่อเลือกส่วนของภาพที่ต้องการวิเคราะห์ ดังรูปที่ ค-2.4



รูปที่ ค-2.4 การเลือกตำแหน่งที่จะวิเคราะห์

- 4) วิเคราะห์ข้อมูลโดยไปที่ Plugins > Macro > Run... เลือกไฟล์ StackProfileData.txt ดังรูปที่ ค-2.5 กด Open โปรแกรมจะเริ่มทำงานและได้ผลข้อมูล ดังรูปที่ ค-2.6



รูปที่ ค-2.5 ไฟล์ StackProfileData.txt

Results									
File	Edit	Font	Results						
x	1 (0.03 s)	2 (0.07 s)	3 (0.10 s)	4 (0.13 s)	5 (0.17 s)	6 (0.20 s)	7 (0.23 s)	8 (0.26 s)	9 (0.29 s)
1	0	178.35	179.62	179.78	180	179.98	180.18	179.98	179.98
2	1	178.35	179.65	179.82	180.05	179.90	180.08	179.85	179.85
3	2	177.92	179.45	179.55	179.82	179.72	179.88	179.65	179.65
4	3	177.88	179.38	179.48	179.78	179.70	179.85	179.48	179.48
5	4	177.40	179.05	179.35	179.55	179.42	179.38	178.98	178.98
6	5	177.02	178.75	179.05	179.25	179.10	179.20	178.78	178.78
7	6	176.60	178.40	178.80	179.05	178.90	178.95	178.52	178.52
8	7	176.15	177.95	178.38	178.70	178.38	178.42	177.98	177.98
9	8	174.55	177.10	177.40	177.68	177.68	177.52	177.52	177.52
10	9	174.42	176.10	176.75	176.98	176.75	176.82	176.82	176.82
11	10	174.20	175.98	176.68	176.92	176.48	176.48	176.48	176.48
12	11	174.45	175.82	176.72	176.90	176.38	176.62	176.70	176.70
13	12	175.98	176.38	177.22	177.30	177.08	177.58	177.28	177.28

รูปที่ ค-2.6 ผลการวิเคราะห์ความเข้มสี

คำสั่งการทำงานในไฟล์ StackProfileData.txt

```
// StackProfileData
```

```
// This ImageJ macro gets the profile of all slices in a stack
```

```
// and writes the data to the Results table, one column per slice.
```

```
// Version 1.0, 24-Sep-2010 Michael Schmid
```

```
macro
```

```

"Stack profile Data" {
    if (!(selectionType()==0 || selectionType==5 || selectionType==6))
        exit("Line or Rectangle Selection Required");
    setBatchMode(true);
    run("Plot Profile");
    Plot.getValues(x, y);
    run("Clear Results");
    for (i=0; i<x.length; i++)
        setResult("x", i, x[i]);
    close();
    n = nSlices;
    for (slice=1; slice<=n; slice++) {
        showProgress(slice, n);
        setSlice(slice);
        profile = getProfile();
        sliceLabel = toString(slice);
        sliceData = split(getMetadata("Label"), "\n");
        if (sliceData.length>0) {
            line0 = sliceData[0];
            if (lengthOf(sliceLabel) > 0)
                sliceLabel = sliceLabel+ " (" + line0 + ")";
        }
        for (i=0; i<profile.length; i++)
            setResult(sliceLabel, i, profile[i]);
    }
    setBatchMode(false);
    updateResults;
}

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชินวัฒน์ ชัยกุล เกิดเมื่อวันที่ 27 เมษายน พ.ศ.2531 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2557

