

กระบวนการร่วมของโคอะเลสเซอร์ไฟฟ้าเคมี และอัลตราฟิลเตรชันสำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมัน



นางสาวสุรีย์พร เบญจประดิษฐ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

COMBINED PROCESSES OF COALESCER, ELECTROCHEMISTRY AND  
ULTRAFILTRATION FOR TREATMENT OF OILY WASTEWATER

Miss Sureeporn Benjapradit



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กระบวนการร่วมของโคอะเลสเซอร์ไฟฟ้าเคมี และอัลตรา  
ฟิลเตรชันสำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

โดย

นางสาวสุรีย์พร เบญจประดิษฐ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชอาณาจักรกิจ)

.....กรรมการ

(ดร.ปวิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.มรุพัชร จำนงค์วงศ์)

สุรียพร เบญจประดิษฐ์ : กระบวนการร่วมของโคอะเลสเซอร์ไฟฟ้าเคมี และอัลตราฟิลเตรชันสำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน. (COMBINED PROCESSES OF COALESCER, ELECTROCHEMISTRY AND ULTRAFILTRATION FOR TREATMENT OF OILY WASTEWATER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 131 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีและปริมาณตะกอนเคมีที่เกิดขึ้นจากการกระบวนการบำบัด โดยทำการศึกษากลไกของลักษณะและความสูงของชั้นตัวกลาง อัตราเร็วการไหลของน้ำเสีย ชนิดขั้วไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม คือ ใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์รูปทรงกระบอกกลวง โดยวางแบบสุ่มจนมีความสูงของชั้นตัวกลาง 10 เซนติเมตรอัตราเร็วการไหลของน้ำเสีย 2 เซนติเมตรต่อวินาที ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม โดยมีระยะห่าง 3 เซนติเมตร และใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และเมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันพบว่ากระบวนการร่วมให้ประสิทธิภาพบำบัด 99% เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร และเมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเติมแคลเซียม 6 กรัมต่อลิตรจะทำให้เมมเบรนอุดตันเร็วและค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจะสูงกว่าการเติมแคลเซียมคลอไรด์ต่ำๆ เนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์สามารถทำลายเสถียรภาพและทำให้อนุภาคน้ำมันเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้จำนวนมาก โดยข้อดีของการเดินระบบด้วยกระบวนการร่วมคือ กระบวนการร่วมให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูง โดยมีต้นทุนในการเดินระบบและใช้พลังงานต่ำ ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่เลือกใช้หาซื้อได้ง่ายและราคาถูก กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบต่ำ ดังนั้นอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น และไม่ก่อให้เกิดตะกอนเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5470433321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: COALESCER / ELECTROSTATIC / OILY WASTEWATER /  
ULTRAFILTRATION

SUREEPORN BENJAPRADIT: COMBINED PROCESSES OF COALESCER,  
ELECTROCHEMISTRY AND ULTRAFILTRATION FOR TREATMENT OF OILY  
WASTEWATER. ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 131  
pp.

The Objective of this research was to study the treatment of cutting oily-wastewater by in order to reduce the problem of chemical usage and sludge production from treatment process. The effect of shape and depth of media coalescer, flow velocity of wastewater, electrode type and current density. The result showed that the highest removal efficiency of 99% was achieved at the optimal condition, which was the usage media of coalescer is turbula shape at the bed length of 10 cm with flow velocity of 2 cm/s and usage of 2 aluminium electrodes with 3 cm in distance between plates,with the current density of 10 A/m<sup>2</sup> and dosage of CaCl<sub>2</sub> 2 g/l and CaCl<sub>2</sub> 6 g/l. Moreover, usage of CaCl<sub>2</sub> 6 g/l make membrane fouling was faster than CaCl<sub>2</sub> 2 g/l and the turbidity of drain water was higher than CaCl<sub>2</sub> 2 g/l. Because high CaCl<sub>2</sub> dosage can destabilize and make oil droplet size was larger. The advantages in combined process are highest removal efficiency, low operation cost less power consumption which could result in longer lifetime of electrodes and less sludge production.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Environmental  
Engineering

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Field of Study: Environmental  
Engineering

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และ ดร.มรุพัชร์ จำนงศ์วงศ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ดิชม แก่ไขในงานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งานห้องปฏิบัติการและเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 ประเภทของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	5
2.2 อิมัลชัน (Emulsion).....	7
2.3 น้ำมันตัด (Cutting oil) .....	8
2.4 กระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย.....	10
2.5 อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Coalescer) (Aurette, 1985) .....	13
2.6 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี .....	20
2.7 ทฤษฎีดีแอลวีโอ (DLVO theory).....	23
2.8 กระบวนการเมมเบรน (Membrane process) .....	27
2.9 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	28
2.10 แนวคิดของการพัฒนากระบวนการร่วม.....	29
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	46
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	46
3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลองในงานวิจัย.....	51
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	51
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	52
3.4 สรุปรูปแบบที่ทำการศึกษา.....	61

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ .....	62
4.1 การศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด .....	62
4.2 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันโดยใช้สารเคมีด้วยวิธีจาร์เทสต์ .....	66
4.3 การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ .....	71
4.4 การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โคอะเลสเซอร์ .....	84
4.5 การศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยเมมเบรน .....	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	102
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	102
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	106
รายการอ้างอิง .....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	131



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1	การจำแนกอิมัลชันตามขนาดของสารกระจาย .....8
ตารางที่ 2-2	ข้อดีและข้อเสียของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....19
ตารางที่ 2-3	กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าเคมี.....21
ตารางที่ 3-1	สมบัติของน้ำมันตัด รุ่น 3810150 บริษัท BP-Castrol (ประเทศไทย จำกัด)..... 50
ตารางที่ 3-2	ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด..... 53
ตารางที่ 3-3	ตัวแปรในการศึกษาปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมต่อการทำลายเสถียรภาพ น้ำมัน.....54
ตารางที่ 3-4	ตัวแปรในการศึกษาสมบัติของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน .....55
ตารางที่ 3-5	ตัวแปรในการศึกษาสภาวะเหมาะสมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์.....56
ตารางที่ 3-6	ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วมระหว่าง กระบวนการทาเคมีกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์.....57
ตารางที่ 3-7	ตัวแปรในการศึกษาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม .....59
ตารางที่ 3-8	ตัวแปรในการศึกษาหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม .....60
ตารางที่ 3-9	ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม.....61
ตารางที่ 3-10	สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์.....61
ตารางที่ 4-1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์.....63
ตารางที่ 4-2	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยวิธีการแยกด้วยแรงโน้มถ่วงในเวลา 120 นาที.....65
ตารางที่ 4-3	ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียหลังจากเติม $CaCl_2$ 120 นาที .....68
ตารางที่ 4-4	สมบัติของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ .....72
ตารางที่ 4-5	ขนาดของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ของการทดลองที่ 4.3.2 .....73
ตารางที่ 4-6	พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในการทดลองที่ 4.3.2 .....74
ตารางที่ 4-7	ขนาดของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ของการทดลองที่ 4.3.3 .....76
ตารางที่ 4-8	พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในการทดลองที่ 4.3.3 .....77
ตารางที่ 4-9	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....78
ตารางที่ 4-10	ขนาดของอนุภาคน้ำมันเมื่อผ่านกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีและ กระบวนการโคอะเลสเซอร์.....78
ตารางที่ 4-11	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่เงื่อนไขการเดินระบบที่ แตกต่างกัน .....80
ตารางที่ 4-12	ค่าอัตราน้ำล้นผิวของถังตะกอนสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ บำบัดขั้นต่ำ 60% .....83
ตารางที่ 4-13	พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในการทดลองที่ 4.4.1 .....85
ตารางที่ 4-14	ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม .....85

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4-15 ปฏิบัติการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์.....	88
ตารางที่ 4-16 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในการทดลองที่ 4.4.2 .....	90
ตารางที่ 4-17 ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ.....	92
ตารางที่ 4-18 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ด้วย ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม.....	93
ตารางที่ 4-19 ขนาดและความเร็วลอยตัวของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะ เลสเซอร์เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร .....	94
ตารางที่ 4-20 ขนาดและความเร็วลอยตัวของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะ เลสเซอร์เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร .....	94
ตารางที่ 4-21 ค่าอัตราน้ำล้นผิวของถังตกตะกอนในกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์.....	95
ตารางที่ 4-22 ลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของกระบวนการ โคอะเลสเซอร์.....	95
ตารางที่ 4-23 ลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของกระบวนการ อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร .....	96
ตารางที่ 4-24 ลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของกระบวนการ อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร .....	96
ตารางที่ 4-25 ประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมที่มีเงื่อนไขในการเดินระบบแตกต่างกัน.....	97
ตารางที่ 4-26 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการร่วมและระยะเวลาในการกรองผ่าน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	100
ตารางที่ 4-27 ตัวแปรการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการร่วม ระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ และ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ที่ความเข้มข้นน้ำเสีย 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตร .....	101
ตารางที่ 5-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการอิเล็กโทร สตาติกโคอะเลสเซอร์.....	104
ตารางที่ 5-2 เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคน้ำมัน ความเร็วลอยตัว และค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์.....	104
ตารางที่ 5-3 เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคน้ำมัน ความเร็วลอยตัว และค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์.....	104
ตารางที่ 5-4 สรุปค่าพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	106

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 การผลึกกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว.....	5
ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ.....	6
ภาพที่ 2-3 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม.....	6
ภาพที่ 2-4 ลักษณะของอิมัลชัน.....	8
ภาพที่ 2-5 น้ำมันตัด ( Cutting Oil ).....	9
ภาพที่ 2-6 อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	14
ภาพที่ 2-7 การส่งถ่ายน้ำมันเข้าสู่สัมผัสผิวตัวกลาง.....	15
ภาพที่ 2-8 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี.....	20
ภาพที่ 2-9 ประเภทของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า.....	20
ภาพที่ 2-10 พลังงานที่ขวางกั้น (Height of potential energy barrier).....	22
ภาพที่ 2-11 ความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของเมมเบรนแต่ละชนิด.....	27
ภาพที่ 2-12 แนวคิดกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์กับ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	29
ภาพที่ 2-13 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ซีต้าของอนุภาคน้ำมันกับค่าพีเอช.....	31
ภาพที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมตามทฤษฎี DLVO ผลของHydrophobic interaction กับ และ ผลรวมของพลังงานตามทฤษฎี DLVO กับ Hydrophobic interaction ที่ระยะห่างระหว่างหยदन้ำมันแตกต่างกัน.....	32
ภาพที่ 2-15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์กับความเข้มข้นของน้ำมัน.....	33
ภาพที่ 2-16 การรวมตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความยาวของชั้นตัวกลางต่างๆ.....	34
ภาพที่ 2-17 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	35
ภาพที่ 2-18 เวลาที่ใช้ทำลายเสถียรภาพอิมัลชันเมื่อผ่านสนามไฟฟ้า.....	36
ภาพที่ 2-19 การทำลายเสถียรภาพด้วยไฟฟ้า.....	37
ภาพที่ 2-20 กระแสไฟฟ้ากับการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชัน.....	38
ภาพที่ 2-21 ศักย์ไฟฟ้ากับการเคลื่อนที่ของประจุที่ผิวอนุภาคน้ำมัน.....	38
ภาพที่ 2-22 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์.....	39

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-23 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	40
ภาพที่ 2-24 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์กับขนาดของอนุภาค 100 และ 300 นาโนเมตร ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	41
ภาพที่ 2-25 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์ กับความเข้มข้นของมลสาร.....	41
ภาพที่ 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์กับความดันที่ในการกรอง.....	42
ภาพที่ 2-27 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	43
ภาพที่ 2-28 ฟลักซ์ที่ลดลงตามเวลาและแรงดันทานการเกิดการอุดตัน เมื่อเดินระบบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน.....	43
ภาพที่ 3-1 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โครสตาทิกโคอะเลสเซอร์ร่วมกับ อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	46
ภาพที่ 3-2 ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ลักษณะ (ก) ทรงกลม (ข) เส้นใย (ค) ทรงกระบอกกลวง.....	46
ภาพที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์สำหรับบรรจุตัวกลางโคอะเลสเซอร์.....	47
ภาพที่ 3-4 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	48
ภาพที่ 3-5 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	49
ภาพที่ 3-6 แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์.....	53
ภาพที่ 3-7 แผนผังการศึกษาปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมต่อการทำลายเสถียรภาพน้ำมัน.....	54
ภาพที่ 3-8 แผนผังการศึกษาสภาวะเหมาะสมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์.....	56
ภาพที่ 3-9 แผนผังศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วมระหว่าง กระบวนการทางเคมี กับกระบวนการโคอะเลสเซอร์.....	57
ภาพที่ 3-10 แผนผังการหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	58
ภาพที่ 3-11 แผนผังการหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	59
ภาพที่ 3-12 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม.....	60
ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น.....	63
ภาพที่ 4-2 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น (ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1.0 กรัมต่อลิตร (ค) 2.0 กรัมต่อลิตร.....	64
ภาพที่ 4-3 ลักษณะการกระจายตัวของประจุบนอนุภาคน้ำมัน.....	65
ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยใช้สารเคมีด้วยวิธีจาร์เทสต์.....	70
ภาพที่ 4-5 แรงดึงผิวระหว่างน้ำ น้ำมันและตัวกลาง .....	71
ภาพที่ 4-6 ภาพจำลองการเดินระบบของกระบวนการโคอะเลสเซอร์สำหรับการทดลองที่ 4.3.2.....	73
ภาพที่ 4-7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์โดยใช้ตัวกลางที่ มีลักษณะ (ก) ทรงกลม (ข) เส้นใย (ค) ทรงกระบอกกลวง.....	75

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 4-8	เส้นทางการไหลของน้ำเสียผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่มีลักษณะตัวกลางแบบ (ก) ทรงกลม (ข) เส้นใย (ค) ทรงกระบอกกลวง.....	76
ภาพที่ 4-9	ภาพจำลองการเดินระบบของกระบวนการร่วมในการทดลองที่ 4.3.3.....	77
ภาพที่ 4-10	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน ของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร.....	79
ภาพที่ 4-11	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน ของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร.....	79
ภาพที่ 4-12	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน ของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 2.0 กรัมต่อลิตร.....	79
ภาพที่ 4-13	อัตราการลดลงของความขุ่นในถังตกตะกอนเมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์ (ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1.0 กรัมต่อลิตร (ค) 2.0 กรัมต่อลิตร.....	82
ภาพที่ 4-14	ภาพแผ่นช่วยตกตะกอน.....	84
ภาพที่ 4-15	ถังปฏิกริยาในกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์สำหรับ.....	84
ภาพที่ 4-16	กลไกของกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกคูเลชัน (Electrocoagulation).....	86
ภาพที่ 4-17	Induce-Induce Dipol.....	87
ภาพที่ 4-18	กลไกของกระบวนการอิเล็กโทรโคอะเลสเซนซ์ (Electrocoalescence).....	87
ภาพที่ 4-19	ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (ก) ก่อน และ (ข) หลัง ใช้งานในกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	87
ภาพที่ 4-20	ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง ใช้งานในกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	88
ภาพที่ 4-21	ภาพของกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์โดยใช้ขั้วแกรไฟต์.....	89
ภาพที่ 4-22	อัตราการลดความขุ่นของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ที่ ความเข้มข้นของน้ำเสีย (ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1 กรัมต่อลิตร และ (ค) 2 กรัมต่อลิตร.....	91
ภาพที่ 4-23	อุปกรณ์ที่ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	98
ภาพที่ 4-24	อัตราการลดความขุ่นของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการ โคอะเลสเซอร์ กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการอัลตรา ฟิลเตรชันของ ฆ่าเสียปนเปื้อนไขมันตัดที่มีความเข้มข้น (ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1.0 กรัมต่อลิตร และ (ค) 2.0 กรัมต่อลิตร.....	99

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำมันเป็นวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการผลิตทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวัน ดังนั้นในชุมชนเมืองและภาคอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จึงเกิดปัญหาน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันค่อนข้างมาก เนื่องจากมีอัตราการใช้น้ำมันจากการประกอบกิจกรรมต่างค่อนข้างสูง

เมื่อน้ำมันกระจายตัวอยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งมักมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Negative charge) และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) นอกจากนี้จะเกิดแรงกระทำต่ออนุภาคน้ำมัน 4 แรงคือ 1. น้ำหนักของอนุภาคน้ำมัน (Gravity force) 2. แรงดึงดูดระหว่างมวลของอนุภาคน้ำมัน (Van der waals force) 3. แรงผลักระหว่างไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ระหว่างอนุภาคน้ำมัน และ 4. แรงลอยตัว (Buoyancy force) ของอนุภาคน้ำมัน (Boyson และคณะ, 2007) แรงเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อนุภาคน้ำมันมีเสถียรภาพสูง และแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำจึงทำได้ยากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อหยดน้ำมันมีขนาดเล็ก

น้ำมันตัด (Cutting oil) เป็นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตจะนำน้ำมันตัดมาใช้ในการผลิตชิ้นงาน เนื่องจากสามารถใช้ความเร็วสูงในการตัดกลึงโลหะและมีราคาต่อหน่วยต่ำ ในการใช้งานจะนำน้ำมันตัดผสมกับน้ำเกิดเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water Emulsion) ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก และมีเสถียรภาพสูง ยกต่อการแยกด้วยกระบวนการทางกายภาพทั่วไป (Rosen, 1989) นอกจากนี้ในน้ำมันตัดยังมีสารเคมีที่ก่อให้เกิดอันตราย ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันแร่ สารอิมัลซิไฟเออร์ สารป้องกันการกัดกร่อน สารต้านทาน การเปลี่ยนแปลงกรด-เบส สารป้องกันการเกิดฟอง และสารป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เป็นต้น (Anderson และคณะ, 2003)

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจัดเป็นอิมัลชันที่มีเสถียรภาพสูง จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการและอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการแยกอิมัลชันนี้ออกจากน้ำเสีย โดยทั่วไปการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียมักใช้วิธีการทางกายภาพ และนิยมใช้วิธีการทางกายภาพนี้เป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะส่งน้ำเสียไปดำเนินการบำบัดทางชีวภาพต่อไป เนื่องจากการบำบัดด้วยวิธีการทางกายภาพเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ใช้เวลาน้อยและมีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ จากงานวิจัยที่ผ่านมา การบำบัดน้ำมันด้วยกระบวนการทางกายภาพเพียง 1 กระบวนการนั้น ยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย เนื่องจากน้ำมันบางส่วนยังคงหลุดลอยออกไปกับน้ำทิ้ง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่มุ่งเน้นไปยังการเลือกใช้กระบวนการทางกายภาพต่างๆ มาทำงานร่วมกันเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถแยกน้ำมันเพื่อนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรและเพิ่มความคุ้มค่าในการบำบัดได้อีกด้วย

กระบวนการทางกายภาพที่น่าสนใจสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน คือการใช้กระบวนการโคอะเลสเซอร์ (Coalescer) ร่วมกับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemical) เนื่องจากการให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์นั้น จะเกิดกลไกในการปะทะกันระหว่างอนุภาคน้ำมันกับตัวกลาง ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น (Rachu, 2005) และการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าจะช่วยทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ช่วยให้ไขมันเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอีก เมื่อน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น (สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552) การแยกน้ำมันออกจากน้ำจึงสามารถทำได้ง่ายและประหยัดเวลายิ่งขึ้น ดังนั้นการทำงานร่วมกันของโคอะเลสเซอร์และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีนี้ช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจากกระบวนการร่วมนี้อย่างยังมีน้ำมันหลุดลอยออกไปกับน้ำทิ้ง จึงต้องเลือกกระบวนการทางกายภาพอีกกระบวนการหนึ่งมาทำงานร่วมกันกับโคอะเลสเซอร์และกระบวนการไฟฟ้าเคมี เพื่อเพิ่มคุณภาพของน้ำทิ้งและเพิ่มปริมาณน้ำมันเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งกระบวนการที่น่าสนใจคือ กระบวนการเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) เนื่องจากเมมเบรนชนิดนี้มีขนาดของช่องว่างในเมมเบรนเพียง 0.002 ถึง 1 ไมครอน ดังนั้นอนุภาคน้ำมันจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนออกไปกับน้ำใสได้ ดังนั้นเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชันนี้ จึงสามารถแยกสารแขวนลอยและอนุภาคน้ำมันที่อยู่ในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยข้อดีของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมี และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันนี้ จึงเป็นที่มาของแนวคิดในการทำงานวิจัยที่ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมี และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อพัฒนาและเสนอแนวคิดในการออกแบบกระบวนการร่วมสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและการนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการแบบผสมผสาน (Hybrid Process) ระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน
- 1.2.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันตัดออกจากน้ำด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ เช่น ลักษณะและความสูงของชั้นตัวกลาง อัตราเร็วการไหลของน้ำเสีย เป็นต้น
- 1.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการทางเคมีและกระบวนการโคอะเลสเซอร์ สำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย
- 1.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์กับกระบวนการไฟฟ้าเคมีสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

- 1.2.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมีและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียเพื่อนำไปพัฒนากระบวนการร่วมต่อไป

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยดำเนินงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการชั้น 3 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัย ดังนี้

- 1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากการผสมน้ำมันตัดกับน้ำแล้วปั่นกววนเพื่อให้เกิดสภาพอิมัลชัน โดยทำการศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ค่าคือ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
- 1.3.2 กระบวนการโคอะเลสเซอร์ใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากอะคริลิกใส โดยส่วนของโคอะเลสเซอร์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร และส่วนถังตกตะกอน ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทำจากพลาสติกพอลิโพรไพลีน (Polypropylene : PP) 3 รูปทรงคือ ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร เส้นใย กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 280 มิลลิเมตรหนา 0.5 มิลลิเมตร และทรงกระบอกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-6 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร
- 1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ได้แก่
- รูปร่างและลักษณะของตัวกลาง
  - ความสูงของชั้นตัวกลาง
  - อัตราเร็วการไหลของน้ำเสีย
- 1.3.4 กระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีและกระบวนการโคอะเลสเซอร์ใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากอะคริลิกใส โดยส่วนของโคอะเลสเซอร์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 150 เซนติเมตร และส่วนถังตกตะกอน ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 115 เซนติเมตร และสารเคมีที่ใช้คือ แคลเซียมคลอไรด์
- 1.3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไฟฟ้าเคมี ได้แก่
- ชนิดของขั้วไฟฟ้า
  - ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
- 1.3.6 กระบวนการไฟฟ้าเคมีทำการศึกษานิตของขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด คืออะลูมิเนียม โดยมีระยะห่าง 3 เซนติเมตร และ แกรไฟต์-แกรไฟต์ โดยมีระยะห่าง 1 เซนติเมตร (สุดสิริ รุติสุขวัฒน์, 2552) โดยขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร



และหนา 2 มิลลิเมตร มีพื้นที่ทำปฏิกิริยา 100 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ไฟฟ้า กระแสตรง 0.02 0.05 และ 0.1 แอมแปร์

- 1.3.7 ใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันชนิดแผ่นผลิตจากวัสดุโพลีซัลโฟน โมเดล UF 1812-PS ขนาดรูพรุน 0.1 ไมครอน และรับแรงดันได้สูงสุด 3 บาร์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเข้าใจกลไกและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการทำงานของกระบวนการร่วมระหว่าง กระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีและ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน สำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย
- 1.4.2 ทราบความเป็นไปได้ที่จะนำกระบวนการร่วมนี้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจริง และนำไปประยุกต์ด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องให้มีความคุ้มค่าในการบำบัด
- 1.4.3 กระบวนการร่วมจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีต้นทุนในการเดินระบบและใช้สารเคมีในปริมาณต่ำ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ประเภทของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

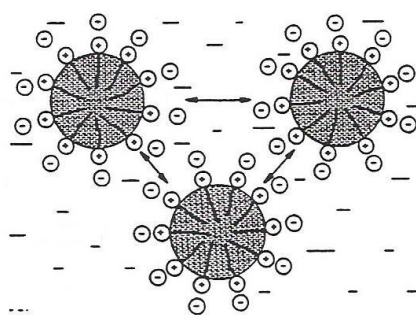
น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท (Aurette, 1985) ได้แก่

##### 2.1.1 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิวเป็นรูปแบบของอิมัลชันที่ไม่คงตัว (Non stabilized emulsion) โดยที่อนุภาคอิมัลชันสามารถรวมตัวกันได้เองเมื่อสัมผัสกันและมีแนวโน้มที่จะรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการกระจาย (Degree of dispersion) หรือขนาดของอนุภาคน้ำมัน ถ้าอนุภาคลอยและกระจายอยู่ในน้ำเป็นเวลานานถือว่า อิมัลชันมีความคงตัวมาก และถ้าขนาดอนุภาคเล็กจะใช้เวลาในการลอยตัวขึ้นและรวมตัวกับอนุภาคอื่นมาก

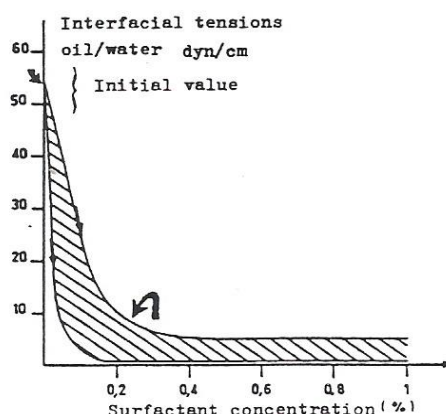
##### 2.1.2 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาด ที่ใช้กันทั่วไป ดังนั้นน้ำเสียจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม จึงมักพบการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวอยู่เสมอโดยโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ โมเลกุลที่ชอบน้ำมันและโมเลกุลที่ชอบน้ำ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวจึงไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 การผลักรันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurette, 1985)

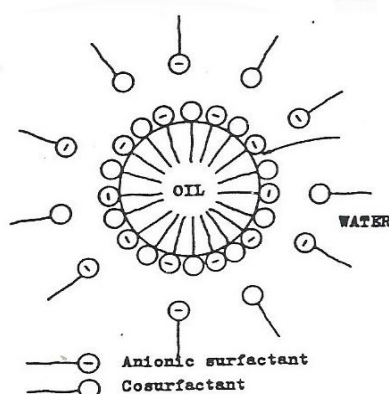
สารลดแรงตึงผิวจะทำให้แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำลดลงถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นต่ำก็ตาม ดังแสดงในภาพที่ 2-2 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำจะมิต่ำลง และจะลดลงจนมีค่าต่ำมาก ซึ่งภายใต้สภาวะนี้ น้ำมันจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นอิมัลชันได้เองและเกิดเป็นอิมัลชันที่มีเสถียรภาพสูงมาก จึงเรียกอิมัลชันที่เกิดในสภาวะที่มีสารลดแรงตึงผิวว่า “อิมัลชันที่มีเสถียรภาพ” (Stabilized emulsion)



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ (Aurelle, 1985)

อนุภาคน้ำมันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปมักมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ดังนั้นความเร็วในการลอยขึ้นสู่ผิวน้ำจึงมีค่าต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) และเนื่องจากที่ผิวของอนุภาคน้ำมันเกิดสภาพขั้วไฟฟ้า (Electrokinetic หรือ Zeta potential) ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตระหว่างหยดน้ำมัน ส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดการชนและการรวมตัวกันของหยดน้ำมันในระหว่างการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนลดลง

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวร่วม (Cosurfactant) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว คือจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ส่งผลให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่มีความชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว (ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 อิมัลชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวร่วมจะมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กมากโดยจะมีขนาดประมาณ 100-600 อังสตรอม



ภาพที่ 2-3 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle, 1985)

### 2.1.3 น้ำมันละลายน้ำ

ความสามารถในการละลายน้ำของน้ำมันพิจารณาจาก

- ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าโพลาไรตี (Polarity) ของโมเลกุลน้ำมันเพิ่มขึ้น ดังนั้นโมเลกุลน้ำมันที่ไม่อ้อมตัวจะละลายน้ำได้ดี โดยเฉพาะสารประกอบ Cyclic compounds
- ความสามารถในการละลายน้ำจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือน้ำมันที่ระเหยได้ง่าย (ซึ่งมักจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) สามารถละลายน้ำได้ดี
- ความสามารถในการระเหย (Volatility)
- ความสามารถของน้ำมันชนิดเบาจะดีกว่าน้ำมันชนิดหนัก ทั้งเรื่องความสามารถในการละลายน้ำและความสามารถในการระเหย

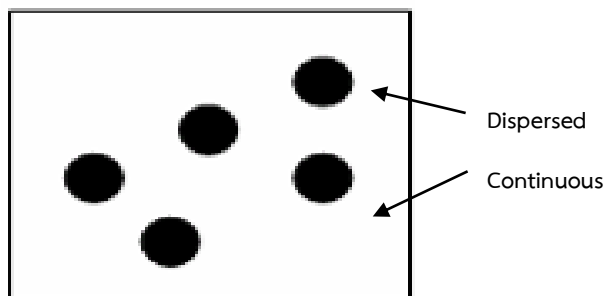
น้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้จะมีลักษณะใสและละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ ทำให้การตรวจสอบน้ำมันที่ละลายน้ำทำได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำ รวมถึงเกิดความเป็นพิษ เพราะน้ำมันที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกอะโรมาติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นจึงถือได้ว่าน้ำมันที่ละลายอยู่ในน้ำเป็นสารมลพิษที่อันตรายรูปแบบหนึ่ง

### 2.1.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ

น้ำมันส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงลอยอยู่บนผิวน้ำ ในลักษณะของฟิล์มบางๆ และปนเปื้อนได้เป็นบริเวณกว้างแม้มีปริมาณน้ำมันเพียงเล็กน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะสามารถกระจายตัวได้เป็นพื้นที่กว้างมาก ฟิล์มเหล่านี้มักมีการเรียงตัวเป็นโมเลกุลเดี่ยว (Monolayer) ซึ่งจะแพร่กระจายขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสงโดยน้ำเสียลักษณะนี้สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าคือสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งอยู่ที่ผิวน้ำ

## 2.2 อิมัลชัน (Emulsion)

คือ ของผสมของของเหลวสองชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยของเหลวที่มีลักษณะแขวนลอย เรียกว่า สารกระจาย (Dispersed หรือ Internal phase) และของเหลวอีกชนิด เรียกว่า สารต่อเนื่อง (Continuous หรือ External phase) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ **อิมัลชันตรง (Direct emulsion, O/W emulsion)** คือ อิมัลชันที่มีน้ำเป็นสารต่อเนื่องและน้ำมันเป็นสารกระจาย และ **อิมัลชันผกผัน (Inverse emulsion, W/O emulsion)**



ภาพที่ 2-4 ลักษณะของอิมัลชัน (สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552)

หลักเกณฑ์ที่สำคัญในการแบ่งลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันคือการจำแนกลักษณะตามขนาดของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 2-1 (Rachu, 2005)

ตารางที่ 2-1 การจำแนกอิมัลชันตามขนาดของสารกระจาย

ประเภทของอิมัลชัน	ลักษณะของอิมัลชัน
อิมัลชันขั้นแรก (Primary emulsion)	เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 ไมครอน
อิมัลชันขั้นที่สอง (Secondary emulsion)	เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 ไมครอน
แมโครอิมัลชัน (Macro emulsion)	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.06-1 ไมครอน และมีสารลดแรงตึงผิวปนอยู่ในอิมัลชัน
ไมโครอิมัลชัน (Micro emulsion)	เส้นผ่านศูนย์กลาง 10-60 นาโนเมตร และมีสารลดแรงตึงผิวปนอยู่ในอิมัลชันปริมาณมาก

### 2.3 น้ำมันตัด (Cutting oil)

คือน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการตัด กลึง โลหะ มีหน้าที่ในการลดความร้อนและเพิ่มการหล่อลื่นขณะมีการตัด กลึง โลหะ น้ำมันตัดเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถใช้ความเร็วสูงในการตัดกลึงโลหะ และมีราคาต่อหน่วยต่ำ ในการใช้งานนั้น จะนำน้ำมันตัดผสมกับน้ำเกิดเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water Emulsion) โดยทั่วไปแล้วน้ำมันตัดมีส่วนผสมของน้ำมันแร่ (Mineral oil) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) บางครั้งมีการเติมสารอื่นๆ เข้าไปด้วย เช่น กรดไขมัน สารเพิ่มคุณภาพ สารป้องกันการสึกกร่อน เมื่อมีการใช้น้ำมันตัดไปนานๆ จะทำให้สมบัติการหล่อลื่นลดลงและมีสมบัติความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการสะสมของเศษโลหะต่างๆ สารยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและคนเมื่อได้รับสัมผัส



(ก)



(ข)



(ค)

### ภาพที่ 2-5 น้ำมันตัด (Cutting Oil )

- ก) การใช้น้ำมันตัดหล่อเย็น ในงานตัด กลึง โลหะ
- ข) เศษโลหะจากการกลึงโลหะปนเปื้อนในน้ำมันตัด
- ค) ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

น้ำมันตัดที่ใช้งานแล้วจัดเป็นของเสียอันตรายประเภทน้ำมันแร่ที่ใช้สำหรับงานกลึง ตะไบ เจียร ที่มีธาตุฮาโลเจน ซึ่งมีรหัสของเสียอันตรายคือ 120106HA

น้ำมันตัดมี 2 ประเภทคือ

1. ประเภทผสมกับน้ำ (Emulsifiable Cutting Oils) หรือที่เรียกว่า น้ำมันหล่อเย็น หรือน้ำมันสปู น้ำมันประเภทนี้อาจเป็นสารเคมีสังเคราะห์ (Synthetics) หรือเป็นน้ำมันแร่ผสมสารตัวทำละลาย (Emulsifier) กับสารเพิ่มคุณภาพต่าง ๆ เช่น สารป้องกันสนิม สารป้องกันการเกิดฟอง สารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ และในบางกรณีอาจมีสารช่วยรับแรงกดด้วย น้ำมันสปู มักใช้ในงานตัดกลึงทั่วไปที่มีความรุนแรงไม่มากนัก และชิ้นงานมักเป็นโลหะอ่อนหรือเหล็กธรรมดา (Mild Steel) หรืองานตัดกลึงที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูง และการระบายความร้อนออกจากไบมีดและชิ้นงานซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากกว่าการหล่อเย็น เช่น งานกลึง งานกัด งานคว้านรู และงานเจียร สำหรับงานที่มีความรุนแรงมากขึ้น เช่น งานกลึงโลหะที่เหนียว หรืองานคว้านรูลึก ๆ มักต้องการน้ำมันสปูที่มีสารช่วยรับแรงกดหรือสารเคมีสังเคราะห์เพื่อช่วยป้องกัน การสึกหรอของไบมีดได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามสำหรับงานตัดกลึงที่มีความรุนแรงมาก และการหล่อเย็นมีความสำคัญสูง จำเป็นต้องใช้น้ำมันล้วนเพื่อช่วย ยืดอายุของไบมีด เนื่องจากน้ำมันที่ผสมน้ำแล้วจะมีคุณสมบัติด้านการหล่อเย็นลดลงไป ซึ่งน้ำที่ใช้ในการผสมน้ำมันควรมีความกระด้าง 100-150 ppm as  $\text{CaCO}_3$  และเมื่อผสมน้ำมันตัดกับน้ำแล้ว ก่อนนำไปใช้งานควรตรวจสอบพีเอชของน้ำมันให้อยู่ช่วง 8.5-10 เพื่อป้องกันการแยกตัวของน้ำและน้ำมัน เกิดเป็นอิมัลชันและป้องกันการเกิดสนิมที่ชิ้นงาน

2. ประเภทน้ำมันล้วน ๆ (Neat Cutting Oils) การใช้น้ำมันล้วน ๆ ในงานตัดกลึงโลหะที่เหนียวหรือแข็งมากและมีความรุนแรง ซึ่งการหล่อลื่น และการลดแรงเสียดทานระหว่างหัวไบต์กับชิ้นงานมีความสำคัญ น้ำมันประเภทนี้มักเป็นน้ำมันแร่ กลั่นเป็นอย่างดี อาจผสมด้วยไขน้ำมันจากพืชหรือสัตว์เพื่อช่วยการหล่อลื่น นอกจากนี้ยังอาจผสมด้วยสารเพิ่มคุณภาพอย่างอื่น เช่น สารเพิ่มคุณภาพช่วยรับแรงกดเพื่อช่วยลดการสึกหรอของหัวไบต์

สารรับแรงกดที่มีประสิทธิภาพสูงมักเป็นสารประกอบของคลอรีน กำมะถัน และฟอสฟอรัส แต่สารเหล่านี้มักจะทำให้โลหะพวกทองแดง ทองเหลือง หรือทองสัมฤทธิ์ เปลี่ยนสีไป ในกรณีนี้อาจใช้สารรับแรงกดอย่างอ่อน ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะหรือส่วนผสมของโลหะหรือส่วนผสมของโลหะดังกล่าวดังนั้นการเลือกใช้ชนิดของสารรับแรงกดจึงต้องคำนึงถึงชนิดของโลหะของชิ้นงานเพื่อให้แน่ใจว่าไม่ทำปฏิกิริยาต่อกัน

น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันตัด มีลักษณะเป็นน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ จัดเป็นอิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion) สารลดแรงตึงผิวส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กและกระจายตัว จึงไม่สามารถรวมตัวกันตัวเอง อนุภาคน้ำมันจึงมีความเสถียรและยากต่อการบำบัด น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันต้องบำบัดให้น้ำทิ้งมีค่าซีโอดีไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าไขมันในน้ำไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งโดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันตัดมักใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีต้นทุนในการบำบัดสูงมากเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่บำบัดได้ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจึงควรเลือกกระบวนการทางกายภาพมาทำงานร่วมกับกระบวนการไฟฟ้าเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดและลดต้นทุนจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี

#### 2.4 กระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

การเลือกใช้กระบวนการในการแยกน้ำมันออกจากร้านจำเป็นต้องพิจารณาถึงลักษณะของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนที่จะตัดสินใจเลือกกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป โดยหลักการพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการแยกน้ำมันกับน้ำเสียมีดังนี้

1. ปริมาณน้ำมันในน้ำเสีย
2. ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำเสีย
3. การใช้สารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลซิฟายเออร์
4. ความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน
5. ความถ่วงจำเพาะของน้ำเสีย
6. อุณหภูมิของน้ำเสีย
7. ความเข้มข้นของสารแขวนลอย



กระบวนการการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียแบ่งตามหลักการได้ 4 กระบวนการใหญ่ๆดังนี้

#### 2.4.1 กระบวนการแยกทางชีวภาพ (Biological processes)

เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำมันจะถูกย่อยสลายทางชีวภาพ โดยน้ำที่ต้องการบำบัดต้องผ่านกระบวนการบำบัดน้ำขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการ เช่น ระบบ Activated sludge, Tricking filter เป็นต้น

#### 2.4.2 กระบวนการแยกทางเคมี (Chemical processes)

การเติมสารเคมีลงในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด เช่น การเติมคลอรีน ( $Cl_2$ ) เป็นวิธีช่วยกำจัดไขมันต่างๆ ออกจากน้ำเสียซึ่งคลอรีนที่เติมอยู่ในรูปของสารละลาย โดยเติมลงในถังตกตะกอนแรกหรือในถังเติมอากาศ

#### 2.4.3 กระบวนการทางแยกกายภาพ-เคมี (Physio-Chemical processes)

**2.4.3.1 การดูดซับ (Adsorption)** สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำได้ แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงและต้องมีการฟื้นฟูหรือเปลี่ยนคาร์บอนเมื่อเกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการดำเนินการแบบ Full-scale เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activate carbon) เป็นการเปลี่ยนน้ำมันที่ปนเปื้อนในรูปของเหลวให้ถูกดูดซับอยู่บนผิวของแข็ง

**2.4.3.2 การใช้อุปกรณ์โคalesceเซอร์ (Coalescer)** สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำได้ แต่เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย ดังนั้นน้ำที่เข้าระบบจะต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อน โดยจะเพิ่มโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กขณะที่ผ่านตัวกลาง เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

**2.4.3.3 การกรอง (Filtration)** สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย รวมทั้งกำจัดน้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำ แต่ต้องทำการล้างย้อน (Backwash) หากมีการอุดตันและจะต้องบำบัดน้ำล้างย้อน เช่น Sand, Anthracite เป็นต้น

**2.4.3.4 การทำให้ลอย (Floatation)** เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากสำหรับการกำจัดน้ำมันและไขมัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ หลักการของกระบวนการนี้ คือ ทำให้น้ำมันหรือ ไขมันซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยขึ้นโดยอาศัยแรงลอยตัวของฟองอากาศพองน้ำมันหรือไขมันให้ลอยขึ้นสู่น้ำที่มีข้อดี คือ สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชัน นอกจากนี้สามารถรับ Shock load ได้มาก

**2.4.3.5 การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity separation)** วิธีนี้สามารถกำจัดน้ำมันอิสระและน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำ กำจัดของแข็งแขวนลอย ทั้งนี้ยังประหยัดและง่ายต่อการนำไปใช้งาน แต่มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้ และในการกำจัดอิมัลชัน



อนุภาคน้ำมันจะต้องมีขนาดใหญ่กว่า 20 ไมครอน นอกจากนี้ต้องใช้ความเร็ว การไหลต่ำ เช่น API, CPI, TPS, PPI เป็นต้น

**2.4.3.6 การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane processes)** ใช้กำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำ ในกรณีนี้เมมเบรนจะเกิดการอุดตันได้ง่ายและมีอายุการใช้งานจำกัด จึงต้องมีการบำบัดขั้นต้น ดังนั้นไม่เหมาะกับการดำเนินการแบบ Full-scale เช่น Reverse Osmosis, Ultrafiltration เป็นต้น กระบวนการเมมเบรนมีข้อดีคือ สามารถกำจัดอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กและลอยน้ำได้ ใช้เวลาในการเดินระบบและพื้นที่การติดตั้งน้อย

**2.4.3.7 การใช้ความร้อน (Thermal process)** เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำมัน ซึ่งถ้าอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันจะลดลงทำให้น้ำมันสามารถลอยขึ้นมาที่ผิวได้ง่าย ซึ่งดีต่อการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำ

## 2.4.4 กระบวนการแยกไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemistry/Electrostatic processes)

การเพิ่มความสามารถในการทำลายเสถียรภาพ และการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coagulation) และการแยกสารโดยทำให้ลอยขึ้น (Floatation) ด้วยไฟฟ้าโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับปริมาณและขนาดของขั้วไฟฟ้า แต่จะขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้ คือ ควบคุมง่าย ประสิทธิภาพสูงและระบบบำบัดมีขนาดเล็ก

จากกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น พบว่ามีกระบวนการที่น่าสนใจที่ใช้สำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียคือ

**1. กระบวนการโคอะเลสเซอร์** เนื่องจากการให้อิมัลชันไหลผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น การแยกน้ำมันออกจากน้ำจึงทำได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้หากเลือกใช้ตัวกลางที่มีราคาถูกและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือสามารถรวมอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่และเกิดการรวมอนุภาคได้ดี จะช่วยให้การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์มีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

**2. กระบวนการไฟฟ้าเคมี** เนื่องจากกระบวนการทางไฟฟ้า จะอาศัยกระแสไฟฟ้าที่ให้กับขั้วไฟฟ้า ก่อให้เกิดกระแสไอเล็กตรอนขึ้นซึ่งส่งผลต่อประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันจนน้ำมันมีเสถียรภาพลดลง ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้โดยใช้ระยะเวลาดำเนินการสั้น

**3. กระบวนการเมมเบรน** เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดน้ำมันที่มีขนาดเล็กและแขวนลอยในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัดพื้นที่ใช้งาน และใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานสั้น

นอกจากนี้การประยุกต์ใช้กระบวนการโคอะเลสเซอร์ร่วมกับกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความเข้มข้นสูง โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ ซึ่งเรียกว่า กระบวนการอิเล็กโทรโคเอสตาติกโคอะเลสเซอร์ (Electrocoalescer) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำให้สูงขึ้น ประหยัดต้นทุน และใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานสั้น แต่น้ำทิ้งจากกระบวนการอิเล็กโทรโคเอสตาติกโคอะเลสเซอร์นั้น ยังมีความปนเปื้อนของน้ำมันหลงเหลืออยู่ และเมื่อเราต้องการนำน้ำมันที่แยกได้กลับมาใช้ใหม่ จึงควรนำน้ำทิ้งนั้นไปบำบัดต่อเพื่อเพิ่มปริมาณของน้ำมันในการนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งกระบวนการที่น่าสนใจคือกระบวนการเมมเบรน ที่สามารถกำจัดสารแขวนลอยในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากแผ่นเมมเบรนมีขนาดช่องว่างค่อนข้างเล็ก ส่งผลให้สารแขวนลอยในน้ำและน้ำมันไม่สามารถเคลื่อนผ่านเมมเบรนออกไปได้ จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนากระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมีและกระบวนการเมมเบรน เพื่อบำบัดและนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษา หลักการทำงานและปัจจัยต่างที่ส่งผลต่อการทำงานของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมี และกระบวนการเมมเบรน เพื่อนำความรู้ไปใช้ในการพัฒนากระบวนการร่วมต่อไป

## 2.5 อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Coalescer) (Aurelle, 1985)

### 2.5.1 ที่มาของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

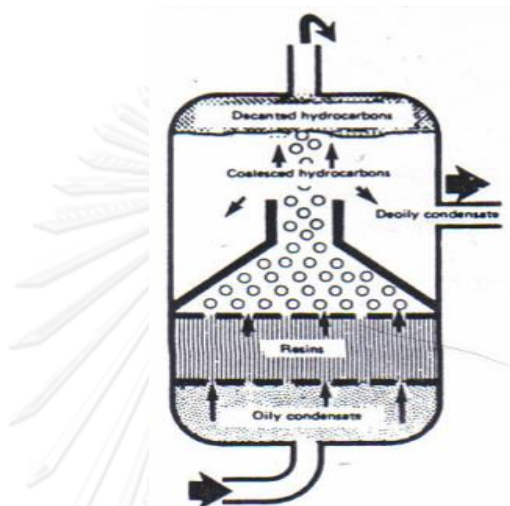
จากกฎของสโตก

$$U_T = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18\mu_c} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$U_T$	คือ ความเร็วลอยตัวของเฟสกระจาย (Dispersed phase) (m/s)
	$\Delta\rho$	คือ ผลต่างของความหนาแน่นของเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ( $\text{kg/m}^3$ )
	$d_E$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟสกระจาย (m)
	$\mu_c$	คือ ความหนืดพลศาสตร์ของเฟสต่อเนื่อง ( $\text{kg}\cdot\text{m/s}$ )
	$g$	คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{m/s}^2$ )

จากกฎของสโตกพบว่า ตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่ช่วยให้ความเร็วในการลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบนของอนุภาคน้ำมันสูงขึ้น คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน โดยความเร็วในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค ( $d_E$ ) ยกกำลังสอง หากขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น 2 เท่า ความเร็วในการลอยตัวจะเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า ดังนั้น ถ้ามีกระบวนการที่สามารถเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมันได้จะช่วยให้ระยะเวลาในการแยกน้ำมันออกจากน้ำสั้นลงเนื่องจากความเร็วในการลอยของน้ำมันสูงขึ้นจึงเป็นที่มาของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

อย่างไรก็ตามกระบวนการโคอะเลสเซอร์ไม่ใช่กระบวนการบำบัดน้ำมัน แต่เป็นเพียงกระบวนการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยการเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมัน ด้วยตัวกลางที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำเหมือนน้ำมัน เมื่อน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันผ่านเข้าสู่โคอะเลสเซอร์ ที่ภายในบรรจุชั้นตัวกลางไว้ อนุภาคน้ำมันจะเกิดการปะทะกับชั้นตัวกลาง น้ำมันจะมีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันอื่นๆ เกิดการรวมตัวกันจนขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งช่วยให้การแยกน้ำมันออกจากน้ำได้ง่ายขึ้น

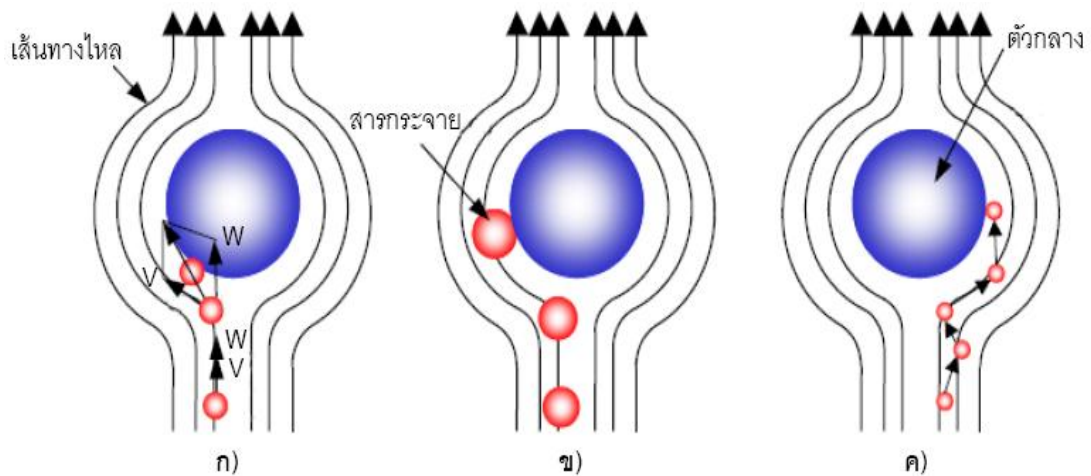


ภาพที่ 2-6 อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Aurelle, 1985)

## 2.5.2 กลไกการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Rachu, 2005)

เมื่อน้ำมันไหลผ่านเข้าสู่โคอะเลสเซอร์ อนุภาคน้ำมันจะปะทะกับชั้นตัวกลาง ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาค โดยกลไกที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 3 ลักษณะตามลำดับ ดังนี้

### 2.5.2.1 การส่งถ่าน้ำมันเข้าสัมผัสผิวตัวกลางในโคอะเลสเซอร์ (Transportation stage) ลักษณะเหมือนกลไกที่เกิดขึ้นในเครื่องกรอง แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ การส่งถ่านด้วยการตกตะกอนการส่งถ่านด้วยการปะทะโดยตรง และการส่งถ่านด้วยการแพร่กระจาย



ภาพที่ 2-7 การส่งถ่ายน้ำมันเข้าสู่สัณฐานตัวกลาง (Rachu, 2005)

- ก) การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน
- ข) การส่งถ่ายด้วยการปะทะ
- ค) การส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย

### การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน (Sedimentation)

อนุภาคน้ำมันในน้ำเสียจะเคลื่อนที่ตามเส้นการไหล โดยมีความเร็วในการเคลื่อนที่ 2 ทิศทางคือ  $u_r$  คือทิศความเร็วในการลอยขึ้นและ  $V_0$  คือทิศความเร็วการไหลของน้ำที่ผ่านตัวกลาง ที่ระยะห่างจากตัวกลางเวกเตอร์ทั้งสองจะอยู่ในทิศทางเดียวกันคือในแนวตั้ง เมื่อเข้าใกล้ตัวกลาง น้ำเสียสามารถเลี้ยวเบนหลบตัวกลางได้ ดังนั้นเวกเตอร์  $V_0$  จึงเปลี่ยนทิศทางไปตามการไหลของน้ำ แต่อนุภาคน้ำมันไม่สามารถเลี้ยวหลบตัวกลางได้จึงลอยตัวขึ้นไปในทิศทางเดิมนั้นคือ  $u_r$  ยังคงมีทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ในแนวตั้ง เมื่อรวมเวกเตอร์ความเร็วลัพธ์ พบว่าอนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางการไหลและเข้าชนกับตัวกลาง ทำให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสเกาะติดอยู่กับตัวกลาง เนื่องจากหยดน้ำมันและตัวกลางมีลักษณะไม่ชอบน้ำเหมือนกันโดยที่ประสิทธิภาพของการชนกันโดยการตกตะกอน ( $\eta_s$ ) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_s = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18\mu_c \cdot V_0} = \frac{u_r}{V_0} \quad (2.2)$$

### การส่งถ่ายด้วยการปะทะ (Direct interception)

ถ้าอนุภาคน้ำมันมีความหนาแน่นเท่ากับน้ำหรือ  $\Delta\rho = 0$  อนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการไหลของน้ำรอบตัวกลาง ถ้าเส้นการไหลห่างจากตัวกลางเป็นระยะทางซึ่งน้อยกว่ารัศมีของอนุภาคน้ำมัน อนุภาคน้ำมันจะชนและถูกจับโดยตัวกลางด้วยกลไกแบบการปะทะ

โดยตรง โดยประสิทธิภาพของการชนกันด้วยการปะทะ ( $\eta_1$ ) สำหรับตัวกลางทรงกลมสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_1 = \frac{3}{2} \left( \frac{d_E}{d_p} \right)^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $d_p$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง

### การส่งถ่ายด้วยการแพร่ (Diffusion)

กลไกการเคลื่อนย้ายแบบการแพร่นี้จะเกิดขึ้นกับอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน อนุภาคขนาดเล็กนี้จะมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทางที่แน่นอน ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กนี้จึงมีโอกาสเคลื่อนที่ไปชนกับตัวกลางได้โดยประสิทธิภาพของการชนกันโดยการแพร่ ( $\eta_D$ ) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_D = 0.9 \left( \frac{K \cdot T}{\mu_C \cdot d_E \cdot d_p \cdot V_0} \right)^{2/3} \quad (2.4)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่ BOLTZMANN

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

โดยกลไกการเคลื่อนย้ายที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะและสมบัติของอิมัลชันที่จะทำการบำบัด ซึ่งน้ำมันในน้ำเสียจะมีการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคน้ำมันดังนั้นกลไกการส่งถ่ายที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นได้ทั้ง 3 ลักษณะ ประสิทธิภาพของการชนทั้งหมด (Global efficiency of interception :  $\eta_T$ ) จึงเท่ากับ

$$\eta_T = \eta_s + \eta_1 + \eta_D \quad (2.5)$$

แต่เนื่องจากการทำงานของโคอะเลสเซอร์นั้นใช้จำนวนตัวกลางมากกว่า 1 ตัวและการส่งถ่ายอนุภาคน้ำมันเข้าสู่ตัวกลางอาจไม่ได้เกิดขึ้นกับอนุภาคน้ำมันทั้งหมดที่เข้าสู่โคอะเลสเซอร์ ดังนั้นในการคำนวณประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จึงต้องคำนึงถึง จำนวนของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ และความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียด้วย

เมื่อพิจารณาตัวกลางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_p$  และเรียงตัวกันสูง  $dH$  จะได้พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวกลางทรงกลมมีค่าเท่ากับ  $\frac{\pi d_p^2}{4}$  ดังนั้นปริมาณของอนุภาคน้ำมันที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยเวลาจึงเป็นไปตามสมการ

$$\frac{V_0 \pi d_p^2 C}{4} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $C$  = ความเข้มข้นของอิมัลชันที่ต้องการทำการบำบัด  
 $V_0$  = ความเร็วในการไหลของน้ำเสีย

กำหนดให้ปริมาณของน้ำมันที่เกิดการส่งถ่ายไปยังตัวกลางโคอะเลสเซอร์คือ  $X$  ดังนั้นประสิทธิภาพทั้งหมดของการชนคือสัดส่วนของปริมาณน้ำมันที่เกิดการส่งถ่ายต่อปริมาณน้ำมันทั้งหมดที่เข้าสู่ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ที่เวลาใดๆ

$$\eta_T = \frac{X}{V_0 C \pi d_p^2 / 4} \quad (2.7)$$

ดังนั้น ปริมาณของน้ำมันที่ถูกจับโดยตัวกลางจึงมีค่าเท่ากับ

$$X = \eta_T \cdot \frac{V_0 \pi d_p^2 C}{4} \quad (2.8)$$

การเรียงตัวกันของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวกลาง โดยมีอัตราส่วนช่องว่างของตัวกลางเท่ากับ  $\varepsilon$  จะได้ว่าปริมาตรสุทธิของตัวกลางโคอะเลสเซอร์คือปริมาตรทั้งหมดหักลบกับปริมาตรของช่องว่างระหว่างตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ดังนั้นสัดส่วนของปริมาตรสุทธิของตัวกลางต่อปริมาตรของตัวกลาง 1 ตัว คือจำนวนของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$\frac{A_0 dH (1 - \varepsilon)}{\pi d_p^3 / 6} \quad (2.9)$$

ดังนั้นปริมาณของน้ำมันทั้งหมดที่ถูกจับโดยตัวกลางโคอะเลสเซอร์จึงเท่ากับผลคูณระหว่างค่า  $X$  กับจำนวนของตัวกลางดังสมการ

$$X \cdot \frac{A_0 dH (1 - \varepsilon)}{\pi d_p^3 / 6} \quad (2.10)$$

การชนกันระหว่างน้ำมันกับตัวกลางโคอะเลสเซอร์ น้ำมันอาจไม่เกิดการเกาะติดและรวมตัวกับตัวกลางได้ทั้งหมด จึงต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการเกาะติดกับตัวกลางด้วย โดยกำหนดให้  $\alpha$  คือประสิทธิภาพในการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันกับพื้นผิวของตัวกลาง

ดังนั้น ปริมาณน้ำมันที่เกาะติด(และเกิดการรวมตัวกัน)อยู่ที่ผิวของตัวกลาง จึงคำนวณได้จาก

$$\alpha \cdot \frac{A_0 dH (1 - \varepsilon)}{\pi d_p^3 / 6} \quad (2.11)$$

ปริมาณของน้ำมันที่เกาะติดและเกิดการรวมตัวกันที่ผิวของตัวกลางจะมีค่าเท่ากับปริมาณของน้ำมันที่ถูกกำจัดออกจากเฟสน้ำ

$$-V_0 \cdot A_0 \cdot dC = 3 \alpha \eta_T \cdot A_0 \frac{V_0 \cdot C (1 - \varepsilon) dH}{2d_p} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $dC$  = ความเข้มข้นของน้ำมันที่ลดลงหลังจากผ่านโคอะเลสเซอร์

$$\text{นั่นคือ} \quad \frac{dC}{C} = -3(1 - \varepsilon) \alpha \eta_T \cdot \frac{dH}{2d_p} \quad (2.13)$$

อินทิเกรตสมการ (2.13) จะได้

$$\ln \left( \frac{C_s}{C_0} \right) = -\frac{3}{2} (1 - \varepsilon) \alpha \eta_T \cdot \frac{H}{d_p} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $C_0$  = ความเข้มข้นของน้ำมันในอิมัลชันที่ต้องการบำบัด

$C_s$  = ความเข้มข้นของน้ำมันที่ยังเหลืออยู่ในน้ำหลังการบำบัด

$H$  = ความสูงของชั้นตัวกลาง

ดังนั้น ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$1 - \frac{C_s}{C_0} = 1 - e^{-\frac{3}{2} (1 - \varepsilon) \alpha \eta_T \cdot \frac{H}{d_p}} \quad (2.15)$$

### 2.5.2.2 การจับยึดระหว่างอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางและการไหลผ่านชั้นตัวกลาง (Adhesion and coalescence stage)

ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นหลังจากน้ำมันถูกส่งถ่ายเข้าสู่ชั้นตัวกลางที่ชอบน้ำมัน โดยที่อนุภาคน้ำมันจะยังไม่หลุดออกจากชั้นตัวกลางในทันที แต่จะเกิดการรวมตัวกัน ภายในชั้นตัวกลาง จนกระทั่งมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงหลุดออกจากชั้นตัวกลางทั้งนี้การเลือกใช้ ตัวกลางที่ชั้นบนสุดควรเลือกพื้นผิวที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองของหยดน้ำมัน

### 2.5.2.3 การรวมตัวและหลุดออกจากชั้นตัวกลาง (Salting out stage)

เมื่อน้ำมันรวมตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และเคลื่อนผ่านช่องว่างสุ่วิพินหน้าด้านบนของชั้นตัวกลางจนหลุดออกจากชั้นตัวกลางถือว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการโคอะเลสเซนซ์

โดยประสิทธิภาพของโคเอสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำจะขึ้นอยู่กับการหลุดออกจากชั้นตัวกลาง ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะและขนาดของหยดน้ำมัน

### 2.5.3 ปัจจัยควบคุมประสิทธิภาพของโคเอสเซอร์ (Rachu, 2005)

1. **ความสูงของชั้นตัวกลางโคเอสเซอร์** เมื่อความสูงของชั้นตัวกลางเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้น้ำมันมีเวลาสัมผัสกับตัวกลางและเกิดโอกาสชนกับตัวกลางได้มากขึ้น

2. **อัตราเร็วการไหลของน้ำเสีย** เมื่ออัตราเร็วการไหลของน้ำเสียต่ำๆ น้ำมันจะมีเวลาสัมผัสกับตัวกลางค่อนข้างมากจึงเกิดการชนกับตัวกลางโคเอสเซอร์ได้มากกว่าที่อัตราเร็วการไหลของน้ำเสียสูงๆ

3. **ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย** เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลโคเอสเซอร์เกิดการอุดตันได้เร็ว กล่าวคือ ระยะเวลาในการเดินระบบของโคเอสเซอร์จะสั้นลง

4. **ความสามารถในการเปียกได้ด้วยสารกระจายของตัวกลาง** ในขั้นตอนการส่งถ่ายและเกิดการรวมตัวควรเลือกใช้ตัวกลางที่มีความชอบน้ำมัน หรือไม่ชอบน้ำ เพื่อให้ไขมันเกิดการรวมตัวกันเพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำ แต่ในช่วงที่น้ำมันจะเคลื่อนที่หลุดออกจากตัวกลางควรเลือกตัวกลางที่มีพื้นผิวชอบน้ำเพื่อลดการเกิดฟองน้ำมัน

5. **ขนาดของตัวกลางโคเอสเซอร์** ตัวกลางขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่

6. **แรงตึงผิวและสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสีย** ถ้าในน้ำเสียมีสารลดแรงตึงผิวปะปนอยู่มากจะส่งผลให้น้ำมันมีเสถียรภาพสูง และเกิดการรวมตัวกับตัวกลางได้ยาก

### 2.5.4 ข้อดี-ข้อเสียของอุปกรณ์โคเอสเซอร์

ตารางที่ 2-2 ข้อดีและข้อเสียของอุปกรณ์โคเอสเซอร์

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และราคาถูก</li> <li>- ต้องการการดูแลรักษาและใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย</li> <li>- ไม่มีความจำเป็นต้องใช้สารเคมีในการเดินระบบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันสูงขึ้น จึงควรมีการป้องกัน เช่น ทำการบำบัดขั้นต้น หรือมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวกลางโดยการล้างย้อนกลับ</li> </ul>



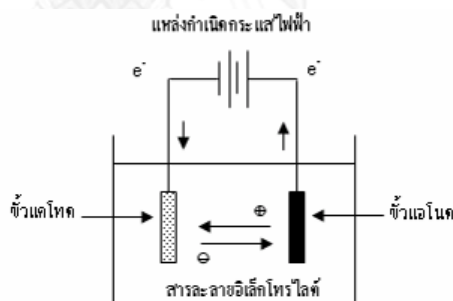
## 2.6 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการนี้ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว (รัตน, 2541) แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า แอโนด ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกว่า แคโทด

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ภาพที่ 2-8 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (วรรณรัตน์, 2547)

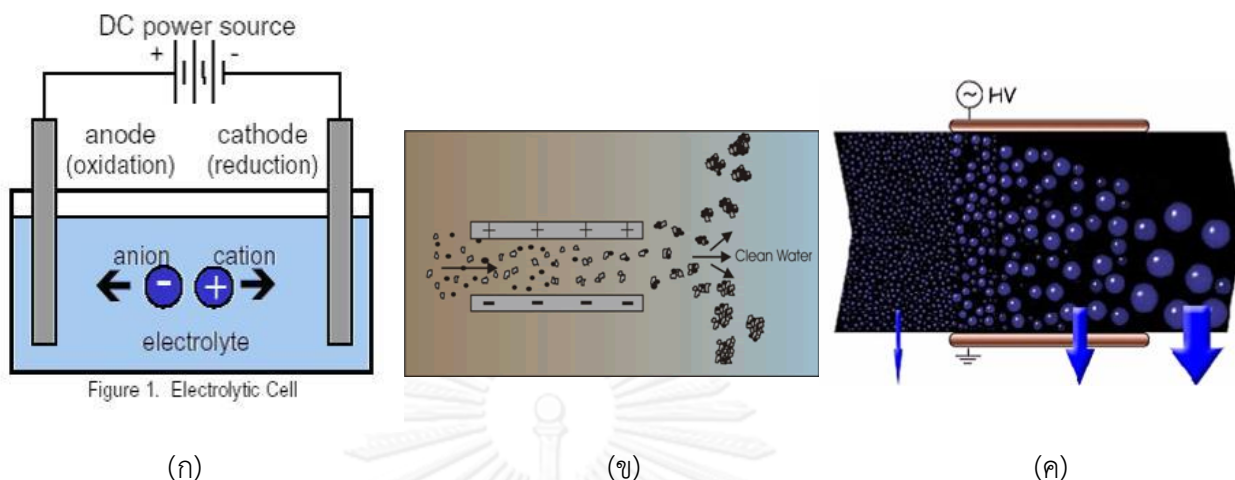
### 2.6.1 กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electro-chemistry process) (Ichikawa T. และคณะ, 2004)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันโดยอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้า ที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Density current: J) และความต่างศักย์ (Voltage: V) โดยพิจารณาความถี่ในการสัมผัสกันของอนุภาคน้ำมันเป็นหลักและวิธีที่ดีที่สุดในการทำดีมัลซิฟิเคชัน คือ การผ่านสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความสามารถในการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองแล้วจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้น โดยสนามไฟฟ้านี้จะส่งผลต่อประจุที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมัน ก่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันเมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าว โดยประจุที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมันนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้

ขึ้นอยู่กับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ถ้าใส่สนามไฟฟ้ากำลังสูง (High electric field) จะส่งผลให้มีประจุลบของกระแสอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีประจุลบมากเกินไปจนผลึกกันไม่สามารถรวมตัวกันได้ แต่ถ้าใช้สนามไฟฟ้ากำลังต่ำ (Low electric field) ประจุลบของกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนไม่มาก สามารถสะท้อนกับประจุบวกที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคน้ำมันได้ ส่งผลให้แรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างหยดน้ำมันลดลง ดังนั้นหยดน้ำมันจึงเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้มากขึ้นเกิดแรงดึงดูดระหว่างหยดน้ำมัน ทำให้อนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้กันสามารถเข้ามารวมตัวกันได้ โดยการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแบ่งได้ 4 ประเภทดังนี้

ตารางที่ 2-3 กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าเคมี

วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า	หลักการ
อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic)	กระบวนการแยกสารปนเปื้อนออกจากน้ำ โดยใส่สนามไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำและใช้กระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งจะทำให้ไอออนของสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า
อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation)	กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย ใช้ต้นทุนในการติดตั้งและดำเนินการต่ำกว่าระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป อีกทั้งประหยัดเวลาในการบำบัด ทั้งนี้การแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ามีสองขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่งเป็นการทำให้เกิดตะกอนเบาด้วยไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการรวมตัวของน้ำมัน ขั้นที่สองเป็นการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย
อิเล็กโทรฟลอตเตชัน (Electrofloatation)	การลอยตัวด้วยไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงที่ใช้สำหรับแยกอิมัลชันประเภทน้ำมันกับน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยขั้วไฟฟ้าแอโนดจะเกิดเป็นฟองก๊าซออกซิเจนขนาดเล็ก (ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมาก) และกระจายตัวออกอย่างรวดเร็วเพื่อช่วยในการลอยตัวขึ้นของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ขั้วไฟฟ้างดกล่าวเกิดการสึกกร่อนได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนขั้วใหม่เสมอ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองก๊าซเพียงอย่างเดียว ไม่เกี่ยวกับเวลาในการทำปฏิกิริยา
อิเล็กโทรโคอะเลสเซนซ์ (Electrocoalescence)	การใช้ไฟฟ้า (Electric) โดยผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองจากนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้น ดังนั้นอนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้กันจึงสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ ใช้ระยะเวลาดำเนินการสั้น จึงถือว่าเป็นวิธีการที่น่าสนใจในการนำมาใช้เพื่อแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำ



ภาพที่ 2-9 ประเภทของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า (สุดสิริ จิตสุภวัฒน์, 2552)

- ก) อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic)
- ข) อิเล็กโทรโคแอกูเลชัน (Electrocoagulation)
- ค) อิเล็กโทรโคอะเลสเซนซ์ (Electrocoalescence)

## 2.6.2 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญพคุณ, 2545)

- 1 **แรงเคลื่อนไฟฟ้า** กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
- 2 **การเคลื่อนที่ของประจุไอออน** ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของไอออนขึ้นอยู่กับขนาดและประจุบไอออน
- 3 **อุณหภูมิ** เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าคืออัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
- 4 **พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า** ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่ดีสำหรับการถ่ายเทและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
- 5 **ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า** จำนวนกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้า ถ้ามีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น
- 6 **จำนวนประจุของไอออน** เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น จำนวนประจุของไอออนจะเพิ่มมากขึ้น

7 ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายนำไฟฟ้ามีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าอื่นๆ

### 2.6.3 กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์

คือ กระบวนการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย เป็นกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์กับกระบวนการทางไฟฟ้า จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเมื่อ วางขั้วไฟฟ้าไว้ทางด้านบน หรือ วางไว้เหนือตัวกลางโคอะเลสเซอร์ (สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552) และให้น้ำเสียไหลเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ เมื่อน้ำมันในน้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ อนุภาคน้ำมันจะรวมตัวกันเป็นอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่ขึ้นแล้วเคลื่อนที่เข้าสู่กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งกระแสอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าจะทำลายความเป็นประจุของอนุภาคน้ำมัน ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้อีกครั้ง ดังนั้นกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ ช่วยให้การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียสามารถทำได้ง่ายและช่วยประหยัดเวลาในการเดินระบบด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้นกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและช่วยให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายด้วยทฤษฎีดีแอลวีโอ (DLVO theory)

## 2.7 ทฤษฎีดีแอลวีโอ (DLVO theory)

คือ ทฤษฎีที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันที่ระยะห่างต่างๆ โดยพิจารณาจากพลังงานรวมที่พื้นผิวของอนุภาคน้ำมัน และใช้ค่าความต่างศักย์ที่ขวางกั้น (Height of potential energy barrier) การรวมตัวระหว่างอนุภาคทั้งสองเพื่อบอกเสถียรภาพของน้ำมันที่ส่งผลต่ออัตราการรวมตัวของอนุภาค ดังนั้นจึงนำทฤษฎีดีแอลวีโอมาอธิบายเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าในการบำบัดและรวบรวมอนุภาคน้ำมันให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้

### 2.7.1 หลักการเบื้องต้นของทฤษฎีดีแอลวีโอ

เสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน เกิดจากแรงระหว่างระหว่งผิวหน้าของอนุภาคน้ำมัน โดยแรงที่เกิดขึ้นผิวหน้าของอนุภาคน้ำมัน มี 2 แรงคือ

- 1) แรงวัลเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force:  $f_{vw}$ )

$$f_{vw}(D) = \frac{-A_H}{12\pi D^2} \quad (2.16)$$

2) แรงอเล็กโตรสตาติก (Electrostatic Force:  $f_E$ )

$$f_E(D) = \frac{64n_0 kT \gamma^2 e^{-kD}}{K} \quad (2.17)$$

ผลรวมของแรงสุทธิระหว่างอนุภาค (Total interaction force:  $F$ ) ใช้บอกแนวโน้มการรวมตัวกันของอนุภาคทั้งสอง โดยที่แรงแวลเดอร์วาล์ว ( $f_{vw}$ ) เป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่ทำให้อนุภาคมีโอกาสรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนแรงอเล็กโตรสตาติก ( $f_E$ ) เป็นแรงผลักที่ระหว่างอนุภาคซึ่งทำให้อนุภาคมีความเสถียรและรวมตัวกันได้ยาก ทั้งนี้จะเกิดขึ้นจาก ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอนุภาคและความแตกต่างของประจุในสารละลาย ตัวอย่างเช่น ถ้ามีแรงแวลเดอร์วาล์ว ( $f_{vw}$ ) มากจะส่งผลให้เสถียรภาพระหว่างอนุภาคลดลงส่งผลให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันได้ เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (Attractive) มากกว่าแรงผลัก (Repulsive)

$$F(D) = \frac{2\pi R_1 R_2}{R_1 + R_2} f(D) \quad (2.18)$$

$$F(D) = \frac{2\pi R_1 R_2}{R_1 + R_2} [f_E(D) + f_{vw}(D)] \quad (2.19)$$

โดยที่	$A_H$	คือ ค่าคงที่ Hamaker ( $5 \times 10^{-21}$ จูล)
	$T$	คือ อุณหภูมิ (298 เคลวิน)
	$D$	คือ ระยะห่างระหว่างอนุภาค (เซนติเมตร)
	$n_0$	คือ จำนวนของไอออนใน 1 ลบ.ซม.
	$k$	คือ ค่าคงที่ Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$ จูล/เคลวิน)
	$\gamma$	คือ $\frac{\left[ \exp\left(\frac{ze\xi}{2kT}\right) - 1 \right]}{\left[ \exp\left(\frac{ze\xi}{2kT}\right) + 1 \right]}$
	$K^{-1}$	คือ ค่าดีไบฮัคเคิล ( $10^8$ เมตร <sup>-1</sup> )
	$R$	คือ รัศมีของอนุภาค (เซนติเมตร)

ดังนั้นจึงเกิดพลังงานที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมัน

1) พลังงานแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Energy:  $U_{vw}$ )

$$U_{vw}(D) = \frac{-A_H}{12\pi D^2} \quad (2.20)$$

2) พลังงานอิเล็กโทรสถิติก (Electrostatic Energy:  $U_E$ )

$$U_E(D) = 2\pi\epsilon R\phi^2 \log(1 + e^{-KD}) - 2\pi\epsilon R(E_0 R)^2 \log\left(\frac{1}{1 - e^{-KD}}\right) \quad (2.21)$$

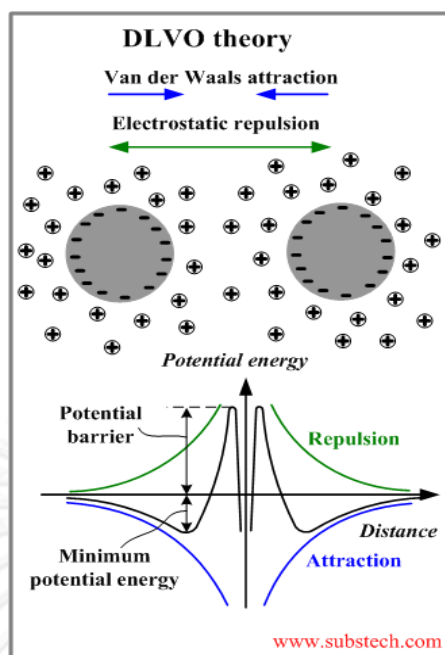
ผลรวมของพลังงานสุทธิระหว่างอนุภาค (Total interaction energy:  $U$ ) ใช้บอกแนวโน้มการรวมตัวกันของอนุภาคทั้งสอง โดยที่พลังงานแวนเดอร์วาลส์ ( $U_{vw}$ ) จะทำให้อนุภาครวมตัว ส่วนพลังงานอิเล็กโทรสถิติก ( $U_E$ ) จะทำให้อนุภาคเสถียรไม่สามารถรวมตัวได้ โดยจะเห็นได้ว่าการทำให้ค่า  $U_E$  ลดลง โดยเพิ่มค่าสนามไฟฟ้า ( $E_0$ ) ในพจน์หลังของสมการก็จะเพิ่มความสามารถในการแยกอนุภาคน้ำมันได้ ทั้งนี้เนื่องจากในพจน์หลังของสมการนี้สามารถใช้ออกถึงความสามารถในการทำลายเสถียรภาพได้

$$U(D) = \int F(D) dD \quad (2.22)$$

$$U(D) = [U_E(D) + U_{vw}(D)] \quad (2.23)$$

โดยที่  $\epsilon$  ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของน้ำ (80 ฟาราเดย์/เซนติเมตร)

$\phi$  ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวอนุภาค (โวลต์)



ภาพที่ 2-10 พลังงานที่ขวางกั้น (Height of potential energy barrier)  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=stabilization\\_of\\_colloids](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=stabilization_of_colloids).  
 25 ธันวาคม 2555)

ความเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน จะลดความสามารถในการรวมตัวของหยดน้ำมัน ดังนั้นวิธีการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมัน จะต้องลดเสถียรภาพระหว่างอนุภาคน้ำมันลงโดยทำให้ประจุที่ผิวของอนุภาคเป็นกลาง เพื่อเพิ่มโอกาสในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันทำให้สามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบนได้

จากการศึกษาของ T. Ichikawa, 2004 กล่าวว่า การรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน เกิดขึ้นได้จากการลดลงของพื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาค และการลดลงของพลังงานที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมัน โดยที่ความเสถียรของระบบขึ้นอยู่กับอัตราการรวมตัวของอนุภาคซึ่งขึ้นกับพลังงานศักย์ที่ขวางกั้นการรวมตัว (Height of potential energy barrier) ระหว่าง 2 อนุภาค ถ้าพลังงานศักย์ที่ขวางกั้นมากกว่าค่าพลังงานความร้อนจะส่งผลให้อัตราการรวมตัวของอนุภาคเข้าใกล้ศูนย์และอิมัลชันจะมีความเสถียรมาก โดยที่ค่าพลังงานศักย์ที่ผิวอนุภาคจะลดลงเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้ากำลังต่ำให้กับอิมัลชัน การผ่านสนามไฟฟ้าจะส่งผลต่อประจุที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมันจึงทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถชนกันโดยคล้ายกับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกกูเลชัน (Flocculation) คืออนุภาคน้ำมันสามารถชนและเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ หลังจากนั้นอนุภาคน้ำมันจะลอยขึ้นด้านบนกลายเป็นชั้นน้ำมัน (Oil layer) ได้

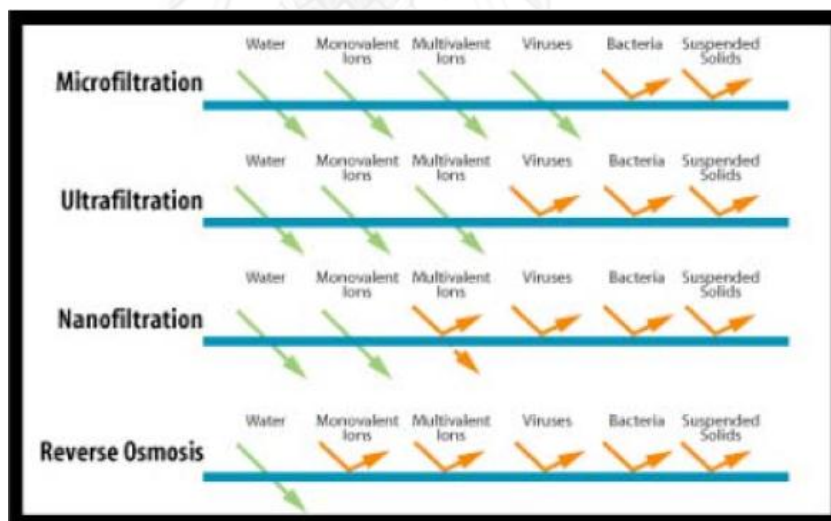
และค่าสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพลด พิจารณาได้จากการกระจายตัวของประจุที่ล้อมรอบและประจุที่อนุภาคน้ำมัน ซึ่งเกิดจากการกระทำของประจุไฟฟ้าระหว่างสนามไฟฟ้าและประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพขึ้นได้ นอกจากนี้การใส่

สนามไฟฟ้าจะก่อให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันรวมทั้งสามารถลดค่า ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคน้ำมันลงได้อีกด้วย

## 2.8 กระบวนการเมมเบรน (Membrane process)

คือ กระบวนการแยกสารละลายเมมเบรนออกจากน้ำ หรือของเหลวอื่น ๆ โดยอาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi permeable membrane) กระบวนการเมมเบรนสามารถใช้ในการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) สำหรับทั้งระบบ ของแข็ง-ของเหลว ก๊าซ-ก๊าซ กระบวนการเมมเบรนให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูง ไม่ทำลายโครงสร้างของสิ่งเจือปน และไม่มีควมจำเป็นต้องใช้สารเคมีในการเดินระบบ ดังนั้นกระบวนการเมมเบรนจึงมีบทบาทที่สำคัญทั้งในการบำบัดน้ำและน้ำเสีย (มันสิน ตัณฑุลเวช, 2539)

ในกระบวนการเมมเบรน น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าสู่เมมเบรน โดยจะเรียกส่วนของน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าไปว่า Feed เมื่อผ่านกระบวนการเมมเบรนแล้วจะมีส่วนที่สามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ เรียกว่า Permeate (เพอมีเอท) หรือ Filtrate (ฟิลเตรท) และส่วนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า Retentate (รีเทนเตรท) หรือ Concentrate (คอนเซนเตรท) เมมเบรนมาหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการกำจัดมลสารแตกต่างกัน



ภาพที่ 2-11 ความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของเมมเบรนแต่ละชนิด (Rachu, 2005)

จากภาพที่ 2-11 พบว่าเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ประกอบด้วยคอลลอยด์ และสารน้ำหนักโมเลกุลสูง สามารถแยกสารแขวนลอย แยกโปรตีน ไวรัสและแบคทีเรีย ออกจากน้ำได้ จึงนิยมใช้เมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชันในการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน มาบำบัดน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการอเล็กโทรสตาติกโคแอสเสเซอร์ เพื่อเพิ่มคุณภาพน้ำทิ้งและเพิ่ม



ความเข้มข้นของน้ำมันที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากลไกการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันต่อไป

## 2.9 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

คือ กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูบวมเมมเบรน อยู่ในช่วง 30-1,000 อังสตรอม ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้เพื่อแยกอนุภาคหรือตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1,000-500,000 ดาลตัน ไม่ให้ผ่านเมมเบรนออกไป จึงไม่ค่อยมีความแตกต่างในความดันออสโมติกคร่อมเมมเบรน ดังนั้นจึงสามารถทำงานที่ความดันในช่วง 2-10 บาร์ เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน มักทำโครงสร้างแบบไม่สมมาตร โดยมีขนาดรู 30 -400 อังสตรอม อยู่ที่ผิวหน้าเพียง 0.1-1.5 ไมครอน ส่วนขนาดรูของชั้นรองรับมีขนาดใหญ่กว่าชั้นผิวอย่างมาก อนุภาคที่สามารถผ่านรูขนาดเล็กที่ชั้นผิวไปได้ก็จะผ่านรูในชั้นรองรับไปได้โดยง่ายตาย

รูปแบบของอัลตราฟิลเตรชันโมดูลที่มีขายในท้องตลาดมีทุกลักษณะ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame) แบบท่อม้วน (Tubular) และแบบเส้นใย (Hollow fiber) ไม่ว่าจะเป็ นโมดูลลักษณะใดก็ตามเพื่อให้มีการถ่ายโอนมวลมากที่สุด จำเป็นต้องให้มีความเร็วแนวสัมผัส (แรงเฉือน)บริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูง วิธีการให้สารป้อนเข้าสู่เมมเบรนมีสองวิธีคือ 1. ให้สารป้อนไหลตามแนวขวาง (Cross flow) กล่าวคือ สารป้อนมีแนวการไหลขนานกับผิวหน้าของเมมเบรนและเพอร์มิเอตผ่านเมมเบรนในแนวตั้งฉากกับเมมเบรน และ 2. สารป้อนมีแนวการไหลตั้งฉากกับผิวหน้าของเมมเบรน (Dead-end) (ชันทอง สุนทรภา, 2547)

การกรองโดยใช้กระบวนการเมมเบรน เมื่อเดินระบบแบบไหลตามขวาง ความดันที่ผ่านเมมเบรน (Transmembrane pressure) คือ

$$P_{tm} = \left( \frac{P_f + P_c}{2} \right) - P_p \quad (2.24)$$

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

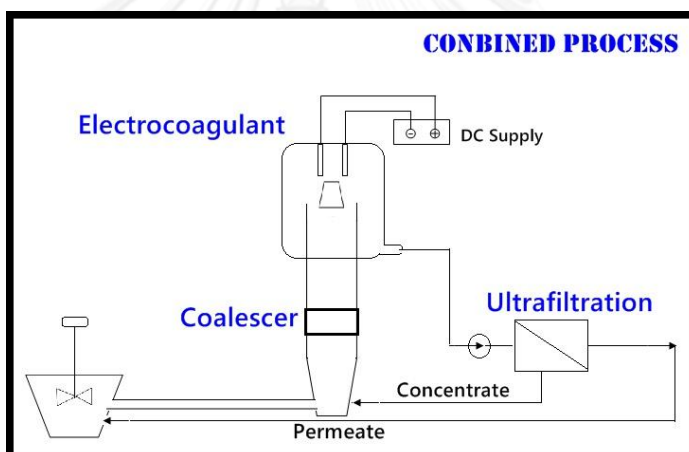
โดยอัตราการไหลของน้ำเพอมีเอทที่ไหลผ่านกระบวนการเมมเบรนขึ้นกับพื้นที่หน้าตัดเมมเบรนที่น้ำไหลผ่านดังนี้

$$Q_p = F_w A \quad (2.25)$$

เมื่อ	$Q_p$	คือ อัตราการไหลของน้ำเพอมีเอท (กิโลกรัม/วินาที)
	$F_w$	คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมีเอท (กิโลกรัม/ตารางเมตร.วินาที)
	$A$	คือ พื้นที่ของเมมเบรน (ตารางเมตร)

## 2.10 แนวคิดของการพัฒนากระบวนการร่วม

น้ำมันมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ มักมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำทำได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อหยดน้ำมันมีขนาดเล็ก เพื่อประหยัดต้นทุน และระยะเวลาในการบำบัด ดังนั้นในการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนน้ำมันจึงมีการใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทำให้หยดน้ำมันรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แล้วใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเพื่อทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันเพื่อให้หยดน้ำมันสามารถรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้อีกครั้ง โดยกระบวนการดังกล่าว เรียกว่า กระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ นอกจากนี้กระบวนการเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชันที่มีขนาดของช่องว่างในเมมเบรนเพียง 0.002 ถึง 1 ไมครอน ทำให้เมมเบรนชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำได้ดี ด้วยข้อดีของกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์และกระบวนการเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชันนี้ จึงทำให้เกิดแนวคิดในการใช้กระบวนการเหล่านี้ร่วมกันเพื่อนำน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่



ภาพที่ 2-12 แนวคิดกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์กับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

กระบวนการร่วมจะเดินระบบโดยเริ่มจาก เติมน้ำละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันก่อนเข้าสู่คอลัมน์ เป็นการยึดอายุการใช้งานของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ จากนั้นให้น้ำเสียไหลเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ อนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพในขั้นต้นแล้วเมื่อเคลื่อนผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์จะรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ได้เร็วยิ่งขึ้น และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบนผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันอีกครั้ง เป็นการเพิ่มปริมาณของน้ำมันที่ต้องการแยกออกจากน้ำ ซึ่งสังเกตได้จากความหนาของชั้นน้ำมันด้านบนจะเพิ่มขึ้น จากนั้นนำน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ เข้าสู่กระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันเพื่อทำการกรองให้น้ำทิ้งที่ใสสะอาดมากยิ่งขึ้น

เนื่องจากกระบวนการร่วมมีความซับซ้อนในการเดินระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษากลไกการทำงานของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โพรสตาติกโคอะเลสเซอร์และกระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อความเข้าใจในกลไกการทำงานและปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการร่วม ทั้งนี้เพื่อสามารถเสนอแนวคิดในการออกแบบกระบวนการร่วมในสภาวะการทำงานจริงสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการร่วมนี้ ได้ทำการศึกษางานวิจัยโดยแบ่งตามกลุ่มงานวิจัยดังนี้

### 1. กลุ่มงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับลักษณะของน้ำมันในน้ำเสีย

#### 2.11.1 Boyson T.K. และคณะ (2007)

ได้ทำการศึกษาความเป็นประจุลบของน้ำมันบริสุทธิ์ (Pure oil) และพฤติกรรมการรวมตัวกันของน้ำมัน โดยเตรียมสารตัวอย่างจากน้ำมันโบรมอดอดีเคน (Bromododecane : BDD) ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 1.308 กรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาณ 0.2 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 25 มิลลิลิตร และทำการกำจัดแก๊สละลายที่อยู่ในสารผสม จากนั้นเขย่าสารผสมในหลอดทดลองด้วยมือเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที เพื่อให้หยดน้ำมันกระจายตัวในน้ำ จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล ก่อนนำสารตัวอย่างไปทำการวัดขนาดของหยดน้ำมันและศักย์ซีต้า (zeta potential) ซึ่งในการวัดศักย์ซีต้าของหยดน้ำมันจะทำการวัดในระบบของสารตัวอย่างที่พีเอชแตกต่างกัน โดยเราจะควบคุมพีเอชของระบบด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในสารตัวอย่าง อีกทั้งในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในช่วงความเข้มข้น 1 - 10 มิลลิโมลาร์ เพื่อเพิ่มความแรงของไอออน (Ionic strength) ในสารละลาย

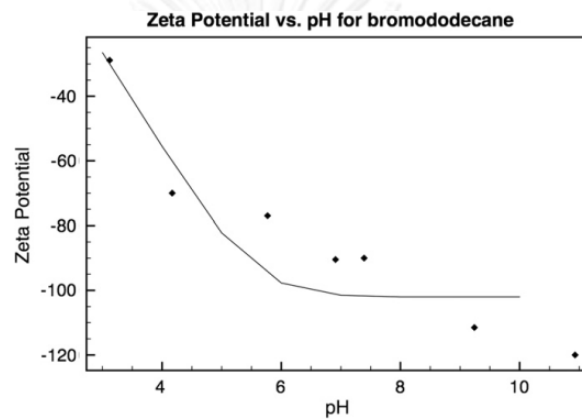
#### ผลการศึกษา

1. ความเป็นประจุไฟฟ้าที่ผิวของหยดน้ำมันโดยธรรมชาติจะไม่ขึ้นกับการดูดซับคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) แต่ขึ้นกับการดูดซับไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) อิสระที่อยู่ในสารละลาย และสำหรับพีเอชของค่าหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหยดน้ำมันจะมีค่าคงที่ด้วย โดยไฮดรอกซิลไอออนจะถูกดูดซับไปจนกว่าพลังงานอิสระที่ใช้ในการดูดซับไอออนของหยดน้ำมันเท่ากับพลังงานเนื่องจากอำนาจไฟฟ้าสถิตที่ผิวของหยดน้ำมัน

2. จากการประยุกต์ใช้สมการ Poisson-Boltzmann theory for 1:1 electrolyte พิจารณาการดูดซับไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ของหยดน้ำมันจะได้ สมการแสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นของประจุที่ผิวของหยดน้ำมัน

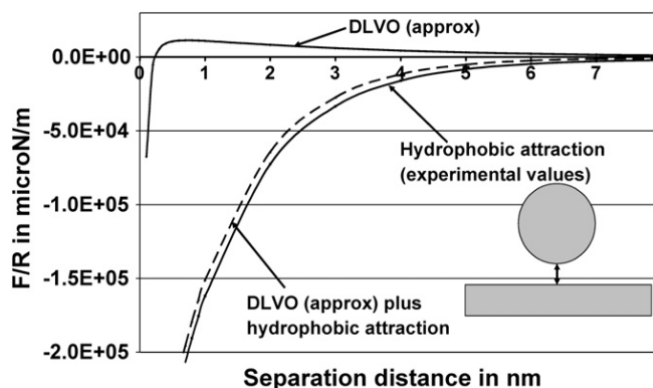
$$\sigma_0 = [8\epsilon_0\epsilon_r kTC_b]^{1/2} \sinh\left[\frac{y_0}{2}\right] = \frac{-qN_0 [\text{OH}^-]_b \exp(y_0)}{(K_{\text{OH}} + [\text{OH}^-]_b \exp(y_0))}$$

3. เมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้น ผิวของหยดน้ำมันจะมีค่าศักย์ซีต้าสูงขึ้นด้วย แต่จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวที่พีเอชค่าหนึ่ง เนื่องจากพื้นที่ผิวของหยดน้ำมันที่ใช้ดูดซับไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) มีจำกัด และในทางปฏิบัติการวัดค่าความหนาแน่นประจุทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศละลายลงสู่ระบบทำให้ค่าพีเอชของสารละลายลดลง ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดลองคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎี



ภาพที่ 2-13 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ซีต้าของอนุภาคน้ำมันกับค่าพีเอช  
(Boyson T.K. และคณะ, 2007)

4. ผลการทดลองจากการศึกษาการรวมตัวของหยดน้ำมันคลาดเคลื่อนจากการคำนวณทางทฤษฎี DLVO ค่อนข้างมาก เนื่องจากคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของหยดน้ำมันทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างหยดน้ำมันขึ้นเรียกว่า Hydrophobic interaction แรงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้เป็นแรงดึงดูดระหว่างหยดน้ำมันเนื่องจากโซเดียมไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปลดความหนาของชั้นกระจายที่ผิวของหยดน้ำมันส่งผลให้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผิวของหยดน้ำมันมีค่าลดลง จึงช่วยให้หยดน้ำมันสามารถรวมตัวกันได้ดีขึ้น เมื่อคำนวณโดยรวมแรงที่เกิดจาก Hydrophobic interaction เข้ากับทฤษฎี DLVO พบว่าผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น



ภาพที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมตามทฤษฎี DLVO ผลของ Hydrophobic interaction กับและผลรวมของพลังงานตามทฤษฎี DLVO กับ Hydrophobic interaction ที่ระยะห่างระหว่างหยดน้ำมันแตกต่างกัน (Boyson T.K. และคณะ, 2007)

### สรุปผลการศึกษา

หยดน้ำมันมีประจุเป็นลบเนื่องจากความสามารถในการดูดซับไฮดรอกซิลไอออนในสารละลาย จึงเกิดศักย์ซีต้าขึ้นที่ผิวของหยดน้ำมัน ทั้งนี้เมื่อระบบมี pH สูงขึ้นในระบบจะมีไฮดรอกซิลไอออนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ศักย์ซีต้าสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ค่าดังกล่าวจะสูงขึ้นได้จนถึงจุดอิ่มตัวหนึ่งๆ ทั้งนี้ประจุลบและศักย์ซีต้าที่ผิวของหยดน้ำมันนี้ทำให้หยดน้ำมันมีอำนาจทางไฟฟ้าสถิต จึงเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างหยดน้ำมันส่งผลให้หยดน้ำมันรวมตัวกันได้ยาก โดยเฉพาะหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็ก เพราะน้ำหนัก แรงลอยตัว และแรงดึงดูดระหว่างมวลของหยดน้ำมันจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักเนื่องจากไฟฟ้าสถิตนั่นเอง อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของหยดน้ำมันทำให้เกิด Hydrophobic interaction ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างหยดน้ำมัน เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้หยดน้ำมันสามารถรวมตัวกันได้ดียิ่งขึ้น

## 2. กลุ่มงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับกลไกการทำงานและปัจจัยที่ส่งผลต่อโคอะเลสเซอร์

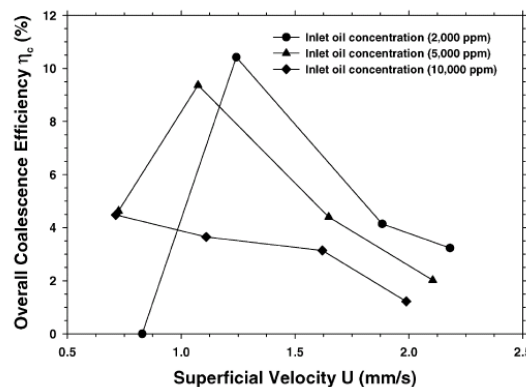
### 2.11.2 Li J. และคณะ (2005)

ได้ทำการศึกษารวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในน้ำ โดยใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ซึ่งตัวแปรที่จะทำการศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียความยาวของตัวกลาง และ ขนาดของเส้นใย อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้เป็นท่อสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.3 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร ทำการทดลองโดยใช้รูปแบบการไหลในแนวนอน (Horizontal flow) ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ เส้นใยโพลีพรพิลีน เส้นใยไนลอน และ โพลีพรพิลีนเม็ด โดยประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ สำหรับตัวกลางแบบเส้นใย และตัวกลางแบบเม็ด ตามลำดับ สามารถคำนวณจาก

$$\eta_c = \frac{-\ln Y}{\left( \frac{3(1-\phi)S + (16C_0(1-\phi) / \pi d_f \phi)}{(\pi d_f(1-S))(1+(d_i/d_f))} \right) L}$$

$$\eta_c = \frac{-\ln Y}{\left( \frac{9(1-\phi)S + (24C_0(1-\phi) / \pi d_g \phi)}{(2\pi d_g(1-S))(1+(d_i/d_g))} \right) L}$$

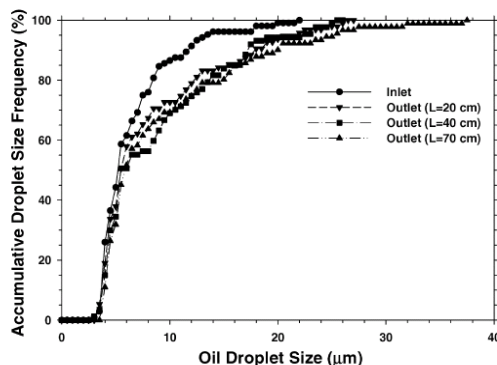
เมื่อ $\eta_c$	ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์	S	ค่าดีกรีของความอิมิตัว
$\phi$	ค่าความพรุนของตัวกลาง	$C_0$	ความเข้มข้นของน้ำมัน
$d_f$	ขนาดของเส้นใย	$d_g$	ขนาดของตัวกลางแบบเม็ด
$d_i$	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของน้ำมันในน้ำเสียเข้า		
Y	อัตราส่วนของอนุภาคน้ำมันในน้ำทิ้งต่อน้ำเสียเข้าระบบ		



ภาพที่ 2-15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์กับความเข้มข้นของน้ำมัน (Li J. และคณะ, 2005)

### ผลการศึกษา

1. ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียเพิ่ม
2. เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันมีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะลดลง
3. ความยาวของชั้นตัวกลางมีผลต่อการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันน้อยมาก
4. เส้นใยขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันมากกว่าเส้นใยขนาดใหญ่เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันมากกว่าเส้นใยขนาดใหญ่



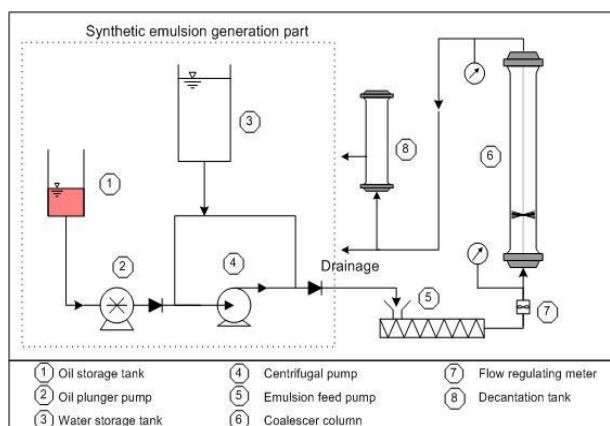
ภาพที่ 2-16 การรวมตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความยาวของชั้นตัวกลางต่างๆ  
(Li J. และคณะ, 2005)

### สรุปผลการศึกษา

1. โคอะเลสเซอร์ที่ให้น้ำเสียไหลในแนวนอน ความยาวของตัวกลางจะไม่มีผลต่อการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน
2. จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าโคอะเลสเซอร์ ดังนั้นในการทดลองจึงสามารถหาช่วงของอัตราการไหลที่เหมาะสมในการบำบัดให้ได้ประสิทธิภาพสูงได้
3. ความเข้มข้นของน้ำเสียและชนิดของตัวกลางที่ใช้ จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดอิมัลชันของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

### 2.11.3 ญัฐวิญญ์ ชาวเลิศพรคิยา (2552)

ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ซึ่งศึกษาและเสนอโมเดลทำนายประสิทธิภาพของแนวทางการบำบัดแบบผสมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดในรูปอิมัลชัน ตลอดจนศึกษาผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส และความเร็วในการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดซึ่งพิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (ทีไอซี) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย โดยใช้น้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร



ภาพที่ 2-17 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง (ณัฐวิญญู ชวลิตพรศิยา, 2552)

จากผลการศึกษาพบว่าความสูงของชั้นตัวกลางและความเร็วของน้ำเสีย มีผลประสิทธิภาพการบำบัดอิมัลชันของกระบวนการบำบัดแบบผสม นอกจากนี้ ค่าตัวแปรประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการกระทบ การเกาะติด และการตกตะกอนสามารถประยุกต์ใช้ในโมเดลเพื่อทำนายประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบจากการลดลงของพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

### 3. กลุ่มงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับกลไกการทำงานและปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี

#### 2.11.4 Chen X และคณะ (1999)

ทำการศึกษาเพื่อหาระบบที่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียจากร้านอาหาร โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน อุปกรณ์ประกอบด้วย ถังปฏิกิริยาขนาด 0.3 ลิตร ถังแยกสลัดจ์ขนาด 1.2 ลิตร ใช้ขั้วไฟฟ้าขนาด 140×44×3 มิลลิเมตร จำนวน 5 ขั้ววางห่างกัน 6 มิลลิเมตร โดยมีพื้นที่ทำปฏิกิริยา 56 ตารางเซนติเมตรต่อขั้ว

#### ผลการศึกษา

1. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเข้าระบบ และค่าการนำไฟฟ้ามีผลกับประสิทธิภาพในการบำบัด
2. ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 15 นาที และเวลาในการตกตะกอน 1.5 ชั่วโมง
3. น้ำเสียถูกปรับสภาพให้เป็นกลางได้
4. ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันมากกว่าร้อยละ 94

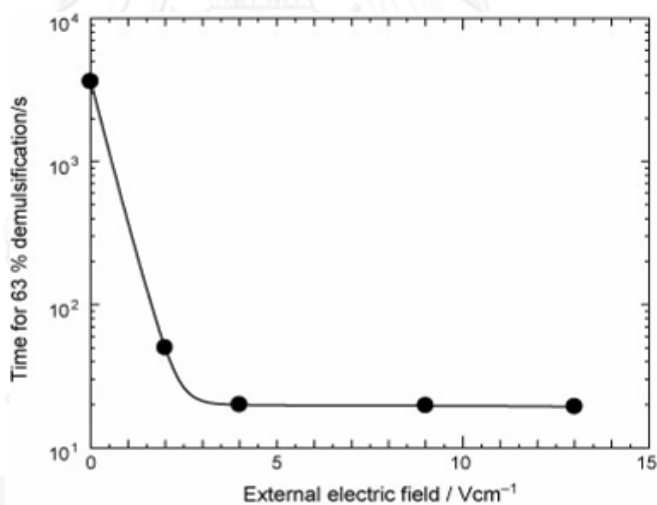


### 2.11.5 Ichikawa T.และคณะ (2007)

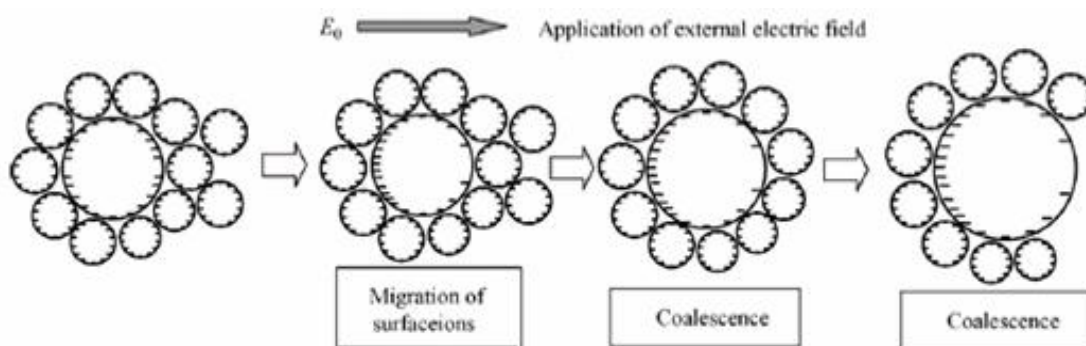
ทำการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันในน้ำโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ทำการเตรียมอิมัลชันโดยผสมน้ำมันกับน้ำในอัตราส่วน 3:2 แล้วเขย่าให้มากกว่า 100 ครั้ง จนผสมกันภายในกรวยแยก (Separating funnel) โดยมีสารลดแรงตึงผิวปริมาณ 0.2 มิลลิโมลต่อลิตร ของ sodium 2-naphthyl sulfonate

#### ผลการศึกษา

1. เมื่อใส่สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มมากกว่า 4 โวลต์/เซนติเมตร จะสามารถเหนี่ยวนำประจุบนผิวของอนุภาคน้ำมันให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและอนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันได้ภายในเวลา 20 วินาที
2. เมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าจะเกิดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ส่งผลต่อประจุที่ผิวของอนุภาค ทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถเคลื่อนที่ได้ และเกิดเป็นช่องว่างที่สามารถทำให้อนุภาคน้ำมันอื่นๆ สามารถเข้ามารวมตัวจนมีอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้



ภาพที่ 2-18 เวลาที่ใช้ทำลายเสถียรภาพอิมัลชันเมื่อผ่านสนามไฟฟ้า (Ichikawa T.และคณะ, 2007)



ภาพที่ 2-19 การทำลายเสถียรภาพด้วยไฟฟ้า (Ichikawa T.และคณะ, 2007)

### สรุปผลการศึกษา

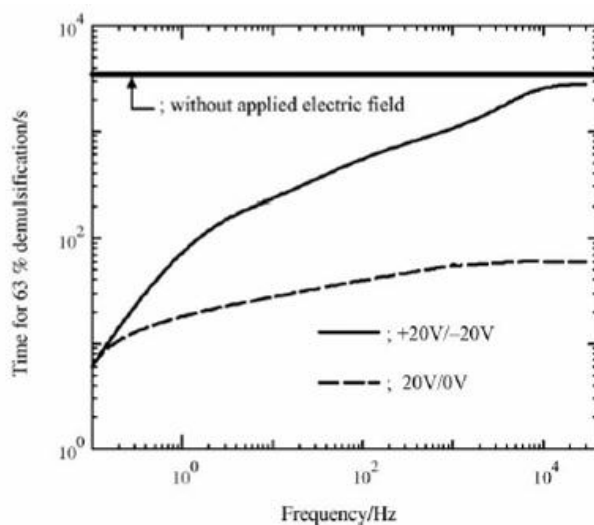
สนามไฟฟ้าทำให้ประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันเกิดการเคลื่อนที่และสามารถรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันอื่นๆ ได้จนมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ามากกว่า 4 โวลต์/เซนติเมตร

#### 2.11.6 Ichikawa T และคณะ (2006)

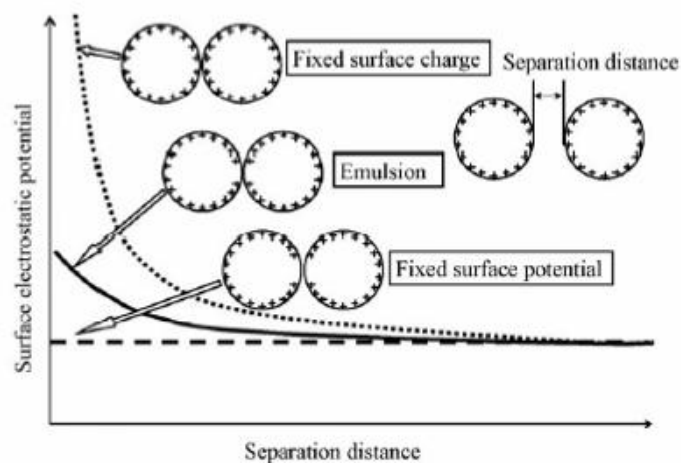
ทำการศึกษาความมีเสถียรภาพของน้ำมันที่กระจายตัวในน้ำ เมื่อประจุที่ผิวอนุภาคน้ำมันมีการเคลื่อนที่ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ เวลาในการทำลายเสถียรภาพ เตรียมอิมัลชันโดยการผสมน้ำมันกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 ที่เติมสารลดแรงตึงผิว 0.2 มิลลิโมลต่อลิตร ของ sodium 2-naphthyl sulfonate แล้วเขย่าให้มากกว่า 100 ครั้ง จนผสมกันในกรวยแยก (Separating funnel) ใช้แผ่นสแตนเลสตีลเป็นขั้วไฟฟ้าขนาด  $3.2 \times 5$  เซนติเมตร วางห่างกัน 3 เซนติเมตร จุ่มลงในอิมัลชันปริมาตร 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ จากนั้นวัดปริมาตรอิมัลชันที่ถูกทำลายเสถียรภาพในฟังก์ชันของเวลา

### ผลการศึกษา

1. จากการทดลอง พบว่าถ้าให้กระแสไฟฟ้าความถี่ 0.1 เฮิรตซ์ ความต่างศักย์ +20 โวลต์/0 โวลต์อิมัลชันจะถูกทำลายเสถียรภาพไป 63 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 5 วินาที เนื่องจากไม่มีการหน่วงของประจุ
2. เมื่อให้กระแสไฟฟ้าความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ความต่างศักย์ +20 โวลต์/-20 โวลต์ ไม่สามารถทำลายเสถียรภาพได้เพราะการเคลื่อนที่ของประจุเกิดการหน่วงขึ้น
3. อนุภาคน้ำมันสามารถถูกทำลายเสถียรภาพและรวมตัวกันได้โดยไม่ต้องผ่านสนามไฟฟ้าแต่จะใช้เวลามากที่สุด
4. อิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำจะถูกทำลายเสถียรภาพอย่างรวดเร็ว เมื่อผ่านสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่า 10 โวลต์/เซนติเมตร



ภาพที่ 2-20 กระแสไฟฟ้ากับการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชัน  
(Ichikawa T.และคณะ, 2006)



ภาพที่ 2-21 ศักย์ไฟฟ้ากับการเคลื่อนที่ของประจุที่ผิวอนุภาคน้ำมัน (Ichikawa T.และคณะ, 2006)

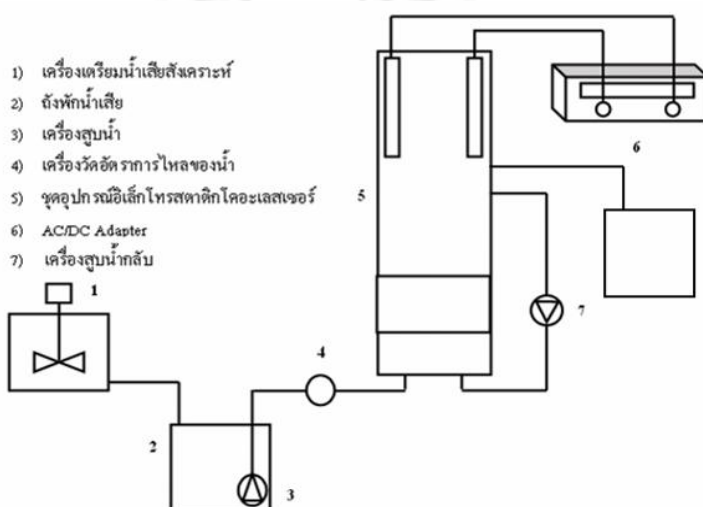
### สรุปผลการศึกษา

1. การเคลื่อนที่ของประจุที่ผิวอนุภาคเกิดจากการเข้าใกล้กันของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ประจุเคลื่อนที่ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวอนุภาคลดลง เท่ากับการลดแรงผลักระหว่างอนุภาค ดังนั้นอนุภาคน้ำมันจึงสามารถรวมตัวกันได้
2. เวลาในการทำลายเสถียรภาพ เรียงจากเร็วไปช้า คือ ความต่างศักย์ +20 โวลต์/0 โวลต์, +20 โวลต์/-20 โวลต์ และ 0 โวลต์ ตามลำดับ

#### 4. กลุ่มงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับกลไกการทำงานและปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการอิมัลชันไมโครสตาติกโคเอสเสเซอร์

##### 2.11.7 นางสาวสุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์ (2552)

ได้ทำการศึกษการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร่วมกับสารลดแรงตึงผิวประจุลบชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ด้วยกระบวนการอิมัลชันไมโครสตาติกโคเอสเสเซอร์สำหรับเดินระบบแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง โดยศึกษาเพื่อหาสถานะของ ความสูงของชั้นตัวกลาง ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย ชนิดขั้วไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโดยการเติมสารละลายอิมัลชันไมโครสตาติกโคเอสเสเซอร์



ภาพที่ 2- 22 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิมัลชันไมโครสตาติกโคเอสเสเซอร์ (สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552)

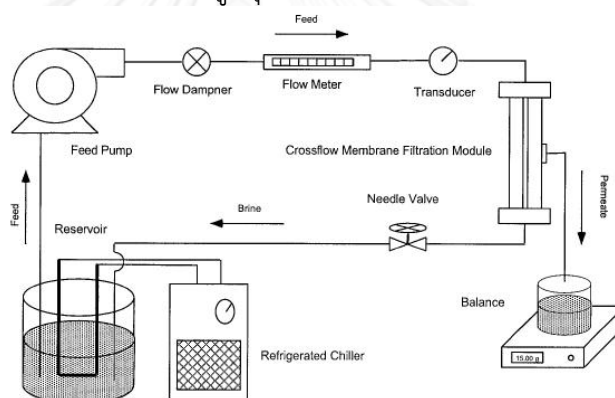
#### ผลการศึกษา

พบว่าในการเดินระบบแบบต่อเนื่องควรวางตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยสามารถใช้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าบริเวณด้านล่างแทนการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของน้ำมัน ในขณะที่การวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 เซนติเมตรและศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ สามารถส่งผลดีต่อ ทั้งประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงการเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมันน้ำมัน ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า (Electrostatic coalescence) โดยประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มต่ำให้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปนเปื้อนสูง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ เมื่อทำการเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์เข้าคอลัมน์ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมงและค่าศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ จะช่วยเพิ่มระยะเวลาและเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคน้ำมันให้มากขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดและความหนาของชั้นน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นกว่า 15 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

## 5. กลุ่มงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับกลไกการทำงานและปัจจัยที่ส่งผลต่อเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

### 2.11.8 Seungkwan Hong และคณะ (1997)

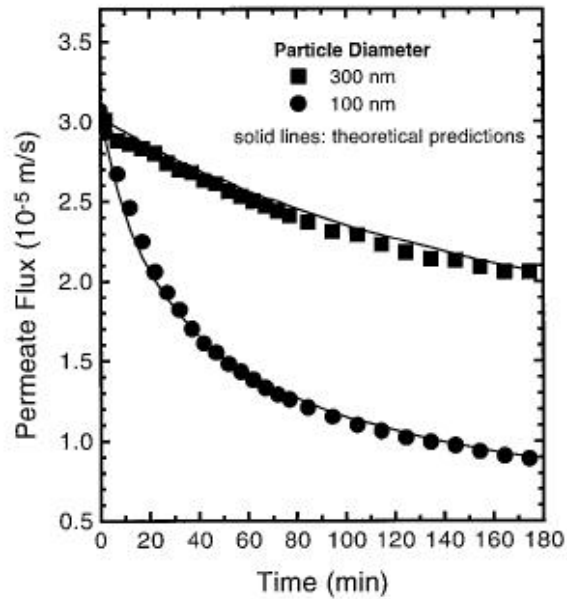
ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลให้เพอมีเอทพลักซ์จากการกรองแบบไหลตัดตามขวางในผ่านเมมเบรน โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ขนาดของอนุภาคหรือมลสารที่เคลื่อนผ่านเมมเบรน ความเข้มข้นของมลสาร ความดันที่ใช้ในการกรอง ความเร็วการกรอง โดยเตรียมคอลลอยด์จากสารประกอบซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 2 ชนิด คือ PST-1 และ PST-3 ซึ่ง PST-1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร มีความหนาแน่น 2.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ PST-3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 นาโนเมตร มีความหนาแน่น 2.28 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คอลลอยด์นี้จะมีเสถียรภาพที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 ทำการกรองผ่านเมมเบรนที่มีลักษณะท่อยาว 250 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร และมีขนาดรูพรุน 0.02 ไมโครเมตร



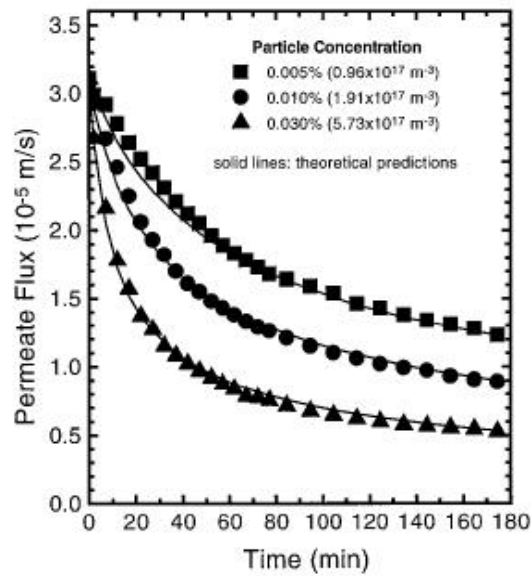
ภาพที่ 2-23 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง (Seungkwan Hong และคณะ, 1997)

### ผลการศึกษา

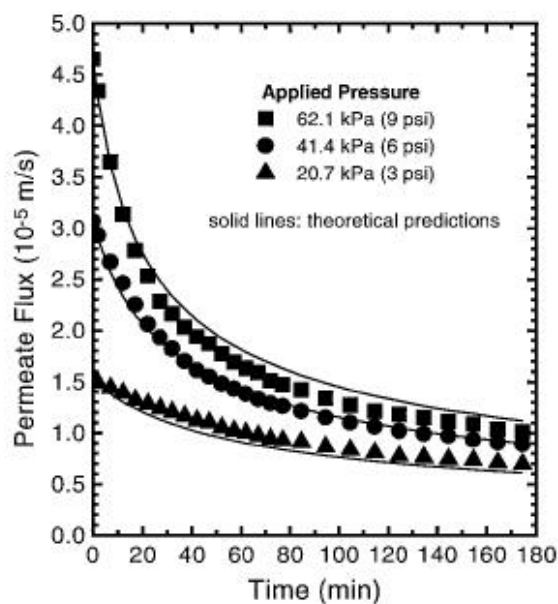
จากการศึกษาพบว่า เพอมีเอทพลักซ์ จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออนุภาคหรือมลสารที่กรองผ่านเมมเบรนมีขนาดเล็ก ความดันในการกรองสูง ความเร็วในการกรองสูง และ ความเข้มข้นของมลสารเพิ่มมากขึ้นนอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่ความเข้มข้นของมลสารสูงจะพบการอุดตันของเมมเบรนแบบชั้นเค้ก จึงสามารถใช้แบบจำลอง Happel cell ในการอธิบายการอุดตันแบบชั้นเค้กที่เกิดขึ้นตามเวลา



ภาพที่ 2-24 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอเมอเทฟลักซ์กับขนาดของอนุภาค 100 และ 300 นาโนเมตร ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Seungkwan Hong และคณะ, 1997)



ภาพที่ 2-25 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอเมอเทฟลักซ์ กับความเข้มข้นของมลสาร (Seungkwan Hong และคณะ, 1997)

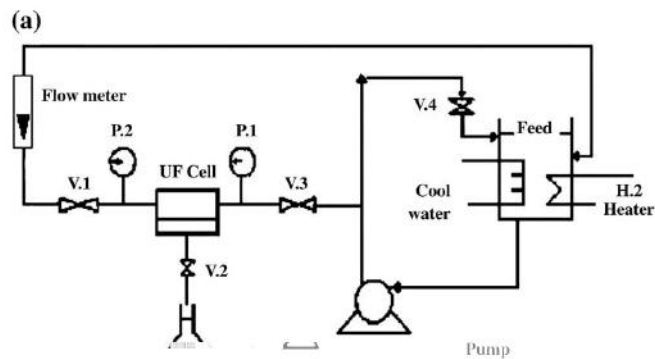


ภาพที่ 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอเมตฟลักซ์กับความดันที่ใช้ในการกรอง  
(Seungkwan Hong และคณะ, 1997)

#### 2.11.9 Salahi และคณะ (2010)

ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดันที่ใช้ในการกรองผ่านเมมเบรน ความเร็วของน้ำเสียเข้าและพีเอชที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันจากที่ออกมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่ Tehran โดยออกแบบตัวแปรดังนี้ เติมน้ำที่ ความดัน (TMP) 1.5, 3 และ 4.5 บาร์ อุณหภูมิ 25, 37.5 และ 50 องศาเซลเซียส ใช้อัตราเร็วโดยน้ำเสียไหลแบบตามขวาง (CFV) 0.25, 0.75 และ 1 เมตรต่อวินาที ควบคุมพีเอชของน้ำเสียที่ 4, 7 และ 10

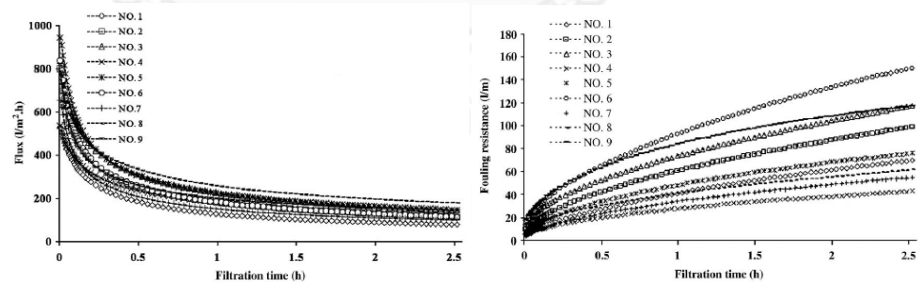
เมมเบรนที่ใช้ในการศึกษาได้แก่อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด polyacrylonitrile (PAN) ที่มีขนาดรูพรุน 20,000 ดาลตัน โดยเดินระบบแบบไหลตามขวาง ศึกษากลไกในการเกิดการอุดตัน (fouling) โดยใช้ทฤษฎีและแบบจำลองการเกิดการอุดตันของ Hermia มาใช้ในการอธิบายการเกิดการอุดตันของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน



ภาพที่ 2-27 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง (Salahi และคณะ, 2010)

### ผลการศึกษา

1. ที่สภาวะความดันที่สูงที่สุด เท่ากับ 3 บาร์ อัตราเร็วที่ต่ำสุดเท่ากับ 0.25 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 37.5 องศาเซลเซียส และพีเอชเท่ากับ 7 จะทำให้เกิดแรงต้านทานการเกิดการอุดตันที่มากที่สุดและให้ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำสูงสุดเท่ากับ 950 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง
2. ที่สภาวะความดันต่ำสุดเท่ากับ 1.5 บาร์ อัตราเร็วเท่ากับ 0.75 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 37.5 องศาเซลเซียส พีเอชสูงสุด เท่ากับ 10 จะทำให้เกิดแรงต้านทานการเกิดฟาวลิงน้อยที่สุด แต่ให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำต่ำสุดเท่ากับ 530 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง
3. หลังจากใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดีขึ้น สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ 100% ความขุ่น 98% สามารถบำบัดน้ำมันได้ถึง 99% และ COD ลดลง 60%



ภาพที่ 2-28 ฟลักซ์ที่ลดลงตามเวลาและแรงต้านทานการเกิดการอุดตันเมื่อเดินระบบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน (Salahi และคณะ, 2010)



### สรุปผลการศึกษา

จากการทดลองการอธิบายเพอมีเอทฟลักซ์โดยการควบคุมระบบที่ อุณหภูมิ ความเร็ว ความดัน และพีเอช แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อการเกิดการอุดตัน โดยใช้แบบจำลองของ Hernia ในการพยากรณ์ การเกิดการอุดตันพบว่า แบบจำลองที่มีความแม่นยำที่สุดคือ แบบจำลองการเกิดชั้นเค้ก ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าการกรองน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันนี้เกิดการอุดตันของเมมเบรนมีลักษณะเป็นแบบการเกิดชั้นเค้กขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งสามารถทำความสะอาดได้โดยใช้สารเคมีในการทำความสะอาดเพื่อช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรน

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า น้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมีสมบัติเป็นคอลลอยด์ ที่ผิวของอนุภาคน้ำมันมีการดูดซับไฮดรอกซิลไอออน จนอนุภาคน้ำมันสามารถแสดงความเป็นประจุลบได้ ดังนั้นจึงเกิดแรงผลักระหว่างหยดน้ำมัน เกิดเป็นคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูงส่งผลให้การกำจัดน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำจึงทำได้ยาก นอกจากนี้หยดน้ำมันจะมีแรงผลักระหว่างกันแล้ว ยังมีแรงดึงดูดระหว่างมวลของหยดน้ำมัน น้ำหนักของหยดน้ำมัน และแรงลอยตัวด้วย เมื่อเสถียรภาพของหยดน้ำมันถูกทำลาย แรงผลักระหว่างหยดน้ำมันจะลดลง และลดลงจนน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างมวล ส่งผลให้หยดน้ำมันเข้าใกล้กันมากขึ้นจึงมีโอกาสรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำจึงสามารถทำได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีการเลือกใช้กระบวนการต่างๆ มาทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมัน เพื่อการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

### จากงานวิจัยที่ทำการศึกษาสรุปได้ว่า

- ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการไหลของน้ำเสียเข้าสู่โคอะเลสเซอร์ ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย ชนิดและรูปร่างของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ โดยข้อดีของกระบวนการโคอะเลสเซอร์คือ สามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำได้โดยใช้ต้นทุนอย่างประหยัด

- กระบวนการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันโดยใช้ไฟฟ้าพบว่าน้ำมันในน้ำจะถูกทำลายเสถียรภาพอย่างรวดเร็ว เมื่อผ่านสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ และมีระยะห่างระหว่างขั้วที่เหมาะสม โดยข้อดีของกระบวนการทางไฟฟ้าคือ สามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำได้ภายในระยะเวลาสั้นๆ อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพื้นที่ในการเดินระบบ

- ประสิทธิภาพที่ดีของกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ เกิดขึ้นเมื่อบางขั้วไฟฟ้าไว้ทางด้านบนเหนือตัวกลางโคอะเลสเซอร์ โดยน้ำเสียไหลเข้าทางด้านล่าง โดยประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ชนิดและรูปร่างของตัวกลาง อัตราเร็วของน้ำเสียเข้า ความเข้มข้นของน้ำมัน ชนิดของขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้อาจเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันก่อนส่งน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ เพื่อประหยัดเวลา ยืดอายุการทำงานของโคอะเลสเซอร์ และลดต้นทุนค่าไฟฟ้าในการบำบัดน้ำมัน

- เพอมีเอทฟลักซ์จากกระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ที่มีรูปแบบการไหลตามขวาง ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ในการกรองผ่านเมมเบรน อัตราเร็วของน้ำเสียเข้า ค่าพีเอชของน้ำเสีย และความเข้มข้นของน้ำมัน การอุดตันที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเมมเบรนเป็นแบบขั้นแค้กจึงต้องมีการใช้ สารเคมี เช่น สารลดแรงตึงผิวในการทำความสะอาดเมมเบรน และข้อดีของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันคือ สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ 100% ความขุ่น 98% สามารถบำบัดน้ำมันได้ถึง 99%

จะพบว่า ผลการทดลองสอดคล้องและสนับสนุนแนวคิดในการพัฒนากระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์กับกระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสำหรับ บำบัดและนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่

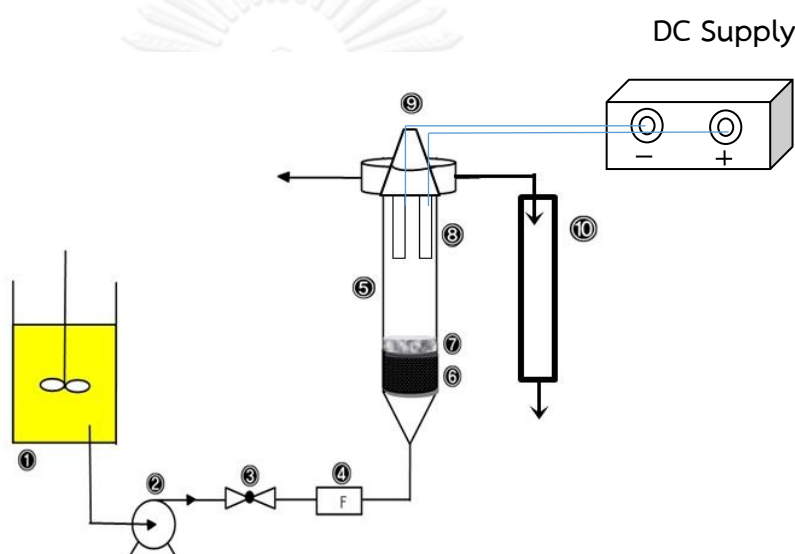


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 การติดตั้งชุดการทดลองของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการอิเล็กโทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน



- |                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| (1). ถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ | (6). ตัวกลางโคอะเลสเซอร์             |
| (2). เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง    | (7). Salting out device              |
| (3). วาล์วกันกลับ (Check valve) | (8). ขั้วไฟฟ้า                       |
| (4). เครื่องวัดอัตราการไหล      | (9). แผ่นช่วยตกตะกอน (Plate Settler) |
| (5). ถังปฏิกิริยา               | (10). ชุดอุปกรณ์อัลตราฟิลเตรชัน      |

ภาพที่ 3-1 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์ร่วมกับอัลตราฟิลเตรชัน

จากแผนผังการทดลองในภาพที่ 3-1 เริ่มทำการทดลอง โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำมันตัด ปั่นกวนจนน้ำเสียสังเคราะห์จะมีลักษณะคล้ายน้ำมันและเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันในถังปฏิกิริยา (1) แล้วสูบน้ำเสียด้วยปั๊ม (2) ทำการวัดอัตราการไหลด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (4) ก่อนส่งน้ำเสียจะเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์ (5)

โดยชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โพรสตาติกโคอะเลสเซอร์จะวางขั้วไฟฟ้า (8) ไว้เหนือตัวกลางโคอะเลสเซอร์ (6) และจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเครื่องแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรง (DC Supply) โดยมีวงแผ่นช่วยตกตะกอน (9) เหนือขั้วไฟฟ้าเพื่อช่วยเพิ่มโอกาสในการชนและสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมัน จากนั้นน้ำทิ้งจากระบบการอิเล็กทรอนิกส์โพรสตาติกโคอะเลสเซอร์จะนำเข้าสู่กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (10)

### 3.1.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. ชุดอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ประกอบด้วย ถังปฏิกิริยา 2 ชุด ทำด้วยวัสดุอะคริลิกใส โดยชุดที่ 1 มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ความสูง 80 เซนติเมตร ชุดที่ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 150 เซนติเมตร
2. ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ทำจากพลาสติกบริสุทธิ์ชนิดพอลิโพรไพลีน (Polypropylene : PP) 3 ลักษณะคือ
  1. ทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง ยาว 3-5 มิลลิเมตร
  2. เส้นใยขนาด กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 280 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร
  3. ทรงกระบอกกลวง เส้นผ่านศูนย์กลาง 5-6 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 3-2 ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ลักษณะ (ก) ทรงกลม (ข) เส้นใย (ค) ทรงกระบอกกลวง

3. ภาพสำหรับบรรจุตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) รูปทรงกระบอกโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร และสูง 12 เซนติเมตร



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์สำหรับบรรจุตัวกลางโคอะเลสเซอร์  
(ก) Salting out device (ข) ภาพสำหรับบรรจุตัวกลางโคอะเลสเซอร์

4. ขั้วไฟฟ้า  
ขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด คือ อะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม และ แกรไฟต์-แกรไฟต์ โดยมีความกว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 20 เซนติเมตรหนา 2 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา 100 ตารางเซนติเมตร



ขั้วอะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม

ขั้วแกรไฟต์-แกรไฟต์

ภาพที่ 3-4 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี

5. ชุดอุปกรณ์อัลตราฟิลเตรชัน  
ชุดอุปกรณ์อัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลองทำจากพลาสติก รูปทรงกระบอก โดยเมมเบรนทำจากวัสดุชนิด โพลีซัลโฟน (Polysulphone) ชนิด

ชอบน้ำ (Hydrophilic) ทนพีเอชได้ในช่วง 2- 13 และมีขนาดรูพรุน 0.01 ไมโครเมตร รองรับแรงดันได้สูงสุด 3 บาร์



กระบอกสำหรับใส่เมมเบรน

UF เมมเบรน

ภาพที่ 3-5 อุปกรณ์ที่ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

6. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรง
7. เครื่องสูบน้ำแบบหยอโข่ง ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 34 ลิตรต่อนาที บริษัท Mirano รุ่น PS-150
8. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible pump) ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 2500 ลิตรต่อชั่วโมง บริษัท Sonic รุ่น AP-2500
9. เครื่องวัดความขุ่น บริษัท HACH รุ่น 2100P
10. ถังเก็บน้ำพลาสติกขนาด 120 ลิตร
11. นาฬิกาจับเวลา
12. กล้องจุลทรรศน์ บริษัท Nikon รุ่น YS2-H
13. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล บริษัท Sony รุ่น dsc-s2000 และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ
14. ชุดทดสอบจาร์เทสต์
15. อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี
  - หลอดทดสอบวัดค่าซีไอดี ขนาด 16x150 มม. พร้อมฝาจากเกลียว ทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene, TFE)
  - ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memment รุ่น 600 สามารถให้ความร้อนอยู่ระหว่าง  $150 \pm 2$  °C

- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร
- กระจกบอกรวง (Cylinder) ขนาด 200, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- ปิเปต (Pipet) ขนาด 1, 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร

### 3.1.3 สารเคมีที่ใช้งานวิจัย

#### 1. น้ำมันตัด (Cutting Oil)

ตารางที่ 3-1 สมบัติของน้ำมันตัด รุ่น 3810150 บริษัท BP-Castrol (ประเทศไทย จำกัด)

ชนิดของน้ำมัน	น้ำมันตัด
ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	~1
ความหนืด (cps)	9.16
แรงตึงผิว (mN/m)	47.02
ความขุ่น (NTU)	1,356

#### 2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์

2.1 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride :  $\text{CaCl}_2$ )

#### 3 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ซีโอดี

3.1 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )

3.2 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.4 สารละลายมาตรฐาน EDTA

3.5 เฮกเซน (n-Hexane)

3.6 โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate)

3.7 น้ำกลั่น



### 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลองในงานวิจัย





### 3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเลียนแบบน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ผ่านการใช้งานแล้ว Castrol Cooledge BI ซึ่งมีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ความเข้มข้นโดยเตรียม น้ำมันตัดความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมและเติมน้ำให้ได้ปริมาตรรวม 1 ลิตร กวนผสมจนน้ำมันเข้ากันกับน้ำเกิดเป็นน้ำเสียเกิดลักษณะขุ่นขาวคล้ายน้ำมัน เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง ซึ่งในการศึกษานี้ แบ่งออกเป็น 6 ส่วนคือ

การทดลองที่ 1 ศึกษาเพื่อหาลักษณะและสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

การทดลองที่ 2 ศึกษาความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของแคลเซียมคลอไรด์ด้วยวิธีจาร์เทสต์ โดยเติมแคลเซียมคลอไรด์ลงในน้ำเสียความเข้มข้น 1 2 3 4 5 6 7 และ 8 กรัมต่อลิตร ทำการกวนเร็วและกวนช้า วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และขนาดของอนุภาคน้ำมัน

การทดลองที่ 3 ศึกษาลักษณะของตัวกลางโคอะเลสเซอร์และกระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ชุดที่ 1 และเดินระบบแบบทีละเท ศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกระบวนการโคอะเลสเซอร์ คือ ลักษณะของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ (ทรงกลม, เส้นใย, ทรงกระบอกกลวง) ความสูงของชั้นตัวกลาง (2 4 6 8 และ 10 เซนติเมตร) อัตราเร็วในการไหลของน้ำเสียเข้า (2.0 3.4 4.8 และ 6.8 เซนติเมตรต่อวินาที)

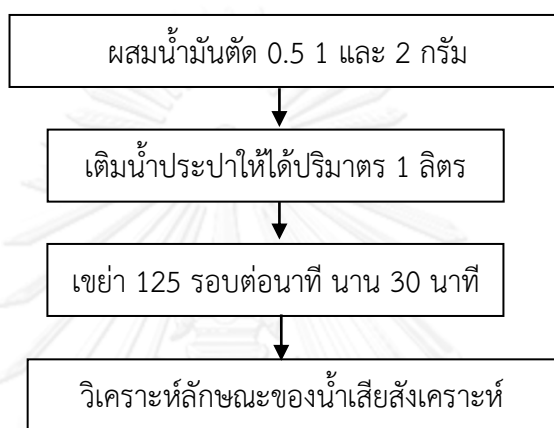
การทดลองที่ 4 ศึกษากระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ชุดที่ 2 และเดินระบบแบบทีละเท ศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกระบวนการร่วม โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 5 ศึกษากระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ชุดที่ 2 และเดินระบบแบบทีละเท ศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ ชนิดของขั้วไฟฟ้า(อะลูมิเนียมและแกรไฟต์) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (2 5 และ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดยมีระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร สำหรับขั้วอะลูมิเนียม และ ระยะห่าง 1 เซนติเมตรสำหรับขั้วแกรไฟต์ (สุดสิริ ฐิตสุวัฒน์, 2552) ร่วมกับสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 6 ศึกษากระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้สภาวะเหมาะสมจากการทดลองที่ 3-5 ร่วมกับการใช้เมมเบรน

### 3.3.1 ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียสังเคราะห์

**การทดลองที่ 1 :** ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด  
ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของอนุภาคน้ำมัน ค่าความขุ่น ค่าพีเอชและค่าซีโอดีเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์



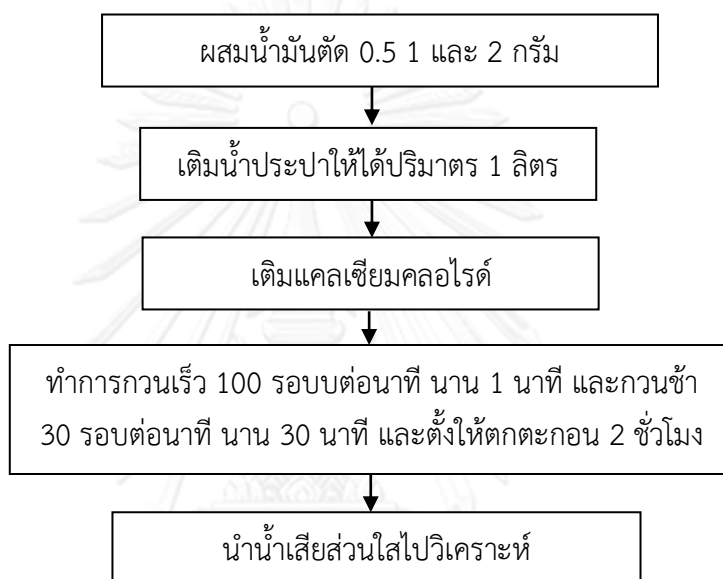
ภาพที่ 3-6 แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ 2. ชนิดของน้ำมัน 3. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. น้ำประปา 2. น้ำมันตัด 3. 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ขนาดอนุภาคน้ำมัน 2. ค่าความขุ่น 3. คุณภาพน้ำ 4. ค่าพีเอช	1. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2. ค่าความขุ่น 3. ค่าซีโอดี 4. ค่าพีเอช

### 3.3.2 ศึกษาการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันตัดด้วยสารเคมีโดยวิธีจาร์เทสต์

**การทดลองที่ 2 :** ศึกษาปริมาณของสารเคมีที่เหมาะสมด้วยแคลเซียมคลอไรด์ โดยเตรียมน้ำเสียที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตร เติมแคลเซียมคลอไรด์ 1 2 3 4 5 6 7 และ 8 กรัมต่อลิตร ทำการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที นาน 1 นาที และกวนช้า 30 รอบต่อนาที นาน 30 นาที และตั้งให้ตกตะกอน 2 ชั่วโมง นำน้ำเสียส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าความขุ่น และขนาดของอนุภาคน้ำมัน



ภาพที่ 3-7 แผนผังการศึกษาปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมต่อการทำลายเสถียรภาพน้ำมัน

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรในการศึกษาปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมต่อการทำลายเสถียรภาพน้ำมัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นน้ำเสีย	1. 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
2. ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์	2. 1 2 3 4 5 6 7 และ 8 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำทิ้ง	1. ค่าความขุ่น
2. ขนาดของอนุภาคน้ำมัน	2. ขนาดของอนุภาคน้ำมัน

### 3.3.3 ศึกษาสภาวะเหมาะสมต่อการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ร่วมกับกระบวนการทางเคมี

#### การทดลองที่ 3.1 : ศึกษาลักษณะของตัวกลางโคอะเลสเซอร์

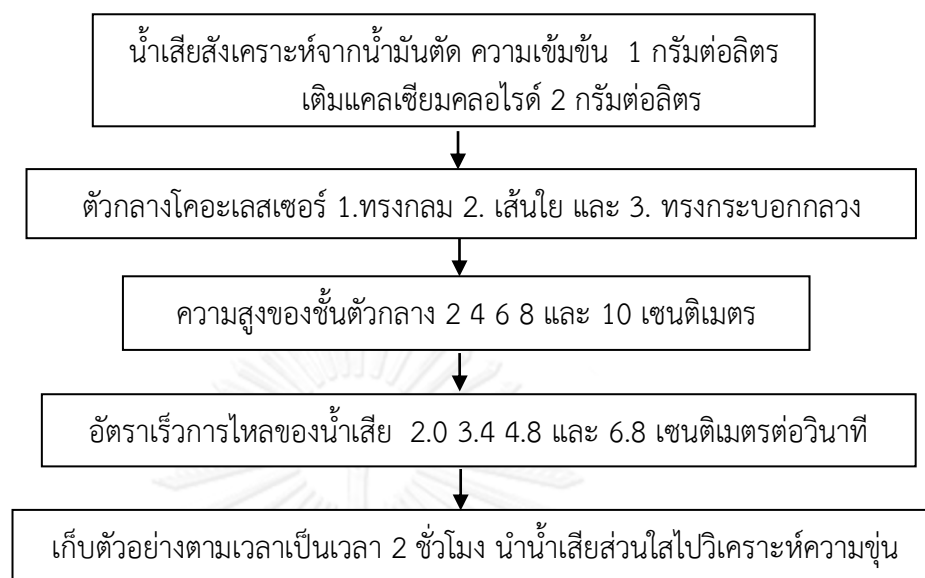
ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ 3 ลักษณะ คือ 1. ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร 2. เส้นใยที่มีขนาด กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 280 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร และ 3. ทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-6 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ความพรุน และ มุมสัมผัสระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาสมบัติของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะของตัวกลาง	1. ทรงกลม เส้นใยและทรงกระบอกกลวง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ความพรุน 2. มุมสัมผัสระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง	1. ความพรุน 2. มุมสัมผัสระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง

#### การทดลองที่ 3.2 : ศึกษาเพื่อหาสภาวะเหมาะสมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ทำการศึกษาลักษณะของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ความสูงของชั้นตัวกลาง และ อัตราเร็วการไหลของน้ำเสียขาเข้าที่เหมาะสมต่อการรวมอนุภาคน้ำมัน โดยใช้พลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน 3 ลักษณะคือ 1. ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร 2. เส้นใยที่มีขนาด กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 280 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร และ 3. ทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-6 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร และทำการทดลองที่ความสูงของชั้นตัวกลาง 2, 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตร โดยทำการทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการเติม แคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตรและสูบน้ำเสียสังเคราะห์เข้าทางด้านล่างของถังปฏิกิริยาด้วยอัตราเร็ว 2.0, 3.4, 4.8 และ 6.8 เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์แล้ว จะปล่อยน้ำเสียไหลต่อไปยังถังตกตะกอน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียส่วนใสที่ก้นถังตกตะกอนทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าความขุ่น โดยทำการเดินระบบแบบที่ละเท



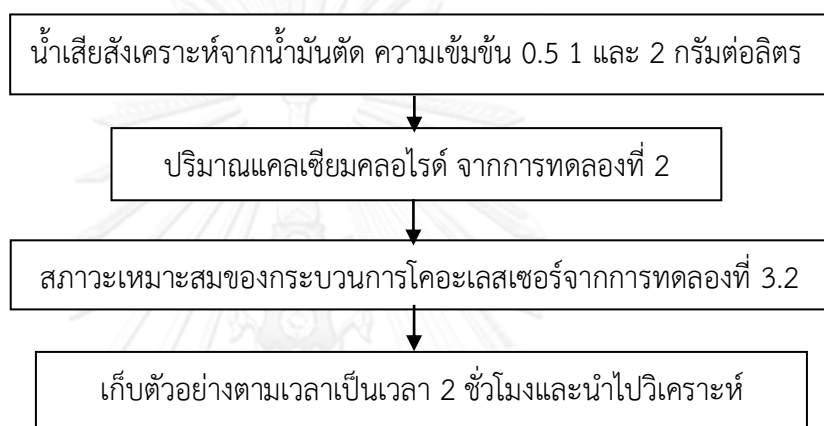
ภาพที่ 3-8 แผนผังการศึกษาสภาวะเหมาะสมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษาสภาวะเหมาะสมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 2. ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ 3. ชนิดตัวกลาง	1. 1 กรัมต่อลิตร 2. 2 กรัมต่อลิตร 3. พลาสติก PP
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะตัวกลางทรงกลม 2. ลักษณะตัวกลางแบบเส้นใย 3. ลักษณะตัวกลางทรงกระบอกกลาง 4. อัตราเร็วเข้าของน้ำเสีย 5. ความสูงของชั้นตัวกลาง	1. เส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มม. 2. กว้าง 10 มม. ยาว 280 มม. หนา 0.5 มม. 3. เส้นผ่านศูนย์กลาง 5-6 มม. ยาว 10 มม. 4. 2.0 3.4 4.8 และ 6.8 เซนติเมตร ต่อวินาที 5. 2 4 6 8 และ 10 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำทิ้ง	1. ค่าความชุ่ม

**การทดลองที่ 3.3 :** ศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์

โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ค่า คือ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร และเติมแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2 สูบน้ำเสียสังเคราะห์เข้าทางด้านล่างของถังปฏิกิริยาของโคอะเลสเซอร์ที่สภาวะเหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2 เมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์แล้วจะปล่อยน้ำเสียไหลต่อไปที่ถังตกตะกอน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียส่วนใสที่ก้นถังตกตะกอนทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าความขุ่นและขนาดของอนุภาคน้ำมัน โดยทำการเดินระบบแบบที่ละเท



ภาพที่ 3-9 แผนผังศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กับกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กับกระบวนการโคอะเลสเซอร์

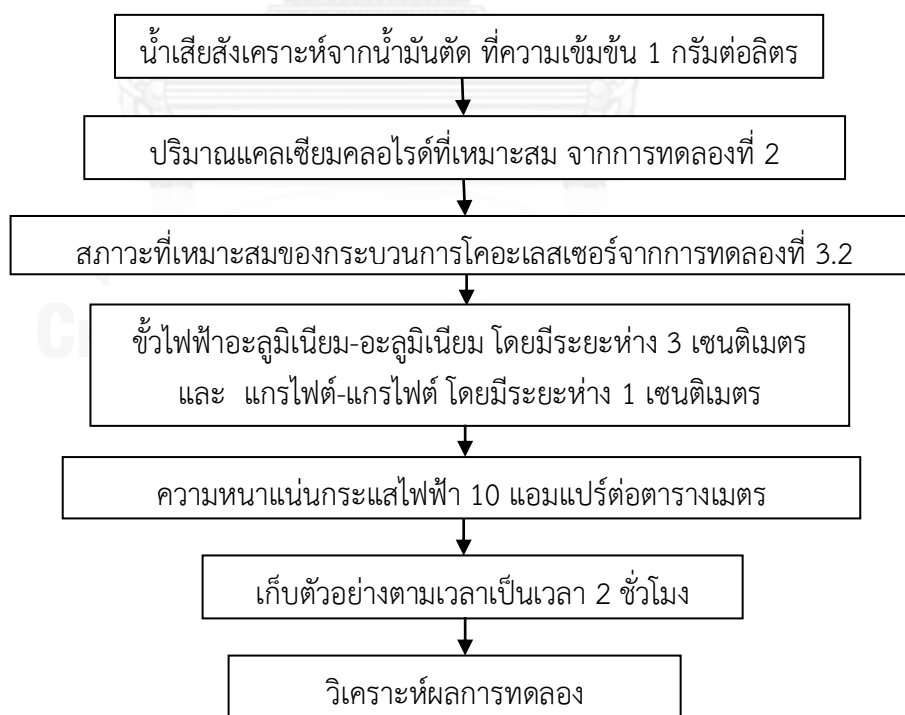
ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นน้ำเสีย	1. 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์	1. จากการทดลองที่ 2
2. ลักษณะของตัวกลาง	2. จากการทดลองที่ 3.2
3. ความสูงของชั้นตัวกลาง	3. จากการทดลองที่ 3.2
4. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	4. จากการทดลองที่ 3.2
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำทิ้ง	1. ค่าความขุ่น
2. ขนาดของหยดน้ำมัน	2. ภาพถ่ายจากกล้องดิจิตอล

### 3.3.4 ศึกษาสภาวะเหมาะสมต่อการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

**การทดลองที่ 4** : ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน ด้วยกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยนำสภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จากการทดลองที่ 3.2 และปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพจากการทดลองที่ 2 มาศึกษาร่วมกับกระบวนการทางไฟฟ้า ทำการทดลองโดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ทางด้านบนเหนือตัวกลางโคอะเลสเซอร์ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยเดินระบบแบบทีละเท

#### **การทดลองที่ 4.1** : การศึกษาหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

การศึกษาหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อกระบวนการร่วม โดยทำการศึกษาที่สภาวะเหมาะสมของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2 และปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพจากการทดลองที่ 2 ร่วมกับกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ทางด้านบนของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ซึ่งทำการศึกษาค้นหาชนิดของขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด คือ อะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม โดยมีระยะห่าง 3 เซนติเมตร และ แกรไฟต์-แกรไฟต์ โดยมีระยะห่าง 1 เซนติเมตร (สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552) ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่บริเวณเหนือขั้วไฟฟ้าทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าความขุ่น โดยทำการเดินระบบแบบทีละเท



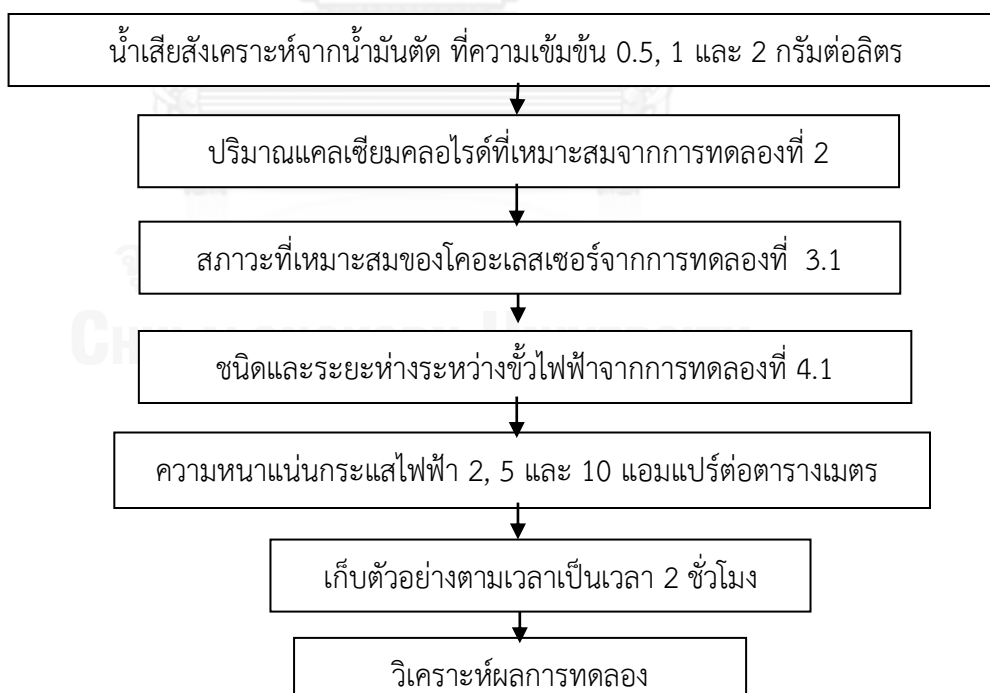
ภาพที่ 3-10 แผนผังการหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ 3. อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ 4. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	1. 1 กรัมต่อลิตร 2. จากการทดลองที่ 2 3. จากการทดลองที่ 3.2 4. 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดขั้วไฟฟ้า	1. อะลูมิเนียม และแกรไฟต์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1. ค่าความขุ่น

#### การทดลองที่ 4.2 : การศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

การศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อกระบวนการร่วม โดยทำการศึกษาที่สภาวะเหมาะสมของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.1 และปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพจากการทดลองที่ 2 ร่วมกับชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการทำลายเสถียรภาพน้ำมันจากการทดลองที่ 4.1 กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่บริเวณเหนือขั้วไฟฟ้าทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์ค่าความขุ่น และขนาดของอนุภาคน้ำมัน โดยทำการเดินระบบแบบทีละเท



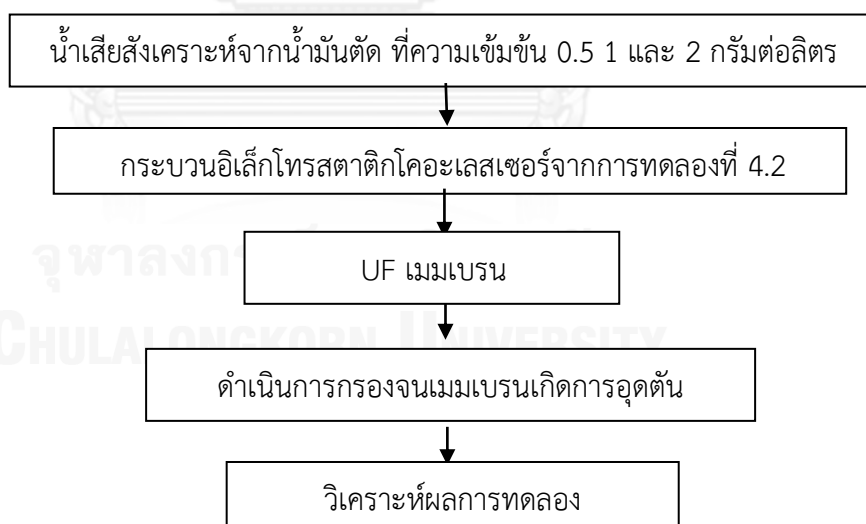
ภาพที่ 3-11 แผนผังการหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม



ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการศึกษาหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ 3. อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ 4. ชนิดของขั้วไฟฟ้า	1. 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตร 2. จากการทดลองที่ 2 3. จากการทดลองที่ 3.2 4. จากการทดลองที่ 4.1
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	1. 2, 5 และ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง 2. ขนาดของอนุภาคน้ำมัน	1. ค่าความขุ่น 2. ภาพถ่ายจากกล้องดิจิตอล

**การทดลองที่ 5 :** ศึกษากระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมี และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้สภาวะเหมาะสมของกระบวนการร่วมจากการทดลองที่ 4.2 ร่วมกับ UF เมมเบรน ทำการทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร วัดค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจากกระบวนการร่วม และทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 3-12 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. กระบวนการร่วม 3. เมมเบรน	1. 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร 2. จากการทดลองที่ 4.2 3. UF
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1. ค่าความขุ่น และ ซีโอดี

### 3.4 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3-10 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
- ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ - ลักษณะตัวกลางโคอะเลสเซอร์ - ความสูงของชั้นตัวกลาง - อัตราเร็วการไหล - ชนิดขั้วไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - คุณภาพน้ำทิ้ง ความขุ่น พีเอช ซีโอดี - ขนาดของอนุภาคน้ำมัน	- วิจัยาร์เทสต์  - ไม้มรทัด  - AC/DC Adapter  - 2130 B. Nephelometric Methode* - 4500 H <sup>+</sup> Electrometric Method* - 5220 C. Closed Reflux, Titration Method* - กล้องจุลทรรศน์ Nikon YS2-H กล้องถ่ายภาพดิจิทัล บริษัท Sony รุ่น dsc-s2000 และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ

หมายเหตุ \* : The Standard Methods for Determination of Water and Wastewater

## บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

ในส่วนนี้ นำเสนอผลการศึกษากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมีและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยงานวิจัยนี้ เริ่มต้นทำการศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันตัด และศึกษาความเป็นไปได้ในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันโดยใช้สารเคมี นอกจากนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทางเคมีร่วมกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมีและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดของแต่ละกระบวนการ อาทิเช่น ชนิดและลักษณะของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ ความสูงของชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ อัตราการไหลของน้ำเสีย ชนิดของขั้วไฟฟ้า และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

### 4.1 การศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

งานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำมันตัด Castrol Cooledge BI ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ทำการปั่นกวนน้ำเสียตัวอย่าง 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการศึกษาลักษณะสมบัติของของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 4-1 โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ค่าซีโอดี (COD) โดยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) ค่าความขุ่น ด้วยเครื่องวัดความขุ่น ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100P ค่าพีเอชเริ่มต้น (pH) ขนาดอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ด้วยวิธีการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $D_{mean}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ 4-1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter,  $D_{32}$ ) คำนวณได้จากสมการ 4-2 ตามลำดับ ภาพถ่ายอนุภาคน้ำมันและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ดังภาพที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ

$$D_{mean} = \frac{\sum d_e dN}{\sum dN} \quad (4-1)$$

$$D_{32} = \frac{\sum d_e^3 dN}{\sum d_e^2 dN} \quad (4-2)$$

โดย  $d_e$  คือ ขนาดของอนุภาคน้ำมัน (ไมครอน)

ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นน้ำเสีย		
	0.5 g/l	1.0 g/l	2.0 g/l
ความขุ่น ( NTU )	787.67	1,521.17	3,103.33
ซีไอดี ( mg/l )	5,750	11,920	22,300
พีเอช	7.81	7.84	7.85
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (µm)	0.524	0.713	0.855
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบซอเทอร์(µm)	0.847	0.822	1.011

จากตารางที่ 4-1 พบว่า เมื่อน้ำมันตัดละลายน้ำและถูกกวนผสมให้เข้ากันจะมีลักษณะเหมือนน้ำมันจัดเป็นอิมัลชันที่มีความคงตัว (stabilized emulsion) เนื่องจากน้ำมันตัดที่ใช้ในการทดลองมีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ด้วย โดยสารลดแรงตึงผิวจะแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมันซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กจนไม่สามารถรวมตัวกันได้ อนุภาคน้ำมันจึงมีเสถียรภาพและยากต่อการบำบัด น้ำมันตัดที่ละลายน้ำไม่ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำประปาเปลี่ยนแปลง ปริมาณของน้ำมันตัดที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความขุ่นและค่าซีไอดีของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยค่าความขุ่นของน้ำเสียมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคน้ำมัน และน้ำเสียทั้ง 3 ความเข้มข้นมีขนาดอนุภาคไม่แตกต่างกันมากนัก (ประมาณ 1 ไมครอน) ซึ่งมีขนาดเล็กมากกล่าวคืออนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กไม่สามารถลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำเสียได้ในระยะเวลาจำกัดแต่ละแขวนลอยอยู่ในน้ำ แสงจึงส่องผ่านได้ยากจึงส่งผลให้ค่าความขุ่นเพิ่มขึ้น

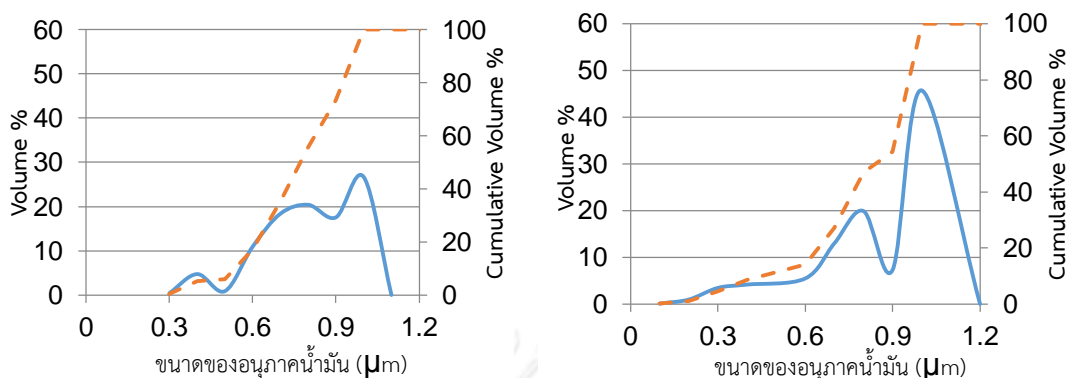


(ก)

(ข)

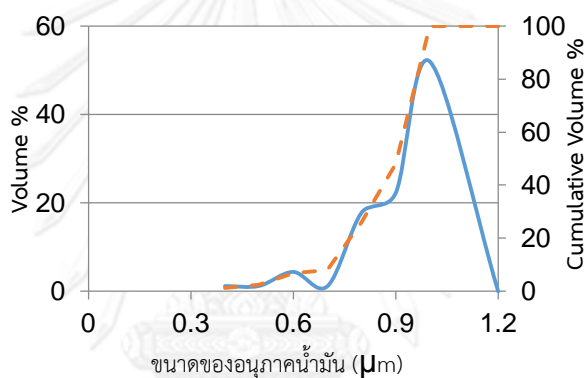
(ค)

ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น (ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1 กรัมต่อลิตร และ (ค) 2 กรัมต่อลิตร



(ก)

(ข)



(ค)

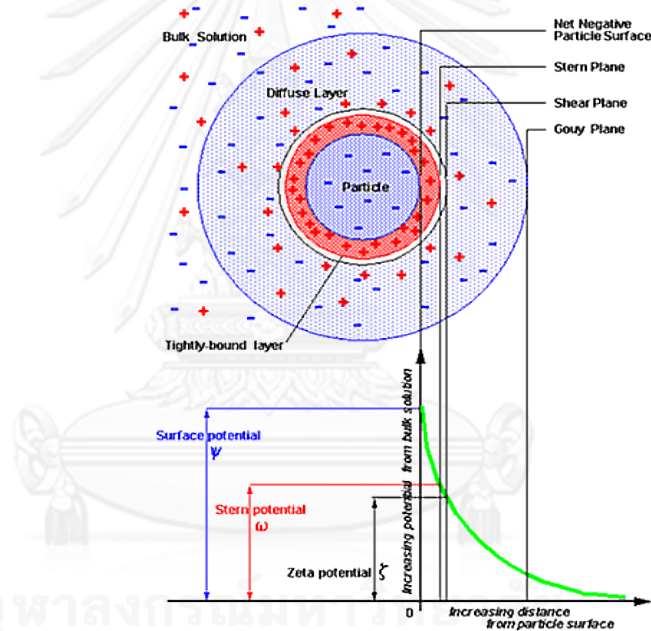
— Volume %    - - - Cumulative Volume %

ภาพที่ 4-2 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น

(ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1.0 กรัมต่อลิตร (ค) 2.0 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4-1 และ 4-2 พบว่า เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ดูการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันและถ่ายภาพอนุภาคน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกล้องดิจิทัลพบว่าอนุภาคน้ำมันมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดจึงจัดเป็นอิมัลชันชั้นสอง (Secondary emulsion) น้ำมันตัด Castrol Cooledge BI ที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนผสมของน้ำมันแร่ (Mineral oil) สารเพิ่มคุณภาพ (Additive) และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) จึงทำให้อนุภาคน้ำมันมีเสถียรภาพสูงและแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย โดยเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียเกิดจากประจุลบของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของประจุบนพื้นผิวของอนุภาคน้ำมันและประจุบริเวณใกล้เคียง โดยประจุชนิดเดียวกัน (Coions) ก็บอนุภาคน้ำมันจะถูกผลักและประจุชนิดตรงข้าม (Counterions) ก็บอนุภาคน้ำมันจะถูกดึงดูดมาติดกับพื้นผิวของอนุภาคน้ำมัน เรียกว่า Stern layer ส่วนประจุที่ถูกดึงดูดเข้ามาแต่ไม่ได้ถูกดึงดูดติดกับพื้นผิวอนุภาคน้ำมันจะกระจายตัวอยู่รอบๆอนุภาค

น้ำมันเรียกว่า ชั้นกระจาย (Diffuse layer) รวมเรียกว่า Double layer แสดงในภาพที่ 4-3 โดย Double layer นี้เกิดขึ้นเพื่อทำให้อนุภาคน้ำมันเป็นกลางทางไฟฟ้าซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวของอนุภาคน้ำมันกับของเหลวรอบๆอนุภาคเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (Surface potential) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเข้มข้นของอนุภาคน้ำมัน โดยบริเวณรอยต่อระหว่าง Stern layer ซึ่งมีประจุไฟฟ้าหนาแน่น กับ ชั้นกระจาย ซึ่งมีประจุไฟฟ้าไม่หนาแน่น เกิดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า โดยเรียกศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อนี้ว่า ศักย์ซีต้า (Zeta potential) ซึ่งใช้บอกความมีเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน กล่าวคือค่าศักย์ซีต้าที่สูงบ่งบอกถึงความมีเสถียรภาพที่มาก เนื่องจากค่าศักย์ซีต้าสูงนั้นจะส่งผลให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคน้ำมันสูงขึ้น อนุภาคจึงไม่สามารถเข้าใกล้กันและรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ จึงทำให้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดยากต่อการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การแยกด้วยแรงโน้มถ่วง ดังผลการทดลองในตารางที่ 4-2



ภาพที่ 4-3 ลักษณะการกระจายตัวของประจุบนอนุภาคน้ำมัน

(<http://www.uned.es/094224>. 20 มีนาคม 2557)

ตารางที่ 4-2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยวิธีการแยกด้วยแรงโน้มถ่วงในเวลา 120 นาที

ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ (กรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น
0.5	0.76%
1.0	0.73%
2.0	1.02%

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดจึงจำเป็นต้องทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันโดยการทำให้อายุขัยสั้นลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการศึกษาระบบการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันโดยใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อลดจำนวนประจุของอนุภาคน้ำมัน ก่อนนำน้ำเสียไปบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพต่อไป

#### 4.2 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันโดยใช้สารเคมีด้วยวิธีจาร์เทสต์

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจัดเป็นอิมัลชันชั้นสองซึ่งมีเสถียรภาพสูง การบำบัดน้ำจึงต้องอาศัยแนวทางในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันหรือคอลลอยด์ โดยอาศัยกลไก 4 แบบ (มันสัน ตันสุเวศม์, 2542) ดังนี้

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) เป็นการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุชนิดตรงข้ามกับประจุของคอลลอยด์ เพื่อให้เกิดการสะเทินประจุ ทำให้ชั้นกระจายของอนุภาคมีความหนาลดลงและค่าซีตาโพเทนเชียลลดลง

2. กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้า (Charge neutralization) เป็นการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุชนิดตรงข้ามกับคอลลอยด์ในปริมาณมาก เพื่อดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ลดลง เป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แต่เมื่อเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่มากเกินไปอาจทำให้ประจุที่ผิวคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุชนิดตรงข้าม (Charge reversal) และกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งเนื่องจากแรงผลักทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

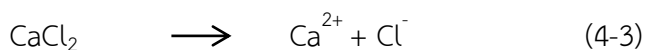
3. การห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ (Sweep floc coagulation) เป็นการเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดในปริมาณที่มากเกินไป และเกิดการตกผลึกขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอนุภาคคอลลอยด์จะทำหน้าที่เป็นแกนกลางในผลึกหรืออาจรวมตัวกันกับผลึก ซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ช่วยให้คอลลอยด์ตกตะกอนได้เร็วขึ้น

4. การใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer bridging) แต่เนื่องจากโมเลกุลโพลีเมอร์สามารถเกาะติดกับอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง อาจทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized particle)

งานวิจัยนี้ต้องการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยคาดหวังว่าสามารถนำน้ำมันตัดกลับมาใช้งานใหม่ได้จึงไม่ต้องการให้เกิดตะกอนของเคมีขึ้นในกระบวนการบำบัด ดังนั้นกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบและการใช้โพลีเมอร์จึงไม่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้

ในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันด้วยสารเคมี โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในการแตกตัวให้ประจุบวกเพื่อลดจำนวนประจุลบที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งก่อให้เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายหรือดูดติดผิวทำลายประจุ ส่งผลให้ศักย์ซีตาของอนุภาคน้ำมันลดลง เมื่ออนุภาคน้ำมันสามารถเข้าใกล้กันได้จะเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างอนุภาคน้ำมันช่วยเพิ่มโอกาสให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นได้ ตามทฤษฎีดีแอลวีโอ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดตะกอนเคมีและไม่

ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเปลี่ยนแปลง แคลเซียมคลอไรด์สามารถละลายน้ำและแตกตัวให้แคลเซียมไอออน และ คลอไรด์ไอออน ดังสมการที่ 4-3



จากงานวิจัยของ G.Rios และคณะ (1998) พบว่าอะลูมิเนียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์มีความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันได้ใกล้เคียงกันและไม่ก่อให้เกิดตะกอนเคมีในน้ำเสียด้วย ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์แทนแคลเซียมคลอไรด์ได้ ซึ่งงานวิจัยของ G.Rios และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาการแยกน้ำมันตัดออกจากโดยใช้สารเคมีทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน จึงมีการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณสูงถึง 40 กรัมต่อลิตรสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร และใช้การเพิ่มอุณหภูมิถึง 40 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่ใช้สารเคมีในปริมาณต่ำๆ เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการใช้สารเคมีในการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันสำหรับการบำบัดขั้นต้นและศึกษาเพื่อหากระบวนการทางกายภาพมาช่วยบำบัดในภายหลังเพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมี

ปริมาณของประจุบวกที่แตกตัวได้ขึ้นกับปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาปริมาณของแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมต่อการทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน โดยใช้วิธีจาร์เทส ซึ่งทำการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที และกวนช้า 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และตั้งไว้ 120 นาที จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบซอเทอร์และแบบเฉลี่ยของอนุภาคน้ำมัน เพื่อคำนวณความเร็วในการลอยตัวตามกฎของสโตกส์ วัดค่าพีเอชและวัดค่าความขุ่นของน้ำเสียเพื่อคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น



ตารางที่ 4-3 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียหลังจากเติม  $\text{CaCl}_2$  120 นาที

ความเข้มข้นของน้ำเสีย (g/l)	ปริมาณ $\text{CaCl}_2$ (g/l)	พีเอช	$D_{\text{mean}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{32}$ ( $\mu\text{m}$ )	ความเร็วลอยตัว (m/s)
0.5	0	7.82	0.524	0.847	$1.53 \times 10^{-8}$
	1	7.85	0.853	0.962	$4.04 \times 10^{-8}$
	2	7.82	0.961	1.129	$5.13 \times 10^{-8}$
	3	7.91	0.964	1.137	$5.17 \times 10^{-8}$
	4	7.92	1.039	1.593	$6.00 \times 10^{-8}$
	5	7.85	1.932	3.689	$2.07 \times 10^{-7}$
	6	7.81	3.002	4.490	$5.01 \times 10^{-7}$
	7	7.82	3.015	4.487	$5.05 \times 10^{-7}$
	8	7.81	3.107	5.012	$5.37 \times 10^{-7}$
1.0	0	7.82	0.713	0.822	$2.82 \times 10^{-8}$
	1	7.82	1.001	1.298	$5.57 \times 10^{-8}$
	2	7.81	1.105	1.309	$6.79 \times 10^{-8}$
	3	7.92	1.050	1.330	$6.12 \times 10^{-8}$
	4	7.80	1.081	1.931	$6.50 \times 10^{-8}$
	5	7.82	2.057	3.324	$2.35 \times 10^{-7}$
	6	7.85	3.201	4.918	$5.70 \times 10^{-7}$
	7	7.84	3.340	5.102	$6.20 \times 10^{-7}$
	8	7.82	3.391	5.189	$6.40 \times 10^{-7}$
2.0	0	7.82	0.855	1.011	$4.06 \times 10^{-8}$
	1	7.89	1.127	1.068	$7.06 \times 10^{-8}$
	2	7.85	1.175	1.392	$7.67 \times 10^{-8}$
	3	7.82	1.164	1.413	$7.53 \times 10^{-8}$
	4	7.85	1.164	1.393	$7.53 \times 10^{-8}$
	5	7.82	3.182	5.454	$5.63 \times 10^{-7}$
	6	7.84	3.553	9.617	$7.01 \times 10^{-7}$
	7	7.82	3.557	9.982	$7.03 \times 10^{-7}$
	8	7.81	3.602	9.995	$7.21 \times 10^{-7}$

จากตารางที่ 4-3 พบว่า เมื่อปริมาณของแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันโดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นประจุบวกไปสะเทินกับประจุลบที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมัน ส่งผลให้แรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคน้ำมันลดลง และเมื่ออนุภาคน้ำมันมีโอกาสเข้าใกล้กัน แรงดึงดูดระหว่างมวลหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ อนุภาคน้ำมันจึงสามารถรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นได้ และจะสามารถลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็วยิ่งขึ้นตามกฎ Stokes ดังสมการที่ 4-4 ค่าความขุ่นของน้ำเสียด้านล่างจึงลดลงตามเวลา ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระบวนการทางเคมีสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำได้

$$U_T = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_e^2}{18\mu} \quad (4-4)$$

เมื่อ	$U_T$	คือ ความเร็วลอยตัวของเฟสกระจาย (Dispersed phase) (m/s)
	$\Delta\rho$	คือ ผลต่างของความหนาแน่นของเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ( $\text{kg/m}^3$ )
	$d_e$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟสกระจาย (m)
	$\mu$	คือ ความหนืดพลศาสตร์ของเฟสต่อเนื่อง (Pa.s)
	$g$	คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{m/s}^2$ )

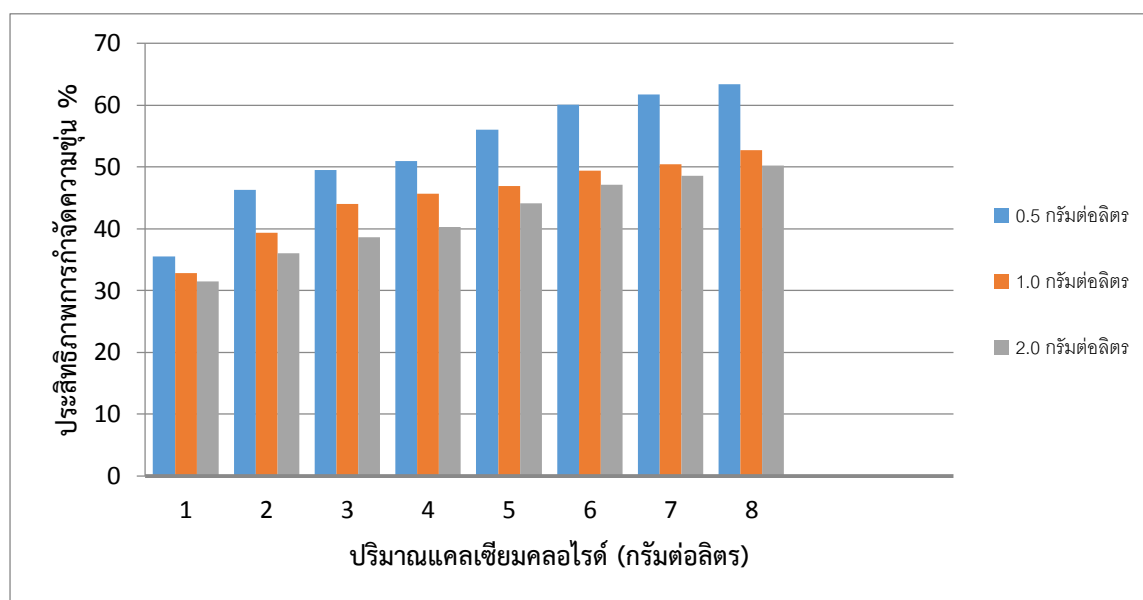
สำหรับกรณีน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เฟสกระจายคือน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง จากสมการที่ 4-4 จะเห็นว่าการเพิ่มความเร็วลอยตัวของอนุภาคน้ำมันสามารถทำได้ 4 วิธีคือ

1. การเพิ่มผลต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำและน้ำมัน
2. การเพิ่มอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
3. ลดค่าความหนืดของน้ำมัน
4. เพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมัน

การเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมันสามารถเพิ่มความเร็วลอยตัวได้มาก เนื่องจากความเร็วลอยตัวแปรผันตรงกับขนาดของอนุภาคยกกำลังสอง ดังนั้นการใช้สารเคมีในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันช่วยเพิ่มโอกาสให้อนุภาคมีเข้าใกล้และรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นได้ อนุภาคน้ำมันจึงลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำของน้ำเสียได้ภายในเวลาจำกัด เมื่อน้ำมันไปรวมตัวกันที่ผิวน้ำของน้ำเสีย จึงสามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้

การเติมปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เท่ากันในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงจะมีปริมาณน้ำมันมาก โอกาสที่จะเกิดการชนและรวมตัวกันระหว่างอนุภาคน้ำมันเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่จึงมีมากกว่าน้ำ

เสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันต่ำ น้ำมันจึงลอยขึ้นสู่ด้านบนของน้ำเสียได้เร็วขึ้นภายในเวลาที่เท่ากัน  
 ดังค่าความเร็วลอยตัวที่แสดงในตารางที่ 4-3



ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัดความชุ่มชื้นโดยใช้สารเคมีด้วยวิธีจาร์เทสต์

จากภาพที่ 4-4 พบว่าการเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2-4 กรัมต่อลิตร และ 6-8 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดความชุ่มชื้นที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญ และการเติมแคลเซียมคลอไรด์จะทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ความกระด้าง ปริมาณของแข็งละลาย และปริมาณคลอไรด์ในน้ำจึงเพิ่มสูงขึ้น (มันสิน ตันฑุลเวศม์) ดังนั้นการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกใช้ ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ 2 ค่า คือ 2 และ 6 กรัมต่อลิตร มาทำศึกษาร่วมกับกระบวนการบำบัดทางกายภาพอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบและเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด โดยเพิ่มโอกาสในการชนและสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมันแทนการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคลอไรด์

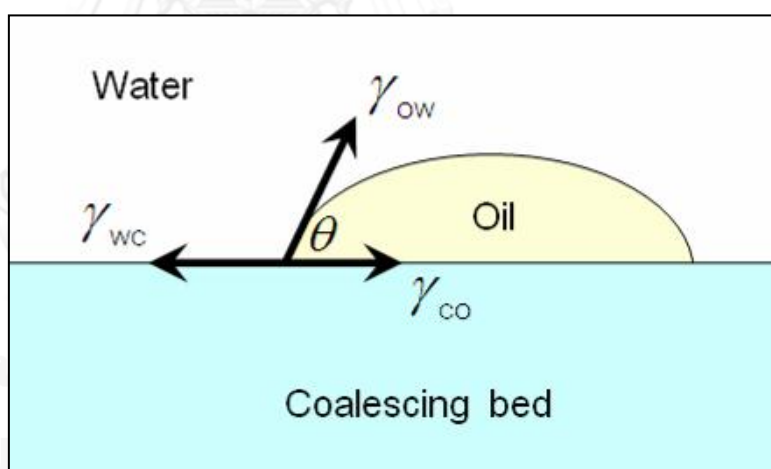
เมื่อน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมี ศักย์ซีต้าของอนุภาคน้ำมันจะลดลงส่งผลให้แรงผลักทางไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคน้ำมันลดลงด้วย ดังนั้นจึงควรเลือกกระบวนการทางกายภาพที่สามารถเพิ่มโอกาสในการชนและสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมัน ช่วยให้เกิดการกวนช้าเพื่อช่วยให้อนุภาคสามารถเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ หลังจากกวนเร็วในขั้นตอนการเติมสารเคมีซึ่งกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ และทำได้ง่ายคือกระบวนการโคอะเลสเซอร์ การศึกษาในส่วนต่อไปจึงเลือกทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในถึงปฏิกริยารูปทรงกระบอก โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ ชนิด ลักษณะ และความสูงของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ และอัตราการไหลของน้ำเสียเข้า

### 4.3 การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์โคalesceเซอร์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคalesceเซอร์ โดยทำการศึกษานิตและลักษณะของตัวกลาง ศึกษาความสูงของชั้นตัวกลาง และอัตราการไหลของน้ำเสียเข้า

#### 4.3.1 การศึกษาลักษณะของตัวกลาง

วัสดุที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคalesceเซอร์นั้น ควรเลือกวัสดุที่มีสมบัติความชอบน้ำมันหรือมีความไม่ชอบน้ำ (Oleophilic or hydrophobic material) ซึ่งวัสดุนั้นชอบที่จะให้น้ำมันเกาะติดเพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำ การยึดเกาะของอนุภาคน้ำมันที่ผิวของตัวกลางจะช่วยให้น้ำมันเกิดโอกาสในการชนและสัมผัสกัน เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก่อนที่จะหลุดออกจากชั้นตัวกลาง ความชอบน้ำมันสามารถดูได้จากค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง (Critical surface tension,  $\gamma_{CG}$ ) และค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ ซึ่งค่ามุมสัมผัสคือมุมระหว่างเส้นสัมผัสของอนุภาคน้ำมันกับพื้นผิว โดยอนุภาคน้ำมันอยู่นิ่งบนพื้นผิวนั้น



ภาพที่ 4-5 แรงตึงผิวระหว่างน้ำ น้ำมันและตัวกลาง (สุตสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552)

$$\gamma_{wc} = \gamma_{co} + \gamma_{ow} \cos \theta \quad (4-5)$$

เมื่อ  $\gamma_{wc}$  แรงตึงผิวระหว่างน้ำกับตัวกลาง

$\gamma_{co}$  แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง

$\gamma_{ow}$  แรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน

จากสมการที่ 4-5 พบว่าหากต้องการทราบค่ามุมสัมผัสจะต้องทราบค่าแรงตึงผิวทั้งหมดก่อน แต่เนื่องจากค่าแรงตึงระหว่างน้ำกับตัวกลาง ( $\gamma_{WC}$ ) และค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง ( $\gamma_{CO}$ ) นั้นทำการวัดได้ยาก จึงต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้การหยดน้ำมันและน้ำลงบนตัวกลางภายใต้บรรยากาศ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิวได้  
จะได้ว่า

$$\gamma_{CG} = \gamma_{CO} + \gamma_{OG} \cos\theta \quad (4-6)$$

$$= \gamma_{WC} + \gamma_{WG} \cos\theta \quad (4-7)$$

โดยที่ค่า  $\gamma_{CG}$  เป็นสมบัติเฉพาะของตัวกลาง เรียกว่า แรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง (Critical surface tension) ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีการของ Zisman (Method of zisman) โดยจะทำการหยดที่มีสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ กันลงบนผิวของตัวกลาง จากนั้นจึงทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแต่ละค่า เมื่อนำค่าแรงตึงผิวของน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ มาวาดกราฟเทียบกับค่าโคไซน์ของมุมสัมผัส ( $\cos\theta$ ) จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่าแรงตึงผิวของน้ำที่ให้ค่าโคไซน์เท่ากับ 1 คือ ค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง ( $\gamma_{CG}$ ) เมื่อทราบค่า  $\gamma_{CG}$  แล้วจะสามารถหาค่า  $\gamma_{CO}$  และ  $\gamma_{WC}$  ได้จากสมการที่ 4-6 และ 4-7 หลังจากนั้นก็จะหาค่ามุมสัมผัสได้จากสมการที่ 4-5

ถ้าพื้นผิวสามารถเปียกได้ด้วยของเหลวอย่างสมบูรณ์ ของเหลวจะแผ่ไปทั่วพื้นผิว มุมสัมผัสจึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นความไม่ชอบน้ำของตัวกลางสามารถบอกได้ด้วยค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันบนตัวกลาง โดยที่ตัวกลางที่ชอบน้ำมันจะให้ค่ามุมสัมผัสน้อยกว่าและจะมีค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลางต่ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้พลาสติกโพลีโพรไพลีน (Polypropylene : PP) เป็นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ (Aurelle, 1985) ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ  $68^\circ$  และมีค่าแรงตึงผิววิกฤต 29-31 mN/m (Sabreen 1991) ซึ่งมีค่าต่ำกว่า โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และไนลอน (Nylon) ซึ่งมีค่าแรงตึงผิววิกฤต 41-44 mN/m และ 33-46 mN/m ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ชนิดและรูปร่างลักษณะของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ก็ส่งผลต่อการยึดเกาะของอนุภาคที่ผิวของน้ำมันด้วย ในการทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาลักษณะของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่ทำจากพลาสติกโพลีโพรไพลีน 3 ลักษณะ คือ เม็ดกลม เส้นใย และทรงกระบอกกลวง โดยลักษณะสมบัติของตัวกลางแสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 สมบัติของตัวกลางโคอะเลสเซอร์

ลักษณะของตัวกลาง	รูปร่างของพลาสติกโพลีโพรไพลีน		
	ทรงกลม	เส้นใย	ทรงกระบอกกลวง
ความพรุน (-)	0.55	0.90	0.82
ขนาดของตัวกลาง (มิลลิเมตร)	4.5 – 5.5 (เส้นผ่านศูนย์กลาง)	10 × 280 × 0.5 (กว้าง×ยาว×หนา)	5 × 8 (เส้นผ่านศูนย์กลาง×ยาว)
$\theta_c$ (°)	68.01	68.53	68.37

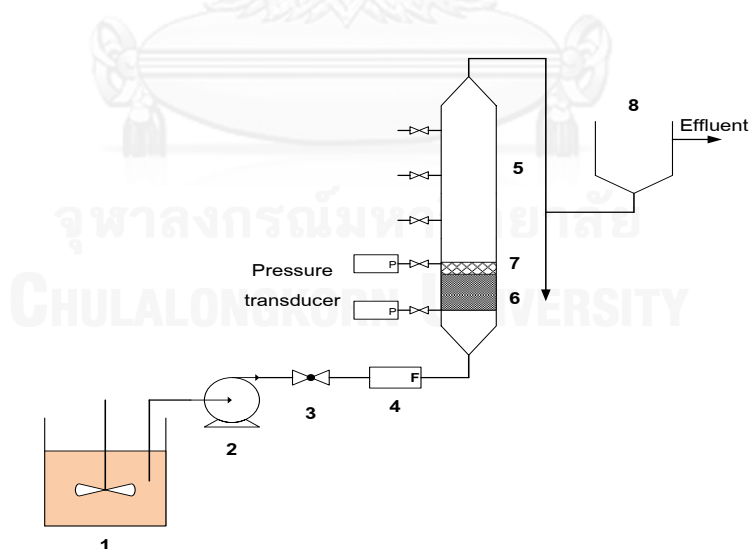
จากตารางที่ 4-4 พบว่า ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทั้ง 3 ลักษณะมีค่ามัมสัมผัสนี้ใกล้เคียงกัน แต่รูปร่างลักษณะของตัวกลางที่แตกต่างกันทำให้เกิดการเรียงตัวและส่งผลกระทบต่อความพรุนของตัวกลางไม่เหมือนกัน โดยตัวกลางแบบเส้นใยให้ความพรุนสูงสุดคือ 0.90 และตัวกลางแบบเม็ดกลมมีความพรุน 0.55 ซึ่งสูงกว่าทรายกรองในกระบวนการกรองเพียงเล็กน้อย(0.40-0.45)(AWWA and ASCE,1990) ซึ่งความพรุน ความสูงของชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์และอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดของโคอะเลสเซอร์ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

#### 4.3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ในการทดลองนี้ได้นำตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่ทำจากพลาสติกโพลีโพรไพลีนทั้ง 3 ลักษณะ คือ เม็ดกลม เส้นใยและทรงกระบอกกลวง มาทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบในถังปฏิกริยาทรงกระบอก โดยขนาดและภาพจำลองการเดินระบบของกระบวนการโคอะเลสเซอร์แสดงในตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 ขนาดของถังปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ของการทดลองที่ 4.3.2

ชนิดของถัง	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความสูง
ขนาดถังปฏิกริยา	8 เซนติเมตร	80 เซนติเมตร
ขนาดถังตกตะกอน	8 เซนติเมตร	40 เซนติเมตร



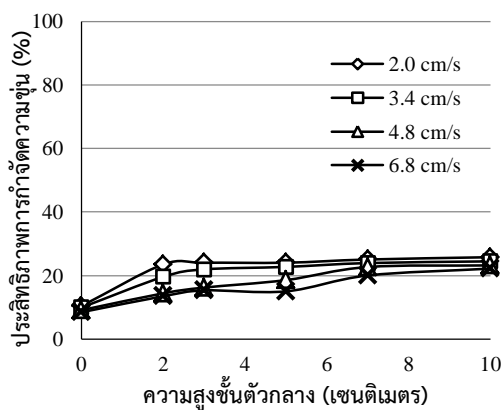
ภาพที่ 4-6 ภาพจำลองการเดินระบบของกระบวนการโคอะเลสเซอร์สำหรับการทดลองที่ 4.3.2

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองแบบที่ละเท โดยเริ่มจากเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในถัง (1) กวนผสมน้ำมันกับน้ำและเติมแคลเซียมคลอไรด์ ให้เข้ากันจนเกิดเป็นอิมัลชันลักษณะคล้ายน้ำมัน สูดน้ำเข้าถังปฏิกิริยา (5) ที่วางตัวกลางโคอะเลสเซอร์ไว้ที่ก้นถัง จากนั้นปล่อยน้ำเสียไหลออกไปเข้าสู่ถังตกตะกอน (8) กักน้ำไว้ในถังตกตะกอน 120 นาทีและทำการวัดความขุ่นที่ด้านล่างของถังตกตะกอนทุกๆ 20 นาที โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาแสดงในตารางที่ 4-6

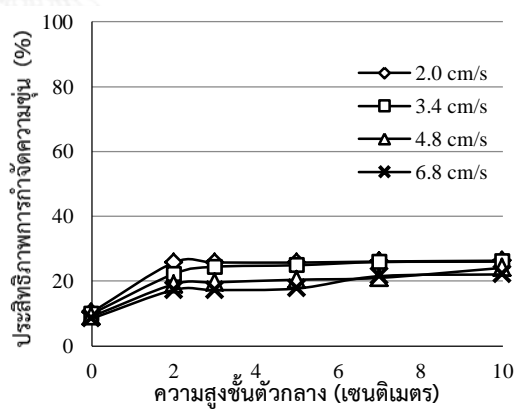
ตารางที่ 4-6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในการทดลองที่ 4.3.2

ความเข้มข้นน้ำมัน	1 กรัมต่อลิตร
ชนิดตัวกลาง	โพลีพรไพลีน
ลักษณะตัวกลาง	ทรงกลม, เส้นใย, ทรงกระบอกกลวง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	2 4 6 8 และ 10 เซนติเมตร
อัตราการไหลของน้ำเสีย	2.0 3.4 4.8 และ 6.8 เซนติเมตรต่อวินาที
ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์	2 กรัมต่อลิตร

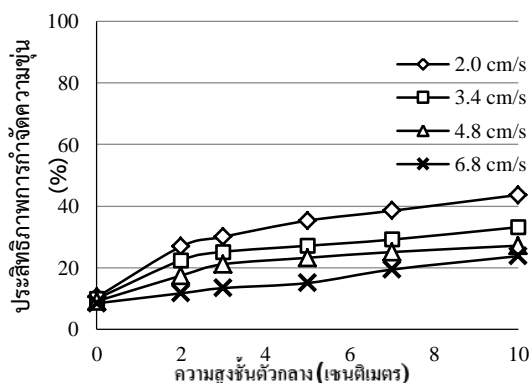
ผลการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ แสดงดังภาพที่ 4-7



(ก)



(ข)



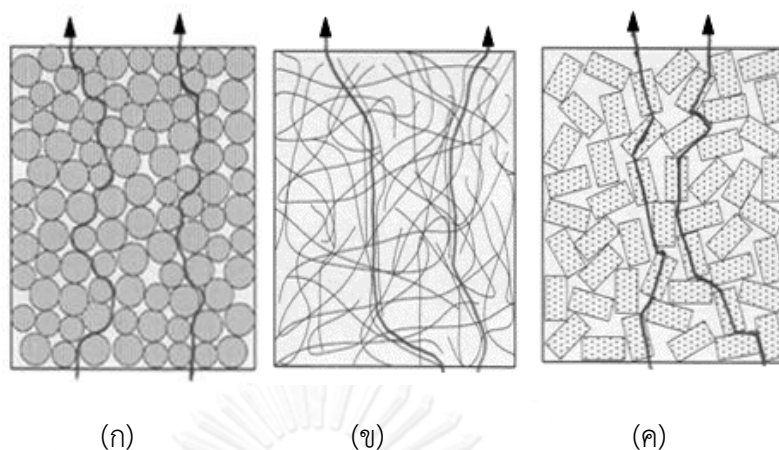
(ค)

ภาพที่ 4-7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์โดยใช้ตัวกลางที่มีลักษณะ (ก) ทรงกลม (ข) เส้นใย (ค) ทรงกระบอกกลวง

จากภาพที่ 4-7 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์คือ 42 % ที่สภาวะการเดินระบบโดยใช้ตัวกลางโพลีโพรไพลีนแบบทรงกระบอกกลวง โดยมีความสูงของชั้นตัวกลาง 10 เซนติเมตรและอัตราการไหลของน้ำเสียเข้า 2 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ความสูงของชั้นตัวกลางที่เพิ่มขึ้น (10 เซนติเมตร) ช่วยเพิ่มโอกาสในการชนและสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมันจึงส่งผลให้น้ำมันสามารถรวมตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถลอยขึ้นสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น อัตราการลดลงของความขุ่นจึงสูงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้ความสูงของชั้นตัวกลางที่สูงจนเกินไปเพราะอาจทำให้อนุภาคน้ำมันที่รวมตัวจนมีขนาดใหญ่แล้วแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กอีกครั้งหนึ่ง (Rachu, 2005)
- อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าที่ต่ำ (2 เซนติเมตรต่อวินาที) จะช่วยเพิ่มเวลากักให้อนุภาคน้ำมันอยู่ในตัวกลางได้นานขึ้น จึงมีโอกาสรวมตัวกันได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจึงสูงขึ้น
- รูปร่างลักษณะของตัวกลางที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพบำบัดสูงสุดคือแบบทรงกระบอกกลวงเนื่องจากการเรียงตัวของตัวกลางที่เป็นระเบียบต่อเส้นทางการไหลของน้ำเสียก่อให้เกิดการชนและสัมผัสที่พอดีช่วยให้เกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคน้ำมันได้ดีและขนาดของช่องว่างในตัวกลางแบบทรงกระบอกกลวงที่ไม่เล็กและไม่ก่อให้เกิดความถี่ในการชนมากจนเกินไปช่วยให้การหลุดออกจากชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ของอนุภาคน้ำมันมีความเสี่ยงต่ำต่อการแตกตัวของกลับมามีขนาดเล็กอีกครั้งหนึ่งดังภาพที่ 4-8





ภาพที่ 4-8 เส้นทางการไหลของน้ำเสี้ยวผ่านตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่มีลักษณะตัวกลางแบบ (ก) ทรงกลม (ข) เส้นใย (ค) ทรงกระบอกกลวง

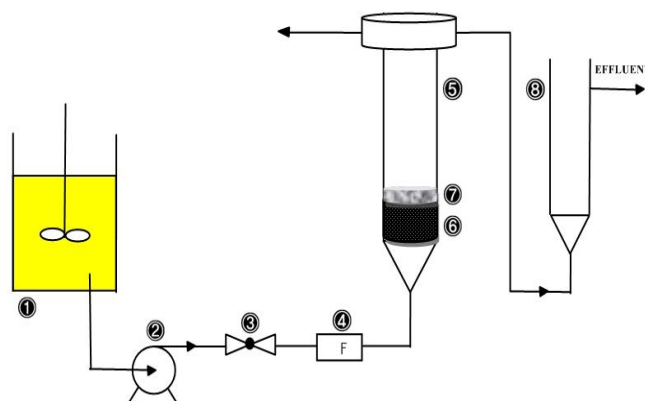
เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงนำสภาวะการเดินระบบนี้ไปทำการทดลองร่วมกับกระบวนการทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมีในถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อเพิ่มเวลากักและศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการร่วมไปใช้กับน้ำเสี้ยวจริง โดยทำการทดลองแบบที่ละเท

#### 4.3.3 การศึกษากระบวนการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันด้วยกระบวนการทางเคมีร่วมกับการบำบัดน้ำเสี้ยวด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์และถังตกตะกอน

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่ใช้กระบวนการทางเคมีทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน เพื่อลดคีย์ซีต้าของอนุภาคน้ำมัน โดยใช้ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองที่ 4.2 (2 และ 6 กรัมต่อลิตร) และเพิ่มโอกาสในการชนและสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมันด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ที่สภาวะเหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3.2 ในถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองที่ 4.3.2 เพื่อการเพิ่มเวลากักของน้ำเสี้ยวและศึกษาความเป็นไปได้เพื่อการประยุกต์ใช้กระบวนการร่วมกับน้ำเสี้ยวจริงในอนาคต โดยขนาดของถังปฏิกรณ์แสดงในตารางที่ 4-7 และภาพจำลองการเดินระบบของกระบวนการร่วมดังภาพที่ 4-9 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-7 ขนาดของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ของการทดลองที่ 4.3.3

ถังปฏิกรณ์	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความสูง
ขนาดถังปฏิกรณ์	15 เซนติเมตร	150 เซนติเมตร
ขนาดถังตกตะกอน	10 เซนติเมตร	115 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-9 ภาพจำลองการเดินระบบของกระบวนการร่วมในการทดลองที่ 4.3.3

การทดลองในส่วนนี้ทำการทดลองแบบทีละเท โดยเริ่มจากเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในถัง (1) กวนผสมน้ำมันกับน้ำและเติมแคลเซียมคลอไรด์ให้เข้ากันจนเกิดเป็นอิมัลชันลักษณะคล้ายน้ำมัน สูดน้ำเข้าถังปฏิกิริยา (5) ที่วางตัวกลางโคอะเลสเซอร์ไว้ที่ก้นถังตั้งรูป จากนั้นปล่อยน้ำเสียไหลออกไปเข้าสู่ถังตกตะกอน (8) กักน้ำไว้ในถังตกตะกอน 2 ชั่วโมง ทำการวัดความขุ่นของน้ำเสียที่ด้านล่างของถังตกตะกอนทุกๆ 20 นาที และเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาวัดขนาดของอนุภาคน้ำมันเมื่อครบ 120 นาที โดยเลือกใช้ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่แสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในการทดลองที่ 4.3.3

ความเข้มข้นน้ำมัน	0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ชนิดตัวกลาง	โพลีโพรไพลีน
ลักษณะตัวกลาง	ทรงกระบอกกลาง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	10 เซนติเมตร
อัตราการไหลของน้ำเสีย	2.0 เซนติเมตรต่อวินาที
ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์	2 และ 6 กรัมต่อลิตร

ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์สรุปได้ดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

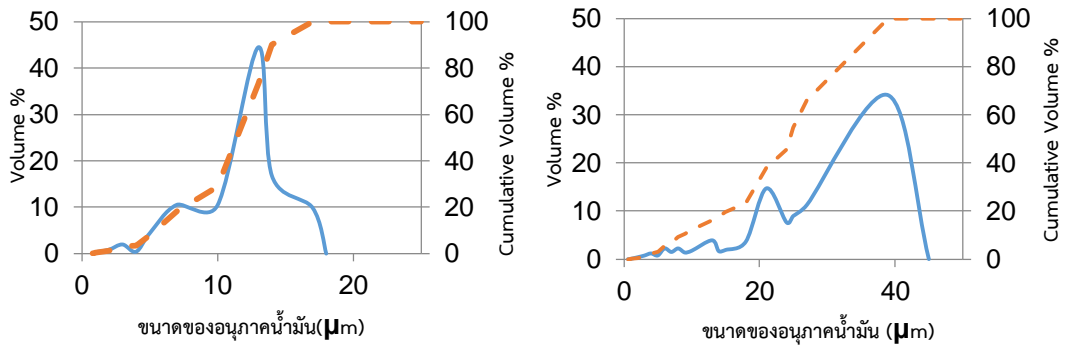
ปริมาณ CaCl <sub>2</sub>	ความขุ่นของน้ำเสีย ความเข้มข้น 0.5 g/l (NTU)			ความขุ่นของน้ำเสีย ความเข้มข้น 1.0 g/l (NTU)			ความขุ่นของน้ำเสีย ความเข้มข้น 2.0 g/l (NTU)		
	ก่อน บำบัด	หลัง บำบัด	% บำบัด	ก่อน บำบัด	หลัง บำบัด	% บำบัด	ก่อน บำบัด	หลัง บำบัด	% บำบัด
2 g/l	214.8	96.0	55.30	737.6	330.8	55.65	1150.4	273.6	77.93
6 g/l	198.2	65.8	67.26	498.2	126.6	75.98	1020.4	100.6	94.03

จากตารางที่ 4-9 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดคือ 94.03 % โดยการใช้ อุปกรณ์โคเอสเซอร์ร่วมกับการเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสอดคล้องกับการทดลองที่ 4.3.2 ดังเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้น และเมื่อครบ 120 นาทีจึงเก็บน้ำตัวอย่างมาวัดขนาดของอนุภาคน้ำมันเพื่อดูความสอดคล้องกันขนาดของอนุภาคน้ำมันกับประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยกลไกการบำบัดของกระบวนการร่วมที่เกิดขึ้นกับทฤษฎีโดยวัดขนาดของอนุภาคน้ำมันซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4-10 และสร้างกราฟการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันแบบร้อยละโดยปริมาตร (Volume %) และ แบบร้อยละโดยปริมาตรสะสม (Cumulative volume %) แสดงดังภาพที่ 4-10 ถึงภาพที่ 4-12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-10 ขนาดของอนุภาคน้ำมันเมื่อผ่านกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีและกระบวนการโคเอสเซอร์

ความเข้มข้น ของน้ำเสีย (g/l)	เติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l			เติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l		
	D <sub>mean</sub> (μm)	D <sub>32</sub> (μm)	U <sub>T</sub> (m/s)	D <sub>mean</sub> (μm)	D <sub>32</sub> (μm)	U <sub>T</sub> (m/s)
0.5	3.605	10.65	$7.22 \times 10^{-7}$	4.815	18.85	$1.28 \times 10^{-6}$
1.0	5.712	18.95	$1.81 \times 10^{-6}$	6.688	26.71	$2.48 \times 10^{-6}$
2.0	7.685	26.06	$3.28 \times 10^{-6}$	12.42	31.82	$8.57 \times 10^{-6}$

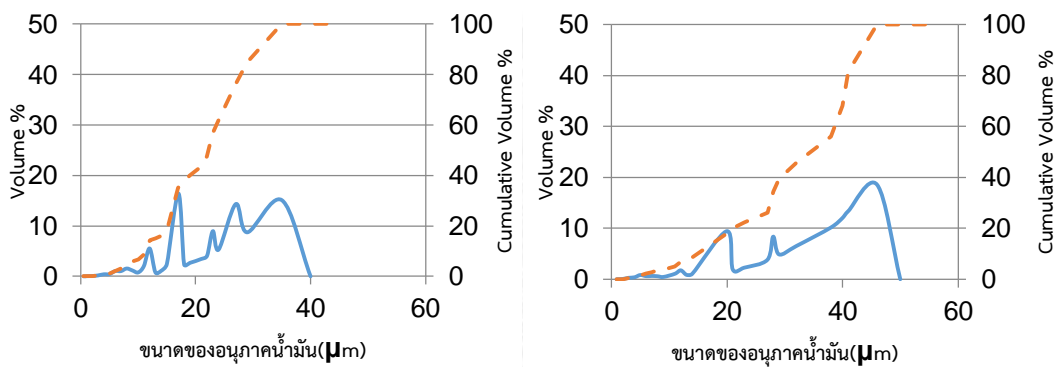
จากตารางที่ 4-10 พบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคน้ำมันที่ใหญ่ที่สุดคือ 12.42 μm และขนาดของอนุภาคน้ำมันแบบคอเทอร์ที่ใหญ่ที่สุดคือ 31.82 μm ซึ่งพบได้จากกระบวนการบำบัดร่วมกันระหว่างการเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตรกับกระบวนการโคเอสเซอร์ ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 2 กรัมต่อลิตร เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเสียสูงจะมีปริมาณน้ำมันมาก โอกาสที่จะเกิดการชนและรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันจึงมีมากกว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้ในตารางที่ 4-9



(ก)

(ข)

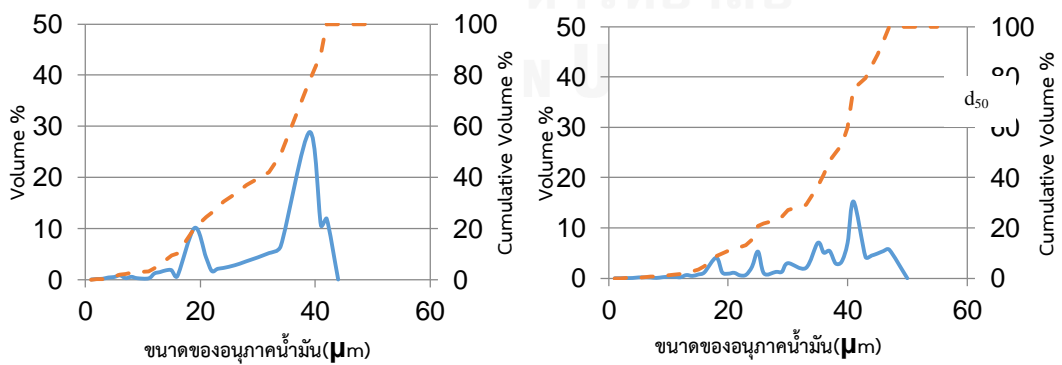
ภาพที่ 4-10 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน ของน้ำเสี้ยวที่มีความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร และเติม  $\text{CaCl}_2$  (ก) 2 กรัมต่อลิตร (ข) 6 กรัมต่อลิตร



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-11 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน ของน้ำเสี้ยวที่มีความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร และเติม  $\text{CaCl}_2$  (ก) 2 กรัมต่อลิตร (ข) 6 กรัมต่อลิตร



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-12 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน ของน้ำเสี้ยวที่มีความเข้มข้น 2.0 กรัมต่อลิตร และเติม  $\text{CaCl}_2$  (ก) 2 กรัมต่อลิตร (ข) 6 กรัมต่อลิตร

จากภาพที่ 4-10 ถึง ภาพที่ 4-12 พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียส่วนใหญ่ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการเติมแคลเซียมคลอไรด์และกระบวนการโคอะเลสเซอร์ มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคน้ำมันตอนเริ่มต้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองตอนที่ 4.3.2 และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในตารางที่ 4-9 ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่ากระบวนการร่วมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกได้จริง จึงได้ทำการทดลองเพิ่มในถังปฏิกริยาเดียวกันกับการทดลองที่ 4.3.2 และดำเนินการทดลองดังเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยไม่เติมแคลเซียมคลอไรด์
2. เติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตรในน้ำเสีย โดยไม่ใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์
3. เติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตรในน้ำเสีย โดยไม่ใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

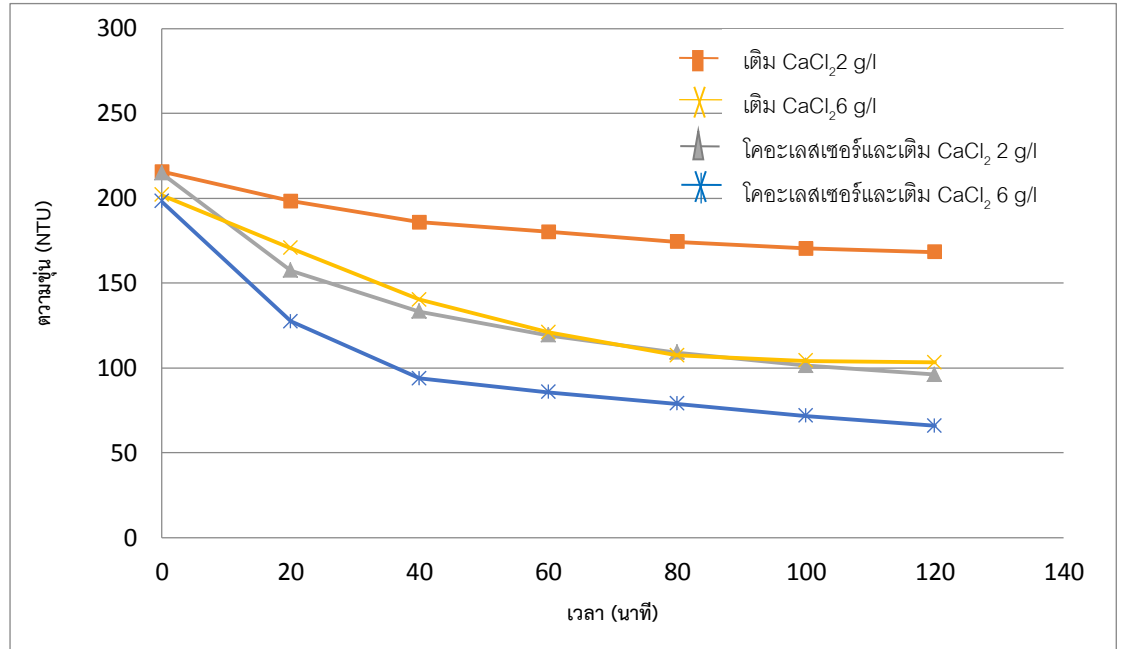
โดยประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่เงื่อนไขในการเดินระบบแตกต่างกันสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่เงื่อนไขการเดินระบบแตกต่างกัน

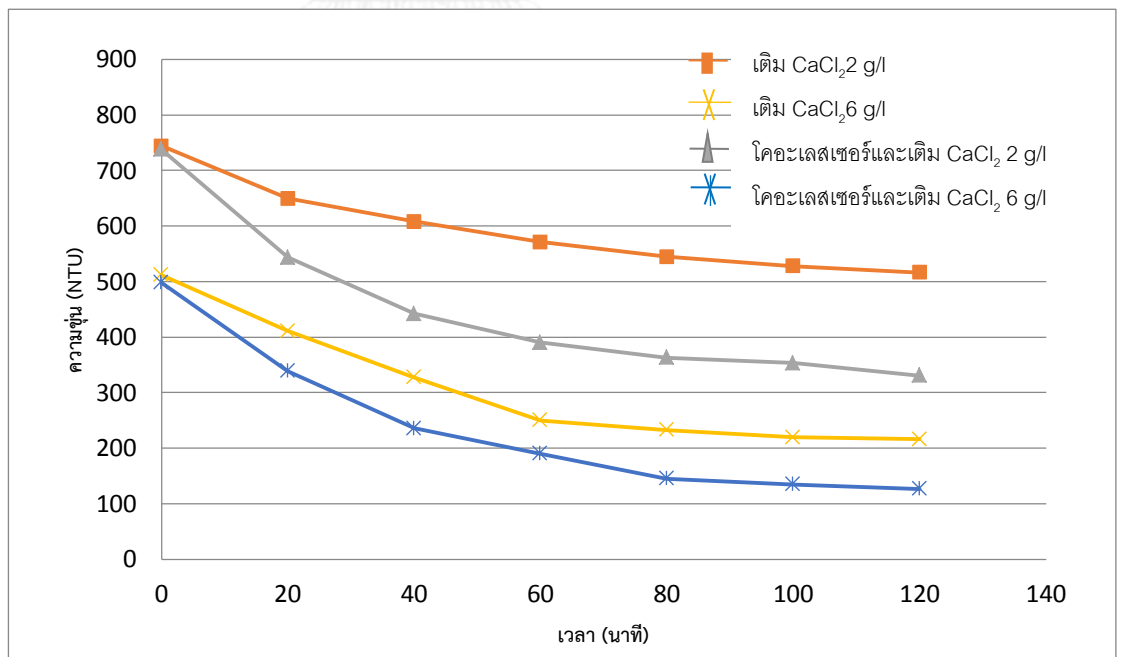
ความเข้มข้นน้ำมัน (g/l)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%) เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที				
	ไม่เติม CaCl <sub>2</sub>	เติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการเติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l	เติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการเติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l
0.5	0.76	21.89	55.30	48.86	67.26
1.0	0.74	30.60	55.65	57.80	75.58
2.0	1.47	40.98	77.93	76.16	94.03

จากตารางที่ 4-11 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียทั้งสามความเข้มข้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ การใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยไม่เติมสารเคมีจะมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำมาก แม้ว่าจะเกิดการชนและสัมผัสกันของอนุภาคน้ำมันในตัวกลางโคอะเลสเซอร์ แต่น้ำมันที่ยังคงความมีเสถียรภาพสูงไม่สามารถรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้เนื่องจากแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคน้ำมันยังสูงมาก ด้วยเหตุนี้จึงพบว่าการเติมแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำเสียเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ สามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าการใช้โคอะเลสเซอร์เพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพยังคงต่ำกว่าการบำบัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการเติมแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำเสียร่วมกับการใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เนื่องจากการเติมสารเคมีจะช่วยทำลายเสถียรภาพของน้ำมันเพียงอย่างเดียว แต่การใช้ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ร่วมกับการเติมสารเคมีนั้นจะช่วยให้น้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมีโอกาสชน สัมผัสและรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ดียิ่งขึ้น โดยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์ช่วยเพิ่ม

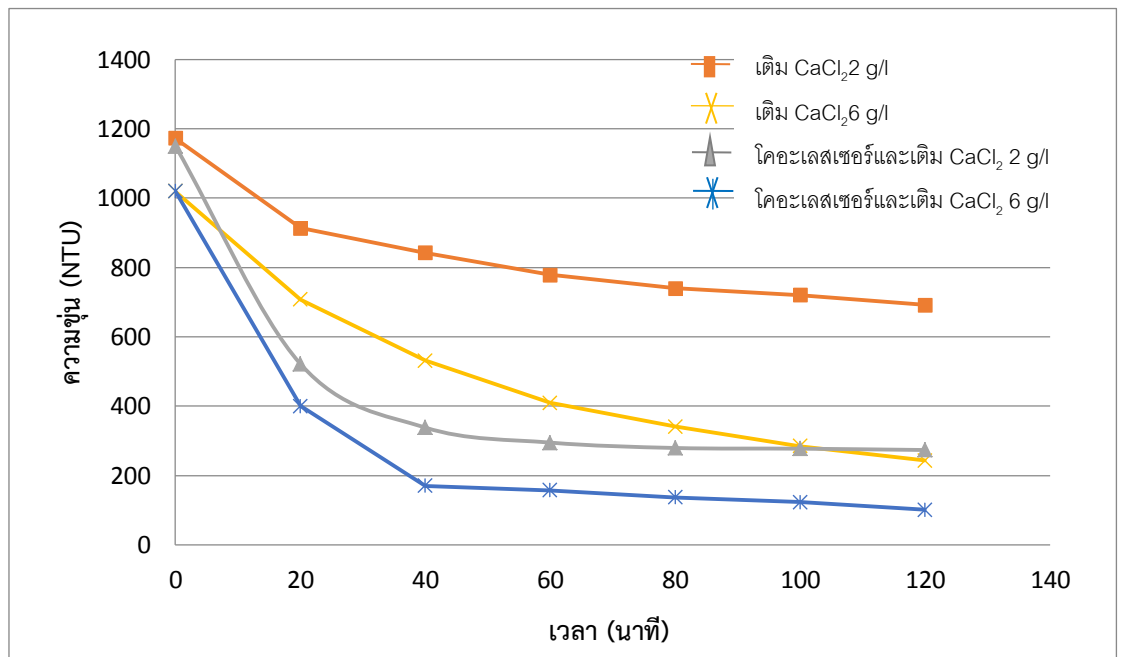
ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้สูงสุดที่ 94.03 % ที่ที่ความเข้มข้นน้ำเสีย 2 กรัมต่อลิตร โดยอัตราการลดลงของความขุ่นแสดงดังภาพที่ 4-13



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4-13 อัตราการลดลงของความขุ่นในถังตกตะกอนเมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์ของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น (ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1.0 กรัมต่อลิตร (ค) 2.0 กรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาค่าความเร็วเกรเดียนต์ (G) สำหรับการไหลผ่านตัวกลาง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-8

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\varepsilon AL \mu}} \quad (4-8)$$

โดยที่	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของน้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )
	$g$	คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )
	$Q$	คือ อัตราการไหลของน้ำเสีย ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
	$H$	คือ ความดันลด (m)
	$\varepsilon$	คือ ความพรุนของตัวกลาง
	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ ( $\text{m}^2$ )
	$L$	คือ ความยาว (m)
	$\mu$	คือ ความหนืดพลศาสตร์ของน้ำ (Pa.s)

เมื่อให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางด้วยความเร็ว 2 เซนติเมตรต่อวินาที โดยตัวกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร และตัวกลางมีความพรุน 0.82 ค่าพารามิเตอร์  $G$  ได้ 7 วินาที<sup>-1</sup> ต่ำกว่าค่าความเร็วเกร็ดเดียนต์ของการกวนซ้ำด้วยสารส้มซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 20-50 วินาที<sup>-1</sup> (มันลิน, 2552) จึงถือได้ว่าตัวกลางโคอะเลสเซอร์ทำหน้าที่เสมือนการกวนซ้ำให้กับอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมีโอกาสชนและสัมผัสกันเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น สามารถลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น ดังนั้นการใช้กระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์จึงให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันออกจากน้ำจึงสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมา

และเมื่อนำผลการทดลองในถังตกตะกอนของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์ไปวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบโตนเพื่อหาค่าอัตราน้ำล้นผิวที่เหมาะสมสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพอย่างต่ำ 60 % ซึ่งได้ค่าอัตราน้ำล้นผิวดังแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ค่าอัตราน้ำล้นผิวของถังตกตะกอนสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดขั้นต่ำ 60 %

ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/l)	ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ (g/l)	อัตราน้ำล้นผิว (cm/mins)
0.5	2	1.00
	6	1.40
1.0	2	0.95
	6	2.00
2.0	2	4.85
	6	5.80

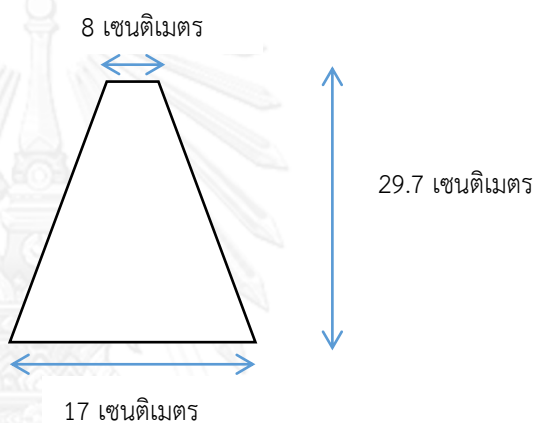
แต่อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการเติมสารเคมีกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ยังมีค่าความขุ่นสูง ดังนั้นจึงต้องใช้กระบวนการทางกายภาพอื่นๆมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพต่อไป โดยงานวิจัยของนางสาวสุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์ (2552) พบว่าการวางขั้วไฟฟ้าไว้เหนือตัวกลางโคอะเลสเซอร์แล้วใส่กระแสไฟฟ้าต่ำๆสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้กับกระบวนการร่วมได้ โดยกระบวนการนี้รวมเรียกว่ากระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ ดังนั้นการศึกษาในส่วนต่อไปจะทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์



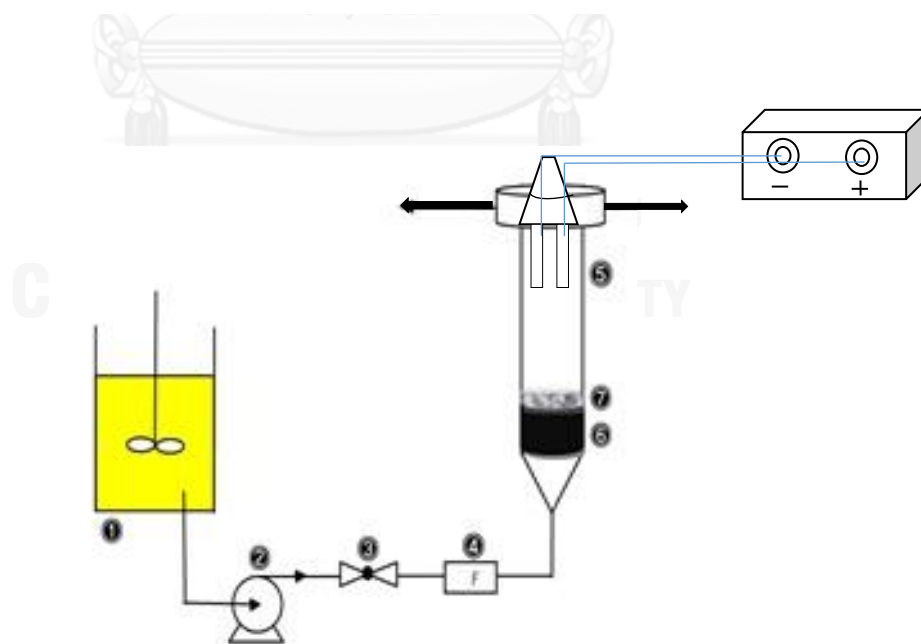
#### 4.4 การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบของกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์

การทดลองในส่วนนี้จะทำการศึกษาวงจรที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของขั้วไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับขั้วไฟฟ้า

ในการทดลองนี้ได้สร้างแผ่นช่วยตกตะกอน (Plate Settler) วางไว้เหนือตัวกลางโคอะเลสเซอร์และขั้วไฟฟ้าเพื่อเพิ่มโอกาสในการชนและสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมันหลังจากที่น้ำมันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าอีกด้วย โดยแผ่นช่วยตกตะกอนทำมาจากอะคริลิกใสโดยขนาดของแผ่นช่วยตกตะกอนแสดงดังภาพที่ 4-14



ภาพที่ 4-14 ภาพแผ่นช่วยตกตะกอน



ภาพที่ 4-15 ถังปฏิบัติการในกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์สำหรับการทดลองที่ 4.4

การทดลองนี้เริ่มจากเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในถัง (1) วางตัวกลางโคอะเลสเซอร์ในถัง ปฏิกริยา (5) วางขั้วไฟฟ้าเหนือตัวกลางโคอะเลสเซอร์และวางแผ่นช่วยตกตะกอนเหนือขั้วไฟฟ้าตั้งรูป เมื่อน้ำเสียไหลผ่านขั้วไฟฟ้าจะถูกกักไว้ในถังปฏิกริยา 2 ชั่วโมง จึงเก็บตัวอย่างน้ำเสียบริเวณเหนือ ขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดขนาดของอนุภาคน้ำมันและค่าความขุ่นของน้ำเสียทุก 20 นาที

#### 4.4.1 การศึกษาเพื่อหาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในส่วนนี้จะทำการทดลองเพื่อหาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ทำการศึกษามีสองชนิดคือขั้วไฟฟ้าที่ทำจาก อะลูมิเนียมและแกรไฟต์ โดย พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในการทดลองที่ 4.4.1

ความเข้มข้นน้ำมัน	1 กรัมต่อลิตร
ชนิดตัวกลาง	โพลีโพรไพลีน
ลักษณะตัวกลาง	ทรงกระบอกกลวง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	10 เซนติเมตร
อัตราการไหลของน้ำเสีย	2.0 เซนติเมตรต่อวินาที
ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์	2 กรัมต่อลิตร
ชนิดของขั้วไฟฟ้า	อะลูมิเนียมและแกรไฟต์
ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	3 เซนติเมตร
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

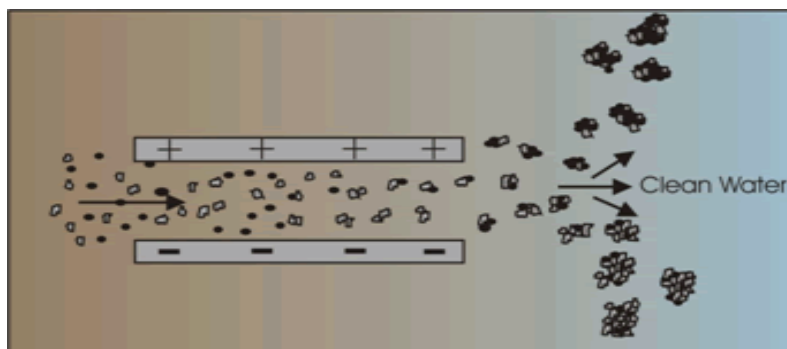
ผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิดสามารถบำบัดน้ำเสียได้และประสิทธิภาพการกำจัด ความขุ่นสูงขึ้นตามเวลา โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4-14 ปฏิกริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม

ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม	ปฏิกริยาอ็อกซิเดชัน
Oxidation (ขั้วแอโนด)	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$
Reduction (ขั้วแคโทด)	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
Redox reaction	$2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{Al}^{3+} + 6\text{OH}^-$

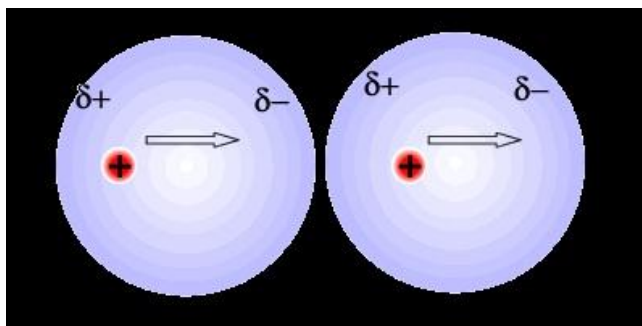
จากสมการแสดงปฏิกริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมพบว่าขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีความว่องไวในการเกิดปฏิกริยา โดยที่ขั้วแอโนดจะเกิดการกัดกร่อนและละลายน้ำออกมาในรูป  $\text{Al}^{3+}$  ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถทำลายเสถียรภาพของน้ำมันได้เกิดกลไกการสร้างผลึกเพื่อให้อนุภาค

คอลลอยด์มาจับ (Sweep Coagulation) เพื่อให้เกิดเป็นฟล็อกและที่ขั้วแคโทดจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนซึ่งช่วยลอยตะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำ ค่าพีเอชของน้ำเสียจึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมจึงค่อนข้างสูง ซึ่งกลไกแสดงในภาพที่ 4-16 และเรียกกระบวนการนี้ว่า อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation)



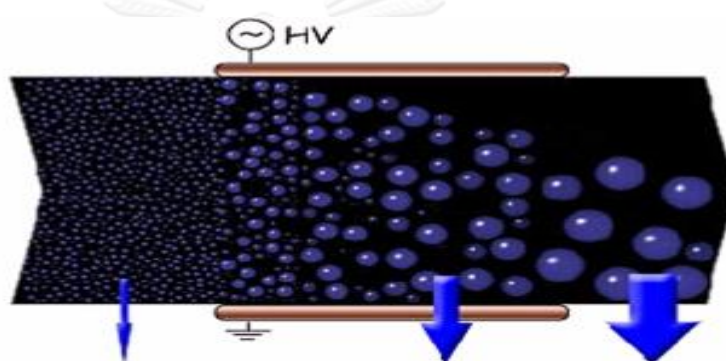
ภาพที่ 4-16 กลไกของกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation)  
(สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552)

แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ต้องการให้เกิดตะกอนเคมีในน้ำเสีย จึงเลือกใช้กระแสไฟฟ้าต่ำเพียง 0.02, 0.05 และ 0.1 แอมแปร์ เพื่ออาศัยกระแสอิเล็กตรอนในการเพิ่มแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างอนุภาคน้ำมัน แบบ Induce-Induce Dipole (John S. และคณะ, 2001) กล่าวคือ เมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า (ระหว่างขั้วไฟฟ้า) อิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าจะไปเกาะที่ผิวของอนุภาคน้ำมันบริเวณหนึ่งจึงแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นลบ และสามารถเหนี่ยวนำอนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้ๆ ให้เกิดประจุบวกได้ (ดังภาพที่ 4-17) จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างมวล ซึ่งช่วยให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ และอาศัยฟองก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวน้ำของน้ำเสีย จึงสามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้ภายในเวลาจำกัด ความหนาของชั้นน้ำมันที่ผิวน้ำของน้ำเสียจึงมากขึ้นตามเวลา เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ต่ำมากๆ ทำให้ขั้วไฟฟ้าจึงเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ได้น้อย ปริมาณของอะลูมิเนียมที่ได้จากขั้วไฟฟ้าจึงน้อยมาก ดังนั้นตะกอนเคมีจึงเกิดขึ้นไม่มากและไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตา โดยกลไกนี้แสดงในภาพที่ 4-18 และเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรโคอะเลสเซนซ์ (Electrocoalescence)



ภาพที่ 4-17 Induce-Induce Dipol

([http://ibchem.com/IB/ibnotes/full/bon\\_hm/4.3.htm](http://ibchem.com/IB/ibnotes/full/bon_hm/4.3.htm). 23 เมษายน 2557)



ภาพที่ 4-18 กลไกของกระบวนการอิเล็กโทรโคเอสเซนซ์ (Electrocoalescence)  
(สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552)

เมื่อให้กระแสไฟฟ้ากับแผ่นอะลูมิเนียม จะเกิดการสีกร่อนของขั้วไฟฟ้า ดังภาพที่ 4-19



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-19 ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (ก) ก่อน และ (ข) หลัง ใช้งานในกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ 4-15 ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์

ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์	ปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส
Oxidation (ขั้วแอโนด)	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
Reduction (ขั้วแคโทด)	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
Redox reaction	$4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{OH}^-$

เนื่องจากแกรไฟต์มีสมบัติในการนำไฟฟ้า ดังนั้นขั้วแอโนดจึงไม่มีการแตกตัวให้ประจุบวกแต่เกิดฟองก๊าซออกซิเจนแทน และที่ขั้วแคโทดเกิดก๊าซไฮโดรเจน ดังนั้นการใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เป็นเพียงกระบวนการการลอยตะกอน (Electro-Flotation) ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดจะต่ำ เนื่องจากไม่มีการแตกตัวให้ประจุบวกมาช่วยทำลายเสถียรภาพ โดยลักษณะของขั้วแกรไฟต์ก่อนและหลังบำบัดแสดงดังภาพที่ 4-20 และอัตราการลดความขุ่นด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและแกรไฟต์ แสดงไว้ในภาพที่ 4-21

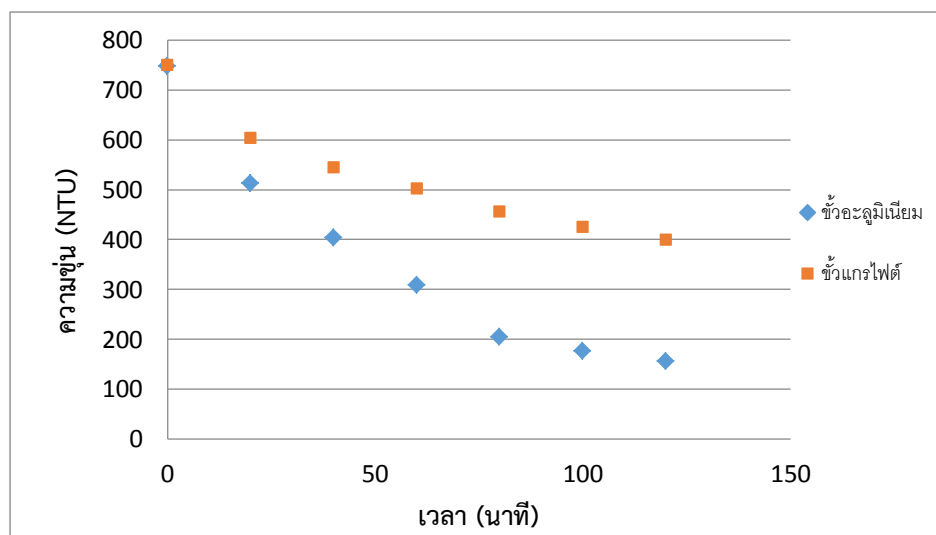


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-20 ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง ใช้งานในกระบวนการไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 4-21 อัตราการลดลงของความขุ่นในกระบวนการอิเล็กโทรสถาคิกโคอะเลสเซอร์ของขี้ไฟฟ้า 2 ชนิด คือ อะลูมิเนียม และแกรไฟต์

จากภาพที่ 4-21 พบว่าขี้ไฟฟ้าทั้งสองชนิดสามารถลดความขุ่นของน้ำเสียโดยพาน้ำเสียลอยขึ้นสู่ผิวหน้าได้ด้วยฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา โดยขี้อะลูมิเนียมมีอัตราการลดความขุ่นสูงกว่าขี้แกรไฟต์ ซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลข้างต้น กล่าวคือ ปฏิกิริยาที่ขี้แกรไฟต์ให้ฟองก๊าซเพียงอย่างเดียว แต่ปฏิกิริยาที่ขี้อะลูมิเนียมนอกจากจะให้ฟองก๊าซเพื่อพาน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวหน้าแล้วยังเกิดการกัดกร่อนที่ขี้ให้อะลูมิเนียมไอออนซึ่งสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันได้ และยังช่วยให้เกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างอนุภาคน้ำมันด้วยกระแสไอเล็กตรอนอีกด้วย

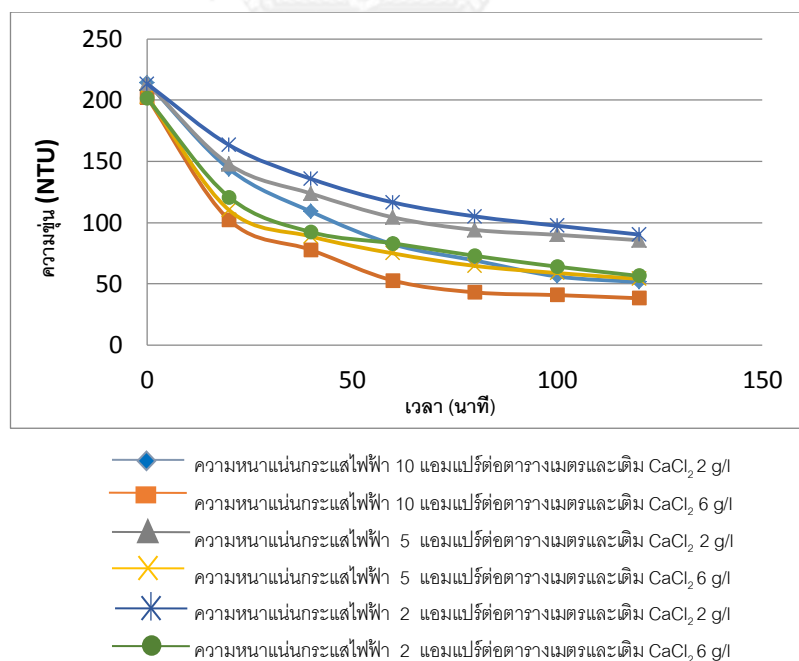
#### 4.4.2 การศึกษาเพื่อหาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี

การทดลองในส่วนนี้ทำเพื่อศึกษาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-16

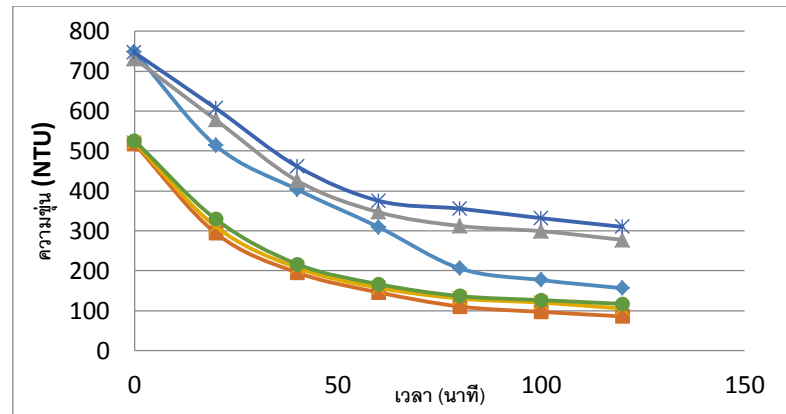
ตารางที่ 4-16 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการโคอะเลสเซอร์ในการทดลองที่ 4.4.2

ความเข้มข้นน้ำมัน	0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ชนิดตัวกลาง S	โพลีพรไพลีน
ลักษณะตัวกลาง	หลอดกลวง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	10 เซนติเมตร
อัตราการไหลของน้ำเสีย	2.0 เซนติเมตรต่อวินาที
ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์	2 และ 6 กรัมต่อลิตร
ชนิดของขี้ไฟฟ้า	อะลูมิเนียม
ระยะห่างระหว่างขี้ไฟฟ้า	2 เซนติเมตร
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	2 5 และ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อัตราการลดความขุ่นของน้ำเสียด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร แสดงในภาพที่ 4-23

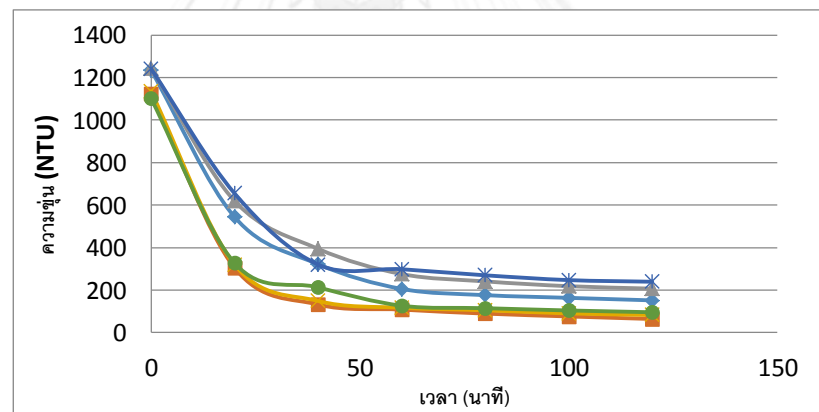


(ก)



- ◆ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  2 g/l
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  6 g/l
- ▲ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  2 g/l
- ✕ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  6 g/l
- ✕ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  2 g/l
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  6 g/l

(ข)



- ◆ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  2 g/l
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  6 g/l
- ▲ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  2 g/l
- ✕ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  6 g/l
- ✕ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  2 g/l
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ต่อตารางเมตรและเติม  $\text{CaCl}_2$  6 g/l

(ค)

ภาพที่ 4-22 อัตราการลดความขุ่นของน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย (ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1 กรัมต่อลิตร และ (ค) 2 กรัมต่อลิตร



จากภาพที่ 4-22 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีอัตราการลดความขุ่นสูงสุดเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มากจะก่อให้เกิดปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ กรดอะซิติกและฟองก๊าซในปริมาณมากกว่าการเดินระบบด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำๆ

เพื่อตรวจสอบกลไกการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี ว่ากลไกที่ช่วยกำจัดความขุ่นเกิดเพราะการทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หรือเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างอนุภาคน้ำมันเนื่องจากกระแสอิเล็กตรอน จึงได้นำน้ำหนักของขี้ไฟฟ้าที่หายไปจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมาคำนวณปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ดังสมการต่อไปนี้

$$C_{Al} = \frac{M \phi_e I t}{n F V} = \frac{M \phi_e Q}{n F V} \quad (4-9)$$

$$\phi_e = \frac{n F \Delta m}{M Q} = \frac{n F \Delta m}{M I t} \quad (4-10)$$

- เมื่อ  $C_{Al}$  : ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ (กรัมต่อลิตร)  
 $M$  : น้ำหนักโมเลกุลที่ขี้แอโนด (กรัมต่อโมล)  
 $I$  : ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์)  
 $N$  : จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ ( $A=3$ )  
 $t$  : เวลาที่ใช้ (วินาที)  
 $F$  : ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 แอมแปร์วินาทีต่อประจุ  
 $V$  : ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ลิตร) และ  $\phi_e$  คือ ค่าฟาราเดียม (Faradic yield)  
 $\Delta m$  : น้ำหนักของขี้อะลูมิเนียม (Al) ที่หายไป (กรัม)

ตารางที่ 4-17 ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	2 A/m <sup>2</sup>			5 A/m <sup>2</sup>			10 A/m <sup>2</sup>			
	0.5 g/l	1 g/l	2 g/l	0.5 g/l	1 g/l	2 g/l	0.5 g/l	1 g/l	2 g/l	
CaCl <sub>2</sub>	$\Delta m$ (g)	0.001	0.003	0.005	0.002	0.003	0.006	0.002	0.004	0.006
	$\Phi$	0.089	0.201	0.038	0.051	0.095	0.170	0.034	0.061	0.092
2 g/l	C(mg/l)	0.009	0.022	0.043	0.014	0.027	0.044	0.019	0.034	0.051
CaCl <sub>2</sub>	$\Delta m$ (g)	0.002	0.004	0.005	0.002	0.004	0.006	0.003	0.005	0.007
	$\Phi$	0.149	0.261	0.387	0.066	0.113	0.185	0.045	0.073	0.097
6 g/l	C(mg/l)	0.017	0.029	0.043	0.018	0.032	0.052	0.025	0.041	0.054

จากตารางที่ 4-17 พบว่าปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายอยู่ในน้ำเสียน้อยมาก ตะกอนที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของน้ำเสยจึงน้อยมากตามไปด้วยเนื่องจากไม่เกิดกลไกการรวมตะกอน แต่กลไกหลักที่ช่วยกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีเกิดจากกระแสไอเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าช่วยให้เกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างอนุภาคน้ำมันแบบ Induce-Induce Dipole ช่วยให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสในการรวมตัวกันมากขึ้นและฟองอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาช่วยพาน้ำเสยลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำเสยได้ภายในเวลาจำกัด จึงสรุปได้ว่ากระบวนการไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์

นอกจากนี้ น้ำเสยที่มีความเข้มข้นสูงๆจะมีอัตราการลดความขุ่นได้เร็วกว่าน้ำเสยที่มีความเข้มข้นต่ำๆ เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเสยสูงจะมีปริมาณน้ำมันอยู่มาก โอกาสเกิดการชนกันรวมตัวและพอกันลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำเสยจึงมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดแสดงไว้ในตารางที่ 4-18

ตารางที่ 4-18 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ด้วย  
ขี้ไฟฟ้าอะลูมิเนียม

พารามิเตอร์		ความเข้มข้นน้ำเสย					
แคลเซียมคลอไรด์ (g/l)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	0.5 (g/l)		1.0 (g/l)		2.0 (g/l)	
		% บำบัด	พีเอช	% บำบัด	พีเอช	% บำบัด	พีเอช
2	2	57.69%	8.10	58.50%	8.11	80.72%	8.12
2	5	59.92%	8.13	62.10%	8.15	83.37%	8.12
2	10	75.98%	8.15	79.14%	8.20	87.73%	8.20
6	2	71.97%	8.12	77.79%	8.12	91.31%	8.12
6	5	73.32%	8.12	79.82%	8.14	92.73%	8.14
6	10	81.07%	8.12	83.44%	8.17	94.30%	8.21

ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดคือ 94.30% ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตรของน้ำเสยที่มีความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร และการแตกตัวของขี้ไฟฟ้าทำให้น้ำเสยมีไฮดรอกซิลไอออนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พีเอชของน้ำสูงขึ้น แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำมาก จึงเกิดไฮดรอกซิลไอออนในปริมาณที่ไม่มาก ค่าพีเอชของน้ำเสยจึงสูงขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดยังคงสอดคล้องกับขนาดของอนุภาคน้ำมัน กล่าวคือ เมื่อน้ำมันสามารถรวมตัว

กันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้จำนวนมาก ความเร็วลอยตัวของน้ำมันจะสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการลดลง ความขุ่นสูงขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจึงสูงขึ้นเช่นกัน โดยขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสถาคโคอะเลสเซอร์แสดงในตารางที่ 4-19 และ 4-20

ตารางที่ 4-19 ขนาดและความเร็วลอยตัวของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสถาคโคอะเลสเซอร์ เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $A/m^2$ )	ขนาดของอนุภาคน้ำมันความเข้มข้นของน้ำเสีย								
	0.5 (g/l)			1.0 (g/l)			2.0 (g/l)		
	$D_{mean}$ ( $\mu m$ )	$D_{32}$ ( $\mu m$ )	$U_T$ (m/s)	$D_{mean}$ ( $\mu m$ )	$D_{32}$ ( $\mu m$ )	$U_T$ (m/s)	$D_{mean}$ ( $\mu m$ )	$D_{32}$ ( $\mu m$ )	$U_T$ (m/s)
2	6.32	11.88	$2.2 \times 10^{-6}$	11.68	20.42	$7.6 \times 10^{-6}$	16.93	28.90	$1.6 \times 10^{-5}$
5	6.61	13.63	$2.4 \times 10^{-6}$	14.29	23.61	$1.1 \times 10^{-5}$	17.30	30.51	$1.7 \times 10^{-5}$
10	8.09	18.56	$3.6 \times 10^{-6}$	17.59	27.98	$1.7 \times 10^{-5}$	19.50	33.79	$2.1 \times 10^{-5}$

ตารางที่ 4-20 ขนาดและความเร็วลอยตัวของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสถาคโคอะเลสเซอร์ เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $A/m^2$ )	ขนาดของอนุภาคน้ำมันความเข้มข้นของน้ำเสีย								
	0.5 (g/l)			1.0 (g/l)			2.0 (g/l)		
	$D_{mean}$ ( $\mu m$ )	$D_{32}$ ( $\mu m$ )	$U_T$ (m/s)	$D_{mean}$ ( $\mu m$ )	$D_{32}$ ( $\mu m$ )	$U_T$ (m/s)	$D_{mean}$ ( $\mu m$ )	$D_{32}$ ( $\mu m$ )	$U_T$ (m/s)
2	10.83	19.53	$6.5 \times 10^{-6}$	15.70	28.67	$1.4 \times 10^{-5}$	18.96	30.14	$2.0 \times 10^{-5}$
5	12.73	22.42	$9.0 \times 10^{-6}$	16.39	30.22	$1.5 \times 10^{-5}$	19.52	32.72	$2.1 \times 10^{-5}$
10	18.18	27.11	$1.8 \times 10^{-5}$	18.56	34.22	$1.9 \times 10^{-5}$	22.91	36.51	$2.9 \times 10^{-5}$

เมื่อนำผลการทดลองในถังตกตะกอนไปวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบโคตเพื่อหาค่าอัตราน้ำล้นผิวที่เหมาะสมสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพอย่างต่ำ 60% เช่นเดียวกันกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์ พบว่าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมโดยให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตรร่วมกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์จะได้ค่าอัตราน้ำล้นผิวสูงกว่ากระบวนการโคอะเลสเซอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-21 ค่าอัตราการนำลิ้นผิวของถังตกตะกอนในกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์

ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/l)	ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ (g/l)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	อัตราการนำลิ้นผิว (cm/min)
0.5	2	10	2.0
	6	10	3.2
1.0	2	10	1.8
	6	10	4.2
2.0	2	10	5.1
	6	10	7.0

และเพื่อยืนยันผลการทดลองว่ากระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์มีอัตราการลดความขุ่นสูงกว่ากระบวนการโคอะเลสเซอร์ ในงานวิจัยนี้จึงได้คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยา ด้วยวิธี Differentiation ในถึงปฏิกิริยาแบบที่ละเท จนได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยา (Reaction rate) กับความเข้มข้นของสาร ดังสมการ

$$\ln(-r) = \ln(k) + n \ln C \quad (4-11)$$

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(-r)$  และเทอม  $\ln C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่า  $n$  และจุดตัดแกน  $y$  คือ  $\ln(k)$  จึงสามารถหาค่าคงที่  $k$  และลำดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) ได้โดยลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยา ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์ แสดงในตารางที่ 4-22 และลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยาของกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์แสดงในตารางที่ 4-23 และ 4-24

ตารางที่ 4-22 ลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยา ( $n$ ) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา ( $k$ ) ของกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ปริมาณ CaCl <sub>2</sub> (g/l)	ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/l)								
	0.5			1.0			2.0		
	k (min) <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup>	k (min) <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup>	k (min) <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup>
2	5.65×10 <sup>-5</sup>	2.14	0.999	1.43×10 <sup>-5</sup>	2.15	0.949	1.48×10 <sup>-4</sup>	1.98	0.820
6	4.57×10 <sup>-4</sup>	1.87	0.954	4.27×10 <sup>-2</sup>	0.91	0.943	7.31×10 <sup>-2</sup>	1.03	0.861

ตารางที่ 4-23 ลำดับชั้นของการเกิดปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของกระบวนการ  
อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร

ความหนา แน่นกระดาษ ไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/l)								
	0.5			1.0			2.0		
	k (min) <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup>	k (min) <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup>	k (min) <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup>
2	1.24×10 <sup>-3</sup>	1.50	0.992	1.72×10 <sup>-2</sup>	0.96	0.742	2.22×10 <sup>-2</sup>	1.13	0.749
5	1.78×10 <sup>-3</sup>	1.44	0.980	2.15×10 <sup>-2</sup>	0.95	0.766	2.82×10 <sup>-2</sup>	1.10	0.948
10	4.37×10 <sup>-2</sup>	0.88	0.991	2.29×10 <sup>-1</sup>	0.62	0.933	7.82×10 <sup>-1</sup>	0.98	0.940

ตารางที่ 4-24 ลำดับชั้นของการเกิดปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของกระบวนการ  
อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร

ความหนา แน่นกระดาษ ไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/l)								
	0.5			1.0			2.0		
	k (min) <sup>-1</sup>	N	R <sup>2</sup>	k (min) <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup>	k (min) <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup>
2	1.44×10 <sup>-4</sup>	1.65	0.980	3.41×10 <sup>-2</sup>	0.99	0.943	5.19×10 <sup>-2</sup>	1.14	0.955
5	9.04×10 <sup>-4</sup>	1.61	0.995	3.08×10 <sup>-2</sup>	1.03	0.972	7.16×10 <sup>-2</sup>	1.12	0.933
10	1.78×10 <sup>-3</sup>	1.16	0.998	6.66×10 <sup>-2</sup>	1.32	0.992	1.44×10 <sup>-1</sup>	1.01	0.952

จากตารางที่ 4-22 ถึง 4-24 สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการร่วมระหว่างการเติมสารเคมีกับ  
กระบวนการโคอะเลสเซอร์ และ กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ มีอันดับของการ  
เกิดปฏิกิริยาเข้าใกล้เป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง และ สอง และค่าคงที่ของปฏิกิริยาของกระบวนการอิ  
เล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์มีค่ามากกว่ากระบวนการร่วมระหว่างการเติมสารเคมีกับกระบวนการ  
โคอะเลสเซอร์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์มีอัตราการกำจัดความ  
ขุ่นที่สูงกว่า ที่เงื่อนไขการเดินระบบเดียวกัน

#### 4.4.3 การศึกษาเพื่อตรวจสอบการทำงานของพารามิเตอร์ที่ใช้เดินระบบในกระบวนการ ร่วม

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการร่วมในการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึง  
ทำเพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการร่วมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้จริง โดยทำ  
การทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-25 ประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมที่มีเงื่อนไขในการเดินระบบแตกต่างกัน

ปริมาณแคลเซียม คลอไรด์ (g/l)	อุปกรณ์โคเอสเซอร์		ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า ( $A/m^2$ ) ที่ขั้วอะลูมิเนียม	ประสิทธิภาพ การกำจัดความขุ่น (%)
	ความสูง ของชั้นตัวกลาง	แผ่นช่วย ตกตะกอน		
-	10 เซนติเมตร	✓	-	0.74%
2	-	✓	-	30.20%
2	10 เซนติเมตร	✓	-	55.65%
2	10 เซนติเมตร	-	-	42.59%
-	-	-	10	13.90%
-	10 เซนติเมตร	-	10	13.99%
2	-	-	10	58.01%
2	10 เซนติเมตร	-	10	64.01%
2	10 เซนติเมตร	✓	10	79.14%

จากตารางที่ 4-25 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการร่วม โดยหลักแล้วขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากน้ำมันที่ยังคงมีเสถียรภาพสูงไม่สามารถรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้แม้ว่าจะมีการชนหรือสัมผัสกัน ดังนั้นเมื่อวางตัวกลางโคเอสเซอร์และแผ่นตกตะกอนเหนือขั้วไฟฟ้าถือเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนและสัมผัสของอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วช่วยให้น้ำมันรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้มากขึ้นจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการร่วม และประสิทธิภาพจะเพิ่มสูงขึ้นอีกเมื่อให้กระแสไฟฟ้าต่ำกับขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมเพราะฟองที่เกิดจากปฏิกิริยาช่วยพาอนุภาคน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็วยิ่งขึ้นภายในเวลาจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่คำนวณได้ในตารางที่ 4-23 และ 4-24 แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคเอสเซอร์ยังคงให้น้ำทิ้งที่มีความขุ่นประมาณ 50-300 NTU ดังนั้นในกระบวนการถัดไปจึงเลือกใช้กระบวนการเมมเบรนมาบำบัดเพื่อลดความขุ่นเป็นขั้นตอนสุดท้าย

#### 4.5 การศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยเมมเบรน

จากการศึกษาลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดพบว่าขนาดของอนุภาคน้ำมันโดยเฉลี่ยคือ 1 ไมครอน จัดเป็นแมคโครอิมัลชัน และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดของเสียต่างๆ เช่น อนุภาคของคอลลอยด์ น้ำมัน เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่ทำจากวัสดุโพลีซัลโฟน (Polysulphone) ชนิดชอบน้ำ (Hydrophillic) ทนพีเอชได้ในช่วง 2- 13 และมีขนาดรูพรุน 0.01 ไมครอนเมตร รองรับแรงดันได้สูงสุด 3 บาร์ เมมเบรนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำที่ผ่านออกมาจากกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคเอสเซอร์เป็นสารป้อน (Feed) เข้าสู่กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งมีความขุ่นอยู่ในช่วง 50-

300 NTU ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำเสีย โดยให้น้ำเสียไหลเข้าเมมเบรนโดยตั้งฉากกับเมมเบรน เป็นระบบกรองแบบปิดตาย (Dead-end filtration)



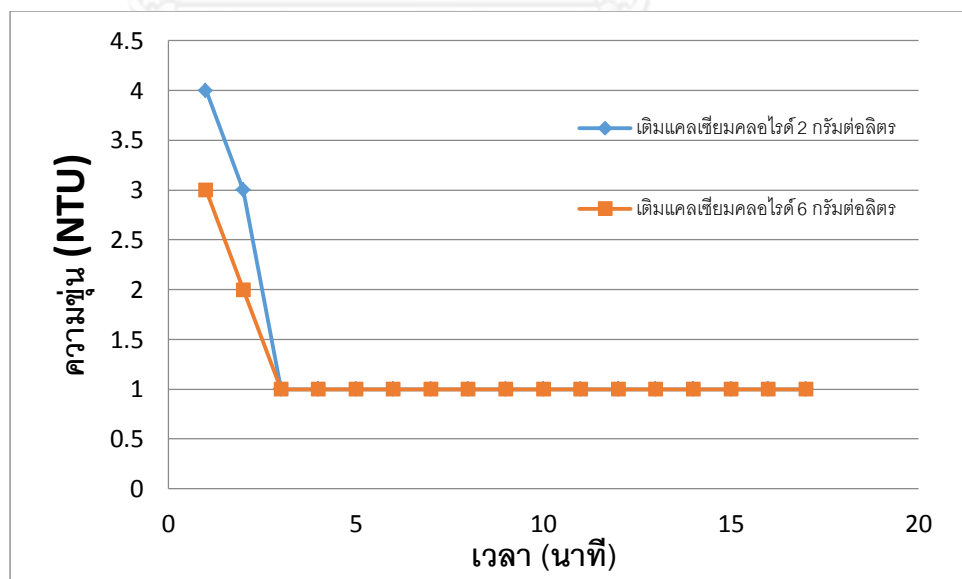
กระบอกสำหรับใส่เมมเบรน



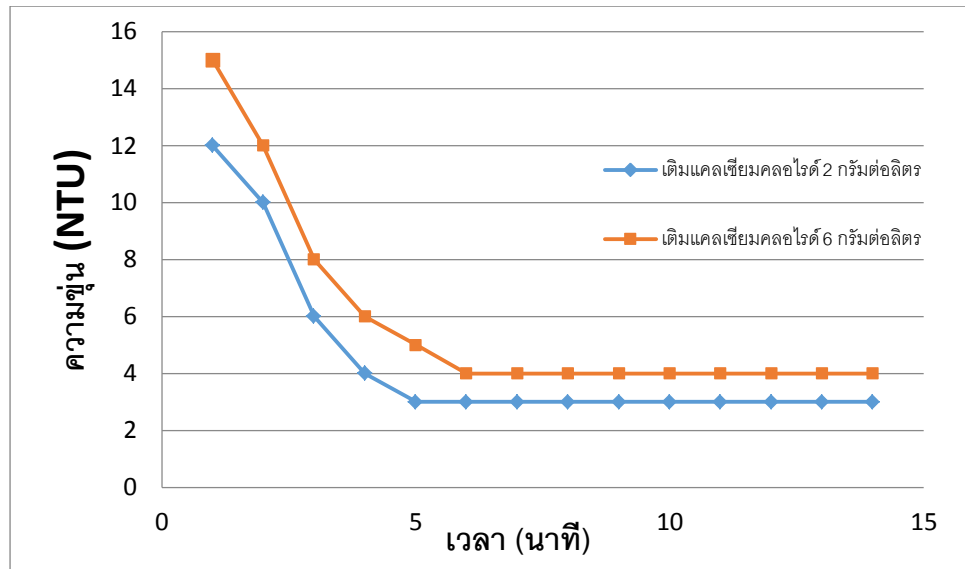
UF เมมเบรน

ภาพที่ 4-23 อุปกรณ์ที่ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

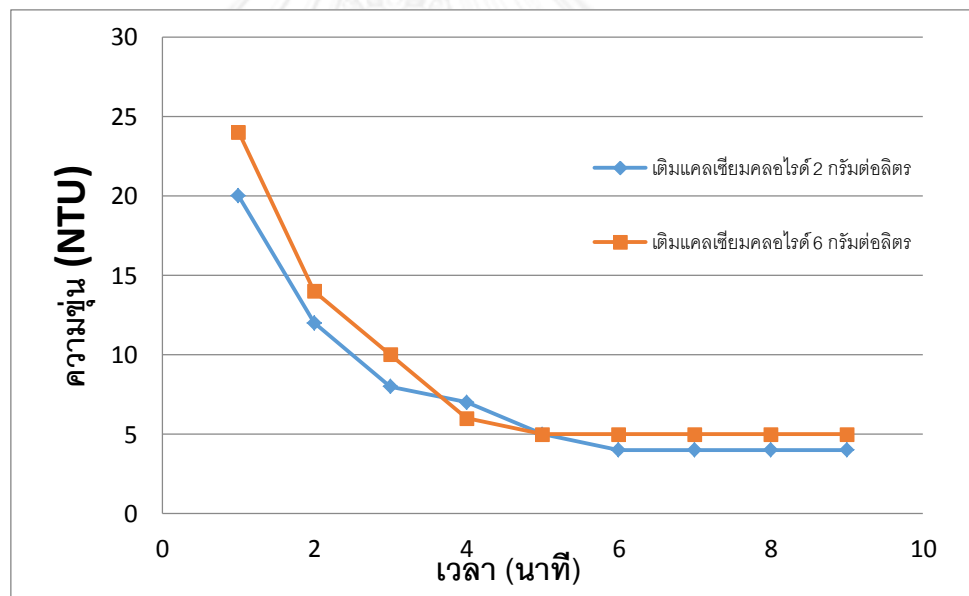
โดยผลการศึกษาอัตราการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการอเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันแสดงดังภาพที่ 4-24



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4-24 อัตราการลดความขุ่นของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการอิเล็กโทรสแตติกโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น (ก) 0.5 กรัมต่อลิตร (ข) 1.0 กรัมต่อลิตร และ (ค) 2.0 กรัมต่อลิตร



จากการศึกษาพบว่าค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลง ตามระยะเวลาในการกรอง โดยน้ำที่ผ่านการกรองจะฟือเซออยู่ในช่วง 8-10 และทุกค่าความเข้มข้นของน้ำเสียขาเข้าจะเริ่มมีความขุ่นคงที่ในช่วง 1-5 NTU เมื่อเวลาผ่านไป 6-7 นาที ซึ่งผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 NTU (World Health Organization, 2006) แต่ความเข้มข้นของน้ำเสียขาเข้าและปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เติมลงในน้ำเสียส่งผลต่อฟลักซ์การกรอง และการอุดตันของเมมเบรน โดยน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงจะเกิดการอุดตันได้เร็วกว่าน้ำเสียความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากน้ำเสียความเข้มข้นสูงยังคงมีปริมาณน้ำมันอยู่มาก ส่งผลให้เกิดการอุดตันที่เมมเบรนได้เร็วยิ่งขึ้นนั่นเอง โดยระยะเวลาการกรองจนอุดตันแสดงไว้ในตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-26 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการร่วมและระยะเวลาในการกรองผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ความเข้มข้นน้ำเสีย (g/l)	ปริมาณ CaCl <sub>2</sub> (g/l)	ระยะเวลาการกรองจนอุดตัน (นาที)	ความขุ่น (NTU)	ซีโอดี (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด %
0.5	2	41	1	70.3	99.55
	6	21	1	72.8	99.50
1.0	2	26	3	89.1	99.60
	6	14	4	93.8	99.23
2.0	2	14	4	108.5	99.67
	6	8	5	112.3	99.55

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคเอเลสเซอร์ และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงในอนาคต ตัวแปรสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาเพื่อบำบัดให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ประกอบด้วย

1. ปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมต่อปริมาณน้ำเสีย
2. พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการโคเอเลสเซอร์ ได้แก่ ลักษณะของตัวกลาง ความสูงของชั้นตัวกลาง และความเร็วของน้ำเสียที่ไหลผ่านชั้นตัวกลาง
3. พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี ได้แก่ ชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพียงพอต่อปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ

และในทางปฏิบัติการใช้น้ำมันตัดในการลดความร้อนที่เกิดจากการตัด กิ่งโลหะจะมีการเวียนน้ำมันตัดกลับมาใช้ซ้ำจนน้ำมันตัดมีความเข้มข้นประมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร (ชฎานิน พรหมจันทร์, 2554) ดังนั้นการน้ำมันตัดจากน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์กลับมาใช้ใหม่จึงต้องรอให้เกิดการสะสมชั้นน้ำมันที่ผิวหน้าจนมีความเข้มข้นมากเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตารางที่ 4-27 ตัวแปรการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการอัลตราฟิเตรชัน ที่ความเข้มข้นน้ำเสีย 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร

ตัวแปรการออกแบบ	ค่าการออกแบบ
ปริมาณสารแคลเซียมคลอไรด์	2 กรัมต่อลิตร
อัตราเร็วการไหลของน้ำเสีย	2 เซนติเมตรต่อวินาที
ลักษณะของตัวกลาง	ทรงกระบอกกลาง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	10 เซนติเมตร
ชนิดของขั้วไฟฟ้า	อะลูมิเนียม
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ (อิมัลชันน้ำมันคิงตัว) ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้กระบวนการร่วระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งได้ทำการศึกษาปริมาณสารเคมีที่ใช้ ลักษณะและความสูงของชั้นตัวกลาง ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย ชนิดขั้วไฟฟ้า และความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าเหมาะสม เพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำ สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

- จากการศึกษเพื่อหาปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมต่อการทำลายเสถียรภาพของ น้ำมันตัดที่แขวนลอยในน้ำเสียและมีลักษณะเป็นอิมัลชันคิงตัวด้วยวิธีจารทดสอบ พบว่าปริมาณ แคลเซียมคลอไรด์ที่สามารถลดความขุ่นของน้ำมันได้สูงที่สุดในงานวิจัยนี้คือ 8 กรัมต่อลิตร สำหรับน้ำ เสียความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตรโดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 50-60 % ซึ่ง ประสิทธิภาพการบำบัดอาจไม่สูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เติมลงไปแต่ข้อดีของ แคลเซียมคลอไรด์คือสามารถทำงานได้กับทุกช่วงพีเอชของน้ำเสียและไม่ทำให้พีเอชของน้ำเสีย เปลี่ยนแปลง อีกทั้งไม่มีการสร้างตะกอนเคมี แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแคลเซียมคลอไรด์ละลายน้ำจะแตก ตัวให้  $Ca^{2+}$  ซึ่งส่งผลให้น้ำเสียมีความกระด้าง และค่าของแข็งละลายเพิ่มสูงขึ้น และปริมาณ  $Cl^-$  ในน้ำ เสียก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยดังนั้นในการทดลองกระบวนการร่วจึงเลือกเติมแคลเซียมคลอไรด์เพียง 2 กรัม ต่อลิตรและ 6 กรัมต่อลิตร เพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบและเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการ เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการทางกายภาพโดยลดปริมาณการใช้สารเคมี

- จากการศึกษาลักษณะของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ โดยเลือกใช้วัสดุที่ทำจากพลาสติกโพลีพร ไพลีน พบว่าเป็นตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำ (Oleophilic or Hydrophobic material) โดยรูปร่างลักษณะ ของตัวกลางที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 รูปร่าง คือ ทรงกลม เส้นใยและทรงกระบอกกลวง ซึ่ง ลักษณะของตัวกลางสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-4

- จากการศึกษาเพื่อหาลักษณะของตัวกลางที่เหมาะสมต่อกระบวนการโคอะเลสเซอร์พบว่า ขนาดของช่องว่างภายในชั้นตัวกลางส่งผลต่อเส้นทางการไหลของน้ำเสียที่แตกต่างกัน โดยตัวกลาง แบบทรงกลมมีช่องว่างระหว่างตัวกลางค่อนข้างเล็กและไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้อนุภาคน้ำมันมีความถี่ในการชนตัวกลางมากจึงส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสแตกตัวเป็นอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กอีกครั้งได้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงต่ำมาก ในขณะที่ตัวกลางแบบทรงกระบอกกลวงมีช่องว่าง ขนาดใหญ่และการเรียงตัวที่ค่อนข้างเป็นระเบียบส่งผลต่อเส้นทางการไหลของน้ำเสียไหล และมี ความถี่ในการชนตัวกลาง ไม่มากจนเกินไป อนุภาคน้ำมันจึงรวมตัวกันและพากันออกจากชั้นตัวกลาง ได้ดี ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยตัวกลางแบบทรงกระบอกกลวงจึงสูงที่สุดสำหรับทุกช่วง

อัตราการไหล อีกทั้งความสูงของชั้นตัวกลางที่มากส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสในการชนและสัมผัสกันมากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้

- จากการศึกษาเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำเสียที่เหมาะสมต่อกระบวนการโคอะเลสเซอร์ พบว่าอัตราการไหลสูงๆส่งผลให้เวลากักของอนุภาคน้ำมันในถังปฏิกิริยาต่ำ ความถี่ในการชนและสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมันจึงมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอัตราการไหลต่ำๆ จากการศึกษาในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่า ตัวกลางโคอะเลสเซอร์ที่เหมาะสมคือตัวกลางแบบทรงกระบอกกลวงโดยมีความสูงของชั้นตัวกลาง 10 เซนติเมตร และมีอัตราการไหล 2 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร และเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตรได้ถึง 40 %

- พบว่าเมื่อใช้ถังปฏิกิริยาขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร และเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถังปฏิกิริยาขนาดเล็ก โดยเพิ่มจาก 40 % เป็น 55.65% ทั้งนี้เพราะเวลากักของอนุภาคน้ำมันในถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นน้ำมันจึงมีเวลาในการรวมตัวกันมากกว่าการใช้ถังปฏิกิริยาขนาดเล็ก และเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคลอไรด์เป็น 6 กรัมต่อลิตร จะได้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงถึง 75.58 % ซึ่งสูงกว่าการเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตรเพียงอย่างเดียว ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพียง 49.35% นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะเพิ่มสูงขึ้นด้วยเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเสียสูงๆจะมีปริมาณน้ำมันมาก อนุภาคน้ำมันจึงมีความถี่ในการชนและสัมผัสกันเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้มากและพากันลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น

- จากการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม โดยมีระยะห่าง 3 เซนติเมตรและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เนื่องจากขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม แตกตัวให้ฟองก๊าซไฮดรอกไซด์ซึ่งช่วยพาอนุภาคน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น และส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำเสียสูงขึ้นจากเดิมเล็กน้อย แต่ยังคงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่ากระบวนการโคอะเลสเซอร์ และมีอัตราการลดลงของความขุ่นเร็วกว่ากระบวนการโคอะเลสเซอร์อีกด้วย โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาและประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์และกระบวนการโคอะเลสเซอร์ สรุปไว้ในตารางที่ 5-1 ถึง 5-3

ตารางที่ 5-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนโคอะเลสเซอร์และกระบวนการอิเล็กโตรสตาทิกโคอะเลสเซอร์

ความเข้มข้น น้ำเสีย (g/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%) เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที					
	เติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการเติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l	อิเล็กโตรสตาทิก โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการเติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l	เติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการเติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l	อิเล็กโตรสตาทิก โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการเติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l
0.5	21.89	55.30	75.98	48.86	67.26	81.07
1.0	30.60	55.65	79.14	57.80	75.58	83.44
2.0	40.98	77.93	87.73	76.16	94.03	94.30

ตารางที่ 5-2 เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคน้ำมัน ความเร็วลอยตัว และค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนโคอะเลสเซอร์และกระบวนการอิเล็กโตรสตาทิกโคอะเลสเซอร์

ความเข้มข้น น้ำเสีย (g/l)	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการเติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l			อิเล็กโตรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ ร่วมกับ การเติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l		
	D <sub>mean</sub> (μm)	U <sub>T</sub> (m/s)	k (min) <sup>-1</sup>	D <sub>mean</sub> (μm)	U <sub>T</sub> (m/s)	K (min) <sup>-1</sup>
0.5	3.605	7.2 × 10 <sup>-7</sup>	5.648 × 10 <sup>-5</sup>	8.09	3.6 × 10 <sup>-6</sup>	4.374 × 10 <sup>-2</sup>
1.0	5.712	1.8 × 10 <sup>-6</sup>	1.426 × 10 <sup>-5</sup>	17.59	1.7 × 10 <sup>-5</sup>	2.284 × 10 <sup>-1</sup>
2.0	7.685	3.3 × 10 <sup>-6</sup>	1.475 × 10 <sup>-4</sup>	19.50	2.1 × 10 <sup>-5</sup>	7.821 × 10 <sup>-1</sup>

ตารางที่ 5-3 เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคน้ำมัน ความเร็วลอยตัว และค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนโคอะเลสเซอร์และกระบวนการอิเล็กโตรสตาทิกโคอะเลสเซอร์

ความเข้มข้น น้ำเสีย (g/l)	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการเติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l			อิเล็กโตรสตาทิกโคอะเลสเซอร์ ร่วมกับ การเติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l		
	D <sub>mean</sub> (μm)	U <sub>T</sub> (m/s)	k (min) <sup>-1</sup>	D <sub>mean</sub> (μm)	U <sub>T</sub> (m/s)	k (min) <sup>-1</sup>
0.5	4.815	1.3 × 10 <sup>-6</sup>	4.569 × 10 <sup>-4</sup>	18.18	1.8 × 10 <sup>-5</sup>	1.779 × 10 <sup>-3</sup>
1.0	6.688	2.4 × 10 <sup>-6</sup>	4.273 × 10 <sup>-2</sup>	18.56	1.9 × 10 <sup>-5</sup>	6.658 × 10 <sup>-2</sup>
2.0	12.42	8.5 × 10 <sup>-6</sup>	7.307 × 10 <sup>-2</sup>	22.91	2.9 × 10 <sup>-5</sup>	1.436 × 10 <sup>-1</sup>

แต่อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ยังคงมีค่าความขุ่นสูง ดังนั้นในขั้นตอนสุดท้ายจึงเลือกกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมาบำบัดน้ำเสียในส่วนสุดท้ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด

จากการศึกษากระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการอเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าความขุ่นของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการร่วมมีความขุ่นอยู่ในช่วง 1-5 NTU และพบว่าการเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่เกิดการอุดตันที่ผิวหน้าของเมมเบรนเร็วกว่าการเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร โดยค่าประสิทธิภาพการบำบัดแสดงดังตารางที่ 4-27

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการอเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ได้ข้อสรุปดังนี้

- ควรใส่แคลเซียมคลอไรด์เป็นขั้นตอนแรกเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันเสียก่อน เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่มีเสถียรภาพ ยังคงมีศักย์ไฟฟ้าสูงจึงเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคน้ำมัน ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ส่งผลให้ความเร็วในการลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมันต่ำจึงต้องใช้เวลาานมากจึงแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้
- เมื่อน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพแล้วควรเพิ่มโอกาสในการชนและสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมันด้วยกระบวนการโคอะเลสเซอร์
- ใช้กระแสอเล็กตรอนช่วยให้เกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างอนุภาคแบบ Induce-Induce Dipole และอาศัยฟองก๊าซไฮโดรเจนในการพาอนุภาคน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำเสียเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและเพิ่มปริมาณน้ำมันบนผิวหน้าน้ำเสียภายในระยะเวลาจำกัด โดยมีต้นทุนในการเดินระบบต่ำและไม่ยุ่งยาก
- เมื่อน้ำมันลอยไปรวมตัวเกิดเป็นชั้นน้ำมันที่ผิวหน้า ควรนำน้ำเสียด้านล่างที่มีความขุ่นต่ำลงมากแล้วเข้าสู่กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพื่อลดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียให้ผ่านค่ามาตรฐาน โดยพารามิเตอร์ที่เลือกใช้สรุปไว้ในตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 สรุปค่าพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ โทรσταติกโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ความเข้มข้นน้ำมัน	0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร
ชนิดตัวกลาง	โพลีพรไพลีน
ลักษณะตัวกลาง	ทรงกระบอกกลวง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	10 เซนติเมตร
อัตราการไหลของน้ำเสีย	2.0 เซนติเมตรต่อวินาที
ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์	2 กรัมต่อลิตร
ชนิดของขั้วไฟฟ้า	อะลูมิเนียม
ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	3 เซนติเมตร
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
เมมเบรน	UF

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรมีการนำกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ โทรσταติกโคอะเลสเซอร์ และกระบวนการเมมเบรนไปประยุกต์ใช้ ดังนี้

- ใช้บำบัดกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่เกิดขึ้นจริง หรือน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมันเครื่อง เป็นต้น
- ศึกษากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพื่อการบำบัดน้ำเสียจริง เนื่องจากในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมมเบรนแบบปิดตาย ซึ่งเหมาะแก่การทดลอง
- อาจเพิ่มจำนวนของขั้วไฟฟ้าหรือพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้เหมาะสมกับอัตราการไหลของน้ำเสียจริง
- ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำมากๆ เพื่อลดปัญหาจากตะกอนที่เกิดจากขั้วไฟฟ้า และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ
- ใช้ขั้วไฟฟ้าแทนการเติมอากาศแบบปกติ

## รายการอ้างอิง

### ภาษาอังกฤษ

- Aurette Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok : Chulalongkorn.
- Anderson, J.E., Kim, B.R., Mueller, S.A. and Lofton, T.V. 2003. Composition and analysis of Mineral Oils and Other Organic Compounds in Metalworking and Hydraulic Fluids. Environmental Science and Technology 33: 73-109.
- Boyson T.K., Pashyley R.M. 2007. A study of oil droplet coalescence. Journal of colloid and interface science. 316: 59-65.
- Chen X., Chen G. and Yue P.L. 1999. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. Separation and Purification Technology. 19: 65-76.
- Ichikawa T., Dohda T. and Nakajima Y. 2006. Stability of oil-in-water emulsion with mobile surface charge. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 279: 128-141.
- Ichikawa T., Itoh K., Yamamoto S. and Sumita M. 2004. Rapid demulsification of dense oil-in- water emulsion by low external electric field I. Experiment evidence. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 242: 21-26.
- Ichikawa T. 2007. Electrical demulsification of oil-in-water emulsion. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 302: 581-586.
- Li J. and Gu Y. 2005. Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. Separation and Purification. 42: 1-13.
- Rachu, S. 2005. Computer program development for oily wastewater treatment process selection, design and simulation. Doctoral dissertation Department of Environment The Institut National des Sciences Appliquées of Toulouse.



- Rios G., Pazos C., and Coca J. 1998. Destabilization of cutting oil emulsions using inorganic salts as coagulants, Physicochemical and engineering aspects, Vol. 138, pp. 383-389.
- Rosen M.J. 1989. Surfatants ad Interfacial Phenomena. 2<sup>nd</sup> edition. New York : John Wiley&Son.
- Salahi, A., Abbasi, M. and Mohammadi, T. 2010. Permeate flux decline during UF of oily wastewater: Experimental and modeling. Desalination. 251: 153-160.
- Seungkwan Hong., Ron, S., Faibish, and Menachem Elimelech. 1997. Kinetics of Permeate Flux Decline in Crossflow Membrane Filtration of Colloidal Suspensions. Journal of Colloid and Interface Science. 196: 267-277.


## ภาษาไทย

- ชั้นทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา. 2552. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีเมษ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- มันสิน ตันตุลเวศน์. 2539. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันตุลเวศน์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์. 2552. การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก ก  
รายงานผลการทดลอง  
ผลการศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-1 ค่าความขุ่นเฉลี่ยของน้ำเสียก่อนและหลังเติมแคลเซียมคลอไรด์

ความเข้มข้นน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร)	ความขุ่นเฉลี่ยเริ่มต้น (NTU)	ความขุ่นเฉลี่ยหลังตกตะกอน 2 ชั่วโมง (NTU)	% กำจัดความขุ่น
0.5	1	772	498	35.5
	2	780	419	46.2
	3	791	399	49.5
	4	779	382	50.9
	5	775	340	56.0
	6	782	312	60.0
	7	780	298	61.7
	8	775	283	63.4
1.0	1	1525	1020	32.7
	2	1525	925	39.3
	3	1518	850	44.0
	4	1520	825	45.7
	5	1515	805	46.8
	6	1521	770	49.3
	7	1517	752	50.4
	8	1512	715	52.6
2.0	1	3103	2125	31.5
	2	3112	1989	36.0
	3	3105	1905	38.6
	4	3100	1850	40.3
	5	3098	1730	44.1
	6	3108	1642	47.1
	7	3090	1589	48.5
	8	3095	1540	50.2



ภาคผนวก ข  
รายงานผลการทดลอง  
ผลการศึกษาการใช้กระบวนการทางเคมีร่วมกับกระบวนการโคอะเลสเซอร์  
ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-1 ค่าความขุ่นของน้ำเสียหลังบำบัดของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)				
	ไม่เติม $\text{CaCl}_2$	เติม $\text{CaCl}_2$ 2 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการ เติม $\text{CaCl}_2$ 2 g/l	เติม $\text{CaCl}_2$ 6 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการ เติม $\text{CaCl}_2$ 6 g/l
0	702	215	214	201	198
20	699	198	157	170	127
40	698	185	133	140	93
60	698	180	119	121	85
80	697	174	109	117	78
100	697	170	101	104	71
120	697	168	96	103	65

ตารางที่ ข-2 ค่าความขุ่นของน้ำเสียหลังบำบัดของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)				
	ไม่เติม $\text{CaCl}_2$	เติม $\text{CaCl}_2$ 2 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการ เติม $\text{CaCl}_2$ 2 g/l	เติม $\text{CaCl}_2$ 6 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการ เติม $\text{CaCl}_2$ 6 g/l
0	1506	743	737	511	498
20	1505	649	543	411	338
40	1502	607	442	327	238
60	1500	571	390	250	185
80	1498	544	363	232	147
100	1497	528	353	219	140
120	1496	516	330	216	124

ตารางที่ ข-3 ค่าความขุ่นของน้ำเสียหลังบำบัดของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)				
	ไม่เติม CaCl <sub>2</sub>	เติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการ เติม CaCl <sub>2</sub> 2 g/l	เติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l	โคอะเลสเซอร์ ร่วมกับการ เติม CaCl <sub>2</sub> 6 g/l
0	2970	1173	1150	1020	1020
20	2962	913	522	707	400
40	2952	842	338	531	170
60	2946	779	295	409	157
80	2941	740	279	341	136
100	2941	720	277	284	123
120	2940	692	273	243	100

ตารางที่ ข-4 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด  
สังเคราะห์ความเข้มข้น 0.5 กรัม/ลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร เมื่อ  
ผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ขนาดเฉลี่ย	% การกระจายตัวของอนุภาค
0.8	0.041
0.9	0.022
1	0.364
2	1.014
3	2.389
4	0.498
5	5.301
7	12.77
10	12.68
13	32.52
14	20.38
17	11.99



ตารางที่ ข-4 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด  
สังเคราะห์ความเข้มข้น 0.5 กรัม/ลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร เมื่อ  
ผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ขนาดเฉลี่ย	% การกระจายตัวของอนุภาค
0.8	0.001
0.9	0.004
1	0.059
2	0.386
3	0.736
4	1.185
5	0.765
6	2.242
7	1.489
8	2.228
9	1.367
10	1.741
13	3.911
14	1.651
15	1.912
18	3.659
21	14.70
24	7.637
25	8.981
27	11.27
39	34.06

ตารางที่ ข-5 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด  
สังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร เมื่อ  
ผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ขนาดเฉลี่ย	% การกระจายตัวของอนุภาค
0.7	0.001
0.8	0.003
0.9	0.005
1	0.041
2	0.071
3	0.177
4	0.406
5	0.438
6	1.048
7	1.032
8	1.553
9	1.166
10	0.772
11	2.043
12	5.523
13	0.789
14	1.097
15	2.455
17	16.42
18	2.337
19	2.668
21	3.446
22	4.099
23	8.956
24	5.305
27	14.32
29	8.722
35	15.09

ตารางที่ ข-6 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด  
สังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร เมื่อ  
ผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ขนาดเฉลี่ย	% การกระจายตัวของอนุภาค
0.9	0.002
1	0.012
2	0.067
3	0.289
4	0.384
5	0.831
6	0.612
7	0.644
8	0.587
9	0.452
11	1.081
12	1.752
13	0.867
14	1.071
20	9.442
21	1.919
23	2.277
27	3.821
28	8.362
29	4.877
32	6.519
38	10.16
40	12.03
41	13.39
46	18.53

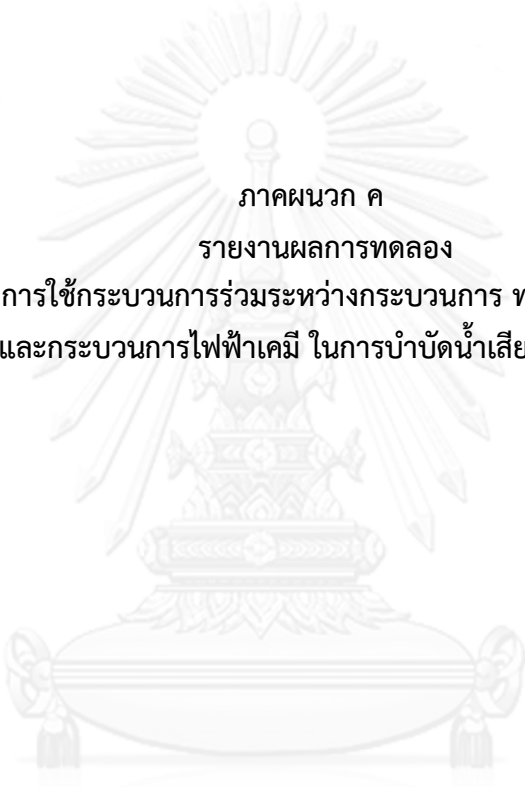
ตารางที่ ข-7 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด  
สังเคราะห์ความเข้มข้น 2 กรัม/ลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร เมื่อ  
ผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ขนาดเฉลี่ย	% การกระจายตัวของอนุภาค
1	0.011
2	0.103
3	0.151
4	0.401
5	0.489
6	0.814
7	0.265
8	0.529
9	0.261
11	0.227
12	1.182
13	1.463
14	1.793
15	1.815
16	0.663
19	10.09
21	4.299
22	1.666
23	2.092
24	2.261
26	2.790
28	3.562
32	5.191
34	6.534
39	28.85
41	10.58
42	11.90

ตารางที่ ข-8 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด  
สังเคราะห์ความเข้มข้น 2 กรัม/ลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร เมื่อ  
ผ่านกระบวนการโคอะเลสเซอร์

ขนาดเฉลี่ย	% การกระจายตัวของอนุภาค
1	0.004
2	0.017
3	0.036
4	0.056
5	0.165
6	0.176
7	0.144
8	0.067
9	0.207
10	0.297
11	0.301
12	0.191
13	0.639
14	0.461
15	0.756
16	1.146
18	4.080
19	1.174
20	0.909
21	1.083
22	0.569
23	0.692
24	2.289
25	5.292
26	0.949
28	1.269
29	1.291
30	2.999
33	2.029
35	7.025
36	5.099

37	5.410
38	2.937
39	3.276
40	7.031
41	15.24
43	4.234
44	4.496
45	4.912
46	5.398
47	5.648



ภาคผนวก ค  
รายงานผลการทดลอง  
ผลการศึกษาการใช้กระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการ ทางเคมี กระบวนการโคอะ  
เลสเซอร์ และกระบวนการไฟฟ้าเคมี ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-1 ค่าความขุ่นของน้ำเสียเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์ ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ความขุ่นของน้ำเสียเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์ (NTU)					
	แคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร			แคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร		
	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 2 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 5 A/m <sup>2</sup> C	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 10 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 2 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 5 A/m <sup>2</sup> C	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 10 A/m <sup>2</sup>
0	213	213	214	201	202	201
20	163	147	143	120	110	102
40	135	123	108	92	88	77
60	116	104	82	83	74	52
80	105	94	69	72	64	43
100	97	90	56	64	58	40
120	90	85	51	56	54	38

ตารางที่ ค-2 ค่าความขุ่นของน้ำเสียเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์ ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ความขุ่นของน้ำเสียเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์ (NTU)					
	แคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร			แคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร		
	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 2 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 5 A/m <sup>2</sup> C	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 10 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 2 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 5 A/m <sup>2</sup> C	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 10 A/m <sup>2</sup>
0	746	731	747	525	521	517
20	606	577	513	328	310	293
40	461	425	403	216	207	195
60	375	346	309	166	157	145
80	355	312	205	136	130	110
100	331	299	176	126	119	96
120	309	277	156	116	105	85



ตารางที่ ค-3 ค่าความชุ่มของน้ำเสียเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสตาดิกโคอะเลสเซอร์ ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 2 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทึ)	ความชุ่มของน้ำเสียเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสตาดิกโคอะเลสเซอร์ (NTU)					
	แคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร			แคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร		
	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 2 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 5 A/m <sup>2</sup> C	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 10 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 2 A/m <sup>2</sup>	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 5 A/m <sup>2</sup> C	ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า 10 A/m <sup>2</sup>
0	1241	1244	1235	1102	1135	1122
20	655	619	544	327	320	305
40	320	394	322	213	149	132
60	298	275	205	126	116	108
80	269	241	176	115	105	89
100	247	218	163	104	90	76
120	239	207	151	95	82	64



ภาคผนวก ง

รายงานผลการทดลอง

ผลการศึกษาการใช้กระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการ ทางเคมี กระบวนการโคอะ  
เลสเซอร์ กระบวนการไฟฟ้าเคมี และ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันตัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ง-1 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการรวมของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)	เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)
1	4	22	1
2	3	23	1
3	1	24	1
4	1	25	1
5	1	26	1
6	1	27	1
7	1	28	1
8	1	29	1
9	1	30	1
10	1	31	1
11	1	32	1
12	1	33	1
13	1	34	1
14	1	35	1
15	1	36	1
16	1	37	1
17	1	38	1
18	1	39	1
19	1	40	1
20	1	41	1
21	1		

ตารางที่ ง-2 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการร่วมของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)
1	3
2	2
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1
13	1
14	1
15	1
16	1
17	1
18	1
19	1
20	1
21	1

ตารางที่ ง-3 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการร่วมของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)
1	12
2	10
3	6
4	4
5	3
6	3
7	3
8	3
9	3
10	3
11	3
12	3
13	3
14	3
15	3
16	3
17	3
18	3
19	3
20	3
21	3
22	3
23	3
24	3
25	3
26	3

ตารางที่ ง-4 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการร่วมของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)
1	15
2	12
3	8
4	6
5	5
6	4
7	4
8	4
9	4
10	4
11	4
12	4
13	4
14	4

ตารางที่ ง-5 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการร่วมของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 2.0 กรัมต่อลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)
1	20
2	12
3	8
4	7
5	5
6	4
7	4
8	4
9	4
10	4
11	4
12	4
13	4
14	4

ตารางที่ ง-6 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการรวมของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 2.0 กรัมต่อลิตรและเติมแคลเซียมคลอไรด์ 6 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)
1	24
2	14
3	10
4	6
5	5
6	5
7	5
8	5

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุรีย์พร เบญจประดิษฐ์ เกิดวันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2554



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**