

การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วย
กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์



นางสาวสุดสิริ รุติสุภวัฒน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT AND SEPARATION OF OILY WASTEWATER
BY ELECTROSTATIC COALESCER PROCESS



Miss Sutsiri Titasupawat

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วย

กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์

โดย

นางสาวสุดสิริ ชูตสุภวัฒน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

.....
(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ ไอสถาพันธุ์)

.....
(ดร. ศรายุทธ ราชู)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดสิริ จูตสุภวัฒน์ : การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็ก
 โทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์. (TREATMENT AND SEPARATION OF OILY
 WASTEWATER BY ELECTROSTATIC COALESCER PROCESS) อ.ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.พิสุทธิ เทียมมนกุล, 175 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวประจุลบชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสถาดิกโคอะเลสเซอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ซึ่งจะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเดินระบบแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง เช่น ความสูงของขั้วตัวกลาง ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย ชนิดขั้วไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากการทดลองพบว่าในการเดินระบบแบบไหลขึ้นต่อเนื่องควรวางตัวกลางเส้นใยของน้ำตูปลาหนา 3.5 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยสามารถใช้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าบริเวณด้านล่างแทนการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของน้ำมัน ในขณะที่การวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 เซนติเมตรและศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ สามารถส่งผลดีต่อทั้งประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงการเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสัมพันธ์กับกลไกการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า (Electrostatic coalescence) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำให้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปนเปื้อนสูง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้พบว่าสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ก่อให้เกิดความปั่นป่วนในระบบส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด ในด้านการเวียนน้ำเสียกลับเมื่อทำการเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์เข้าคอลัมน์ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ จะช่วยเพิ่มระยะเวลาและเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคน้ำมันให้มากขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดและความหนาของชั้นน้ำมันด้านบนที่เพิ่มขึ้นกว่า 15 และ 25 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยสรุปการเดินระบบดังกล่าวมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัด รวมถึงการนำกลับน้ำมันออกจากน้ำเสียที่มีความคงตัวสูงในอนาคต

ภาควิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต สุดสิริ จูตสุภวัฒน์
 สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก [Signature]
 ปีการศึกษา...2552

5070632521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : OILY WASTEWATER / SURFACTANT / ELECTROSTATIC COALESCER
PROCESS / RECIRCULATED

SUTSIRI TITASUPAWAT : Treatment and separation of oily wastewater by
Electrostatic Coalescer process. Thesis Adviser: Pisut Painmanakul, Ph D.,
175 pp.

The objective of this research was to study the treatment of 5,000 mg/l of palm-oily wastewater containing with anionic surfactant (Sodium Dodecyl Sulphate, SDS) by Electrostatic Coalescer process. Various factors, like types and height of coalescing beds, liquid flow rate, type and distance of electrodes, applied voltage and addition of electrolyte were analyzed in both batch and continuous processes. The result has shown that the highest COD removal efficiency was obtained by using polyester bed (aquarium fiber) 3.5 cm height and 5 L/hr as continuous liquid flow rate. It is possible to apply the electro-coagulation/flotation instead of chemical addition at the bottom of coalescer column for enhancing the overall treatment efficiencies. Moreover, the highest efficiencies can be obtained with the 3 cm of aluminum electrodes located at top of coalescer column, especially at lowest voltage applied: this corresponds with electrocoalescence mechanism increasing the oil droplet size in concentrated liquid phase. Negative effect of electrolyte addition was observed in this work, whereas the treatment efficiencies can be enhanced for the 50% liquid recirculation into reactor with 1 L/hr and 3V in voltage: the treatment efficiencies and oil layer thickness can be increased about 15% (50-65% to 60 -70%) and 25% (2.4 to 3.2 cm) respectively. Finally, in future, the electrostatic coalescer process should be possibly applied for not only treating the stabilized oily wastewater but also recovering the oil phase.

Department : Environmental Engineering

Student's Signature : Sutira

Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature : Pisut Painmanakul

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ คณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่านที่ได้ให้ความรู้

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้เงินสนับสนุนสำหรับการทำวิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่านที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและให้คำแนะนำในการใช้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณแม่ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ.....	4
2.2 สารลดแรงตึงผิว.....	6
2.3 อิมัลชัน (Emulsion).....	7
2.4 อิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว.....	8
2.5 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย.....	9
2.6 โคอะเลสเซอร์ (Coalescer).....	13
2.7 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation).....	18
2.8 การรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน.....	21
2.9 ไฟฟ้า.....	24
2.10 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	30
2.11 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	35
2.12 ทฤษฎีดีแอลวีไอ (DLVO theory).....	38
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41

บทที่	หน้า
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	54
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	54
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	57
3.3 สรุปตัวแปรที่ศึกษา.....	72
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	73
4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	73
4.2 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการทำลายเสถียรภาพ.....	79
4.3 การศึกษากระบวนการทางไฟฟ้า.....	85
4.4 การศึกษากระบวนการอิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์.....	95
4.5 การปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	103
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	116
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	116
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	120
รายการอ้างอิง.....	121
ภาคผนวก.....	125
ภาคผนวก ก.....	126
ภาคผนวก ข.....	142
ภาคผนวก ค.....	149
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	175

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย.....	12
2-2	ผลกระทบของลักษณะสมบัติของอิมัลชันต่อการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน.....	18
2-3	ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE	27
2-4	ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส.....	33
3-1	ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์ม.....	56
3-2	ลักษณะสมบัติของ Sodium lauryl sulfate (Anionic Surfactant).....	56
3-3	ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	58
3-4	ตัวแปรในการศึกษาลักษณะของตัวกลาง.....	60
3-5	ตัวแปรในการศึกษาความสูงของชั้นตัวกลาง.....	61
3-6	ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	62
3-7	ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยวิธีจาร์เทสต์...	63
3-8	ตัวแปรในการศึกษาผลของการเติมสารเคมีในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	64
3-9	ตัวแปรในการศึกษาชนิดขั้วไฟฟ้า.....	65
3-10	ตัวแปรในการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า.....	66
3-11	ตัวแปรในการศึกษาการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างในโคอะเลสเซอร์แบบไม่มีตัวกลาง.....	67
3-12	ตัวแปรในการศึกษาตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าในโคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง....	68
3-13	ตัวแปรในการศึกษาผลจากการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์	69
3-14	ตัวแปรในการศึกษาการเวียนกลับของน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์.....	70
3-15	สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์.....	72
4-1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์.....	74
4-2	ลักษณะสมบัติของตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	76
4-3	ตารางสรุปข้อดี-ข้อเสีย.....	82
4-4	ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม.....	86
4-5	ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	87
4-6	ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์.....	88

ตารางที่		หน้า
4-7	ขนาดของฟองก๊าซของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ความต่างศักย์ต่างๆ.....	89
4-8	ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ความต่างศักย์ต่างๆ.....	91
4-9	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทางไฟฟ้า.....	94
4-10	ขนาดอนุภาคน้ำมันกรณีวางขั้วไฟฟ้าด้านล่างแบบไม่มีตัวกลางในโคอะเลสเซอร์	97
4-11	ขนาดอนุภาคน้ำมันกรณีวางขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง....	101
4-12	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรสแตติกโคอะเลสเซอร์.....	102
4-13	เปรียบเทียบผลของการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	104
4-14	ประสิทธิภาพการบำบัดและความสูงชันน้ำมันกรณีเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์.....	110
4-15	ปริมาณน้ำมัน ณ จุดเก็บต่างๆ.....	111
4-16	สรุปและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดจากกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละการทดลอง	112
4-17	สรุปและวิเคราะห์ขนาดอนุภาคน้ำมันจากการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	113
4-18	สรุปและวิเคราะห์ความหนาของน้ำมันจากการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	115

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรงดึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ.....	5
2-2	การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงดึงผิวร่วม.....	6
2-3	โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงดึงผิว.....	6
2-4	ประเภทของสารลดแรงดึงผิวเมื่อแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำ.....	7
2-5	ลักษณะของอิมัลชัน.....	8
2-6	ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์.....	9
2-7	โมเลกุลของสารลดแรงดึงผิวในการเกิดไมเซลล์.....	9
2-8	อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	13
2-9	การส่งถ่าน้ำมันเข้าสัมผัสผิวตัวกลาง.....	14
2-10	การต่อวงจรไฟฟ้า.....	22
2-11	อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic).....	23
2-12	อิเล็กโทรโคแอกคูเลชัน (Electrocoagulation).....	23
2-13	อิเล็กโทรโคอะเลสเซนซ์ (Electrocoalescence).....	24
2-14	องค์ประกอบของการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี.....	30
2-15	การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	31
2-16	ความสัมพันธ์แบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	36
2-17	ความสัมพันธ์แบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	36
2-18	พลังงานที่ขวางกั้น (Height of potential energy barrier).....	40
2-19	เวลาที่ใช้ทำลายเสถียรภาพอิมัลชันเมื่อผ่านสนามไฟฟ้า.....	43
2-20	การทำลายเสถียรภาพด้วยไฟฟ้า.....	43
2-21	กระแสไฟฟ้ากับการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชัน.....	44
2-22	ศักย์ไฟฟ้ากับการเคลื่อนที่ของประจุที่ผิวอนุภาคน้ำมัน.....	44
2-23	ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ที่ความเข้มข้นของน้ำมันต่างๆ.....	46
2-24	การรวมตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความยาวของชั้นตัวกลางต่างๆ.....	46
2-25	ตัวกลางแบบเส้นใยทำจากสแตนเลสสตีล.....	47
2-26	ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์กับความสูงของชั้นตัวกลางที่ความเร็วการไหล ต่างๆ.....	48

ภาพที่		หน้า
2-27	ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์แบบวางตัวกลางสลับกับช่องว่าง.....	48
2-28	เปรียบเทียบกลไกการรวมตัวของหยดน้ำมันในของโคอะเลสเซอร์แบบวาง ตัวกลางสลับกับช่องว่างกับโคอะเลสเซอร์แบบธรรมดา.....	49
2-29	แผนผังการต่ออุปกรณ์.....	50
2-30	ความเข้มข้นของน้ำออกที่เวลาต่างๆ.....	51
3-1	แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	54
3-2	แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โคอะเลสเซอร์.....	54
3-3	แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์.....	58
3-4	แรงดึงผิวระหว่างน้ำ น้ำมันและตัวกลาง.....	59
3-5	แผนผังการศึกษาลักษณะของตัวกลาง.....	60
3-6	แผนผังการศึกษาความสูงของชั้นตัวกลาง.....	61
3-7	แผนผังการหาค่าอัตราการไหล.....	62
3-8	แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ.....	63
3-9	แผนผังการหาความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสม.....	64
3-10	แผนผังการหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	65
3-11	แผนผังการหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	66
3-12	แผนผังศึกษาการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างในโคอะเลสเซอร์แบบไม่มีตัวกลาง.....	67
3-13	แผนผังการหาตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าในโคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง.....	68
3-14	แผนผังศึกษาผลจากการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	70
3-15	แผนผังศึกษาการเวียนกลับของน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์.....	71
4-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับปริมาณสารลดแรงตึงผิว.....	73
4-2	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น.....	75
4-3	ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา.....	76
4-4	ผลของประสิทธิภาพการบำบัดที่ความสูงต่างๆ ของตัวกลาง.....	77
4-5	ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	78
4-6	ประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชและปริมาณสารเคมีต่างๆ.....	80
4-7	ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเติมสารส้ม.....	81
4-8	ตะกอนจากการเติมสารส้มที่ความเข้มข้นต่ำและสูงตามลำดับ.....	82

ภาพที่		หน้า
4-9	ประสิทธิภาพการบำบัดของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ระยะ 3 เซนติเมตร ที่ ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ.....	85
4-10	พีเอชหลังทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร.....	86
4-11	พีเอชหลังทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร.....	87
4-12	พีเอชหลังทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร.....	88
4-13	รูปจำลองอุปกรณ์ถ่ายภาพก๊าส	89
4-14	ประสิทธิภาพการบำบัดที่ 1, 5, 10 และ 20 โวลต์ ตามลำดับ.....	92
4-15	จลนศาสตร์ของค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ 1 โวลต์ สำหรับการทดลองต่างๆ..	96
4-16	ประสิทธิภาพกรณีวางขั้วไฟฟ้าด้านล่าง (ไม่มีตัวกลางโคอะเลสเซอร์).....	96
4-17	ประสิทธิภาพกรณีวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่าง.....	98
4-18	ประสิทธิภาพกรณีวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบน.....	99
4-19	การรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน.....	100
4-20	ประสิทธิภาพกรณีวางขั้วไฟฟ้าด้านบนและเติมอิเล็กโทรไลต์.....	103
4-21	การสลายของขั้วไฟฟ้าเมื่อไม่เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	106
4-22	การสลายของขั้วไฟฟ้าเมื่อเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 มิลลิโมล/ลิตร.....	106
4-23	ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนที่อัตราการไหลต่างๆ จาก การเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่องที่ระยะ 5 ชั่วโมง.....	108
4-24	ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างที่อัตราการไหลต่างๆ จาก การเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่องที่ระยะ 5 ชั่วโมง.....	108
4-25	ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ ด้านบน.....	109
4-26	ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ ด้านล่าง.....	109
4-27	ลักษณะขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังการทดลอง.....	110
4-28	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละการทดลอง.....	112
4-29	เปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันของแต่ละการทดลอง.....	113
4-30	เปรียบเทียบความหนาของน้ำมันของแต่ละการทดลอง.....	114
5-1	รูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิว ประจุลบ.....	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้น้ำมันเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องมาจากการพัฒนาทางสังคม เศรษฐกิจและวัฒนธรรม ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของน้ำมันลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งมีสาเหตุจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม กระบวนการผลิตน้ำมัน การขนส่งน้ำมันและการใช้น้ำมันในรูปแบบต่างๆ ได้ น้ำมันจัดเป็นสารปนเปื้อนชนิดหนึ่งที่มักพบในน้ำเสีย ซึ่งพบได้ทั้งในน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันมีอยู่หลายรูปแบบ คือ น้ำมันที่อยู่ในรูปฟิล์มลอยอยู่บนผิวน้ำ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว และน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้ แต่ที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดคือ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบซึ่งมีเสถียรภาพและยากต่อการบำบัดมากที่สุด (Rosen, 1989) ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของน้ำมันจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนมีค่าอยู่ในช่วง 4,000-8000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Kajitvichyanukul, 2006) แต่เนื่องจากตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้ค่าน้ำมันและไขมันสามารถปล่อยออกได้ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 4, 2539) ดังนั้นคราบน้ำมันจึงปนเปื้อนตามแหล่งน้ำธรรมชาติกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และทำให้สุนทรียภาพของแหล่งน้ำนั้นเสียไป

ส่วนมากการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานปาล์มจะผ่านบ่อดักไขมัน โดยกักน้ำเสียไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้ไขมันและน้ำมันมีโอกาสลอยตัวขึ้นมาสะสมกันอยู่บนผิวน้ำและผ่านระบบการใช้อากาศเป่าลงในน้ำเสียจนอิมัลชันและพาน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ นอกจากนี้การบำบัดน้ำมันด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการตกตะกอน กระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการกรอง เป็นต้น แต่ก็ยังไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด เนื่องจากหยดน้ำมันขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะทำให้กระบวนการตกตะกอนใช้เวลานานมากขึ้น และยังกระทบต่อกระบวนการบำบัดทางชีวภาพโดยหยดน้ำมันจะขัดขวางการใช้ออกซิเจนของจุลชีพ รวมทั้งหยดน้ำมันยังทำให้กระบวนการกรองเกิดการอุดตันได้อีกด้วย

ด้วยองค์ความรู้เกี่ยวกับการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันในประเทศยังมีอยู่จำกัด ทำให้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาคารปนเปื้อนของน้ำมันได้อย่างสมบูรณ์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งหมายที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการแยกน้ำมันออกจากน้ำ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยที่อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้แยกอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึง

ผิวได้ ในขณะที่กระบวนการทางไฟฟ้าก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้จึงนำทั้งสองกระบวนการมารวมกันเพื่อบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว เพื่อที่จะสามารถแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษา อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย ชนิดสารลดแรงตึงผิว ชนิดของตัวกลาง การแบ่งชั้นของตัวกลาง ในส่วนโคอะเลสเซอร์ คักย์ไฟฟ้า ชนิดขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และการเวียนกลับของน้ำเสีย เพื่อทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

1.2.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกชั้นน้ำมันสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพ เช่น อัตราการไหลของน้ำเสีย การวนกลับของน้ำเสีย คักย์ไฟฟ้า ชนิดขั้วไฟฟ้า และระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการวิจัยระบบห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 รูปแบบถังปฏิกริยา

- ถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการไฟฟ้าเคมี ครอบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยดำเนินการทดลองแบบทีละเท (Batch Reactor)

- ถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ ครอบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 1 เมตร โดยดำเนินการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous flow Reactor)

1.3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำมันปาล์ม (บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ มหาชน) ปั่นกวนน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันกับสารลดแรงตึงผิว ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที นาน 30 นาที โดยมีความเข้มข้นของน้ำมัน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สารลดแรงตึงผิวที่ใช้คือ Sodium lauryl sulphate (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ใช้ค่าที่ 1 CMC (Critical micelle concentration) คือค่าความเข้มข้นที่ 0.008 โมล/ลิตร (2.31 กรัม/ลิตร) (ประจักษ์ ศาสตร์ เวช, 2551)

1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

- ความสูงของชั้นตัวกลาง 3.5, 7 และ 10.5 เซนติเมตร
- อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย 2.5, 5, 8 และ 12 ลิตร/ชั่วโมง
- ความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 และ 1 มิลลิโมล/ลิตร
- ชนิดของสารเคมี สารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์
- ความเข้มข้นสารเคมี 0.4-1.2 กรัม/ลิตร
- ชนิดขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์, อะลูมิเนียม-อะลูมิเนียมและเหล็ก-เหล็ก
- ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1, 3 และ 5 เซนติเมตร
- ศักย์ไฟฟ้า 0.5, 1, 3, 5, 10 และ 20 โวลต์
- อัตราการหมุนเวียนน้ำเสียกลับ โดยทำการทดลองที่ 50 เปอร์เซ็นต์

1.3.4 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์

- ค่ามอดุลัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคน้ำมันและตัวกลาง
- ค่าซีไอดี
- ความหนาของชั้นน้ำมัน
- ขนาดอนุภาคน้ำมัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้อุปกรณ์ชนิดใหม่เพื่อใช้บำบัดและแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย
- 1.4.2 สามารถนำน้ำมันที่แยกออกมากลับไปใช้ประโยชน์ได้
- 1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ

2.1.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ (มันรัศมี ตัณหุลเวศม์ และ มันลิน ตัณหุลเวศม์, 2545)

น้ำมันสามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย ซึ่งจะต้องพิจารณาจาก

- ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลงและเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าโพลาริตีที่สูงขึ้น

- ความสามารถในการระเหย (Volatility)

- ความสามารถของน้ำมันชนิดเบาจะดีกว่าน้ำมันชนิดหนัก ทั้งเรื่องความสามารถในการละลายน้ำและความสามารถในการระเหย

จากลักษณะของน้ำมันดังกล่าวมาแล้ว หากน้ำมันสามารถละลายน้ำได้ การตรวจสอบจะทำได้ยากนอกจากนี้ยังก่อให้เกิดผลกระทบเรื่องกลิ่นและรสของน้ำที่เปลี่ยนไป ดังนั้นถือว่าน้ำมันที่ละลายอยู่ในน้ำเป็นสารมลพิษที่อันตรายรูปแบบหนึ่ง

2.1.2 น้ำมันที่เป็นอิมัลชันไม่มีสารลดแรงตึงผิว

เป็นรูปแบบของอิมัลชันที่ไม่คงตัว (Non-stabilized emulsion) โดยที่อนุภาคอิมัลชันสามารถรวมตัวกันได้เองเมื่อสัมผัสกันและมีแนวโน้มที่จะรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการกระจาย (Degree of dispersion) หรือขนาดของอนุภาคน้ำมัน

- ถ้าอนุภาคลอยและกระจายอยู่ในน้ำนานถือว่าอิมัลชันมีความคงตัวมาก

- ถ้าขนาดอนุภาคเล็กเวลาในการลอยขึ้นและรวมตัวกับอนุภาคอื่นจะมาก

ดังนั้นขนาดอนุภาคจึงขึ้นอยู่กับลักษณะการกวนผสม เช่น พลังงานที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนและแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน

$$W_A = A_{OW} \times \gamma_{OW} \quad (2-1)$$

เมื่อ $W_A =$ พลังงานกลที่ใช้ (ergs/cm³)

$$A_{OW} = \text{พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำ (cm}^2\text{/cm}^3\text{)}$$

$$\gamma_{OW} = \text{แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (ergs/cm}^2 \text{ หรือ dyne/cm)}$$

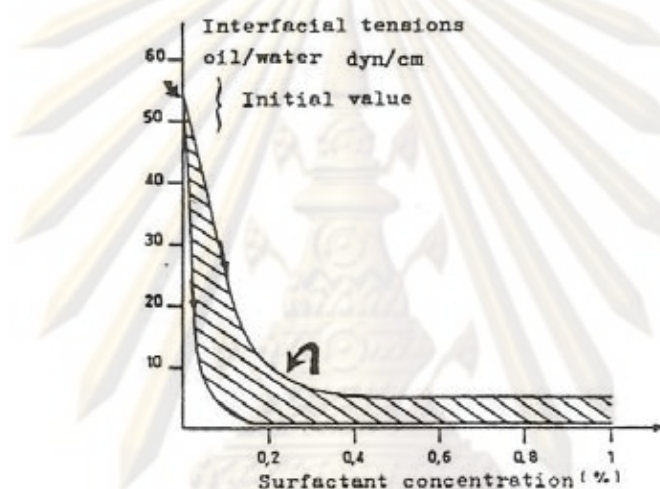
ดังนั้น พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำจึงมีค่าเท่ากับ

$$A_{OW} = \frac{W_A}{\gamma_{OW}} \quad (2-2)$$

แต่จะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น เมื่อหยุดการปั่นกวนหยดน้ำมันเหล่านี้จะรวมตัวกันและกลับมาแยกชั้นเช่นเดิม

2.1.3 น้ำมันที่เป็นอิมัลชันมีสารลดแรงตึงผิว

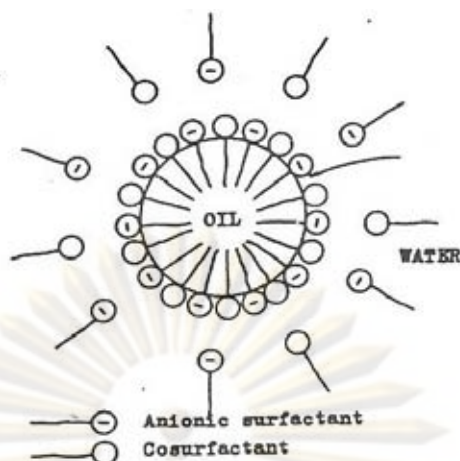
เป็นรูปแบบของอิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion) ซึ่งสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ ที่ใช้กันทั่วไปทั้งจากชุมชนและอุตสาหกรรมโดยสารลดแรงตึงผิวจะแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมัน เท่ากับการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน หรือลดแรงตึงระหว่างผิวของน้ำกับน้ำมันลง (ดังรูปที่ 2-1) ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เป็นสารกระจายมีขนาดเล็กจนไม่สามารถรวมตัวกันได้



รูปที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ (Aurelle, 1985)

นอกจากนี้ ถ้านำน้ำเสียปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวร่วม (Cosurfactant) ผลที่เกิดขึ้นคือจะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมจะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และจะไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวลง (ดังรูปที่ 2-2) ดังนั้นถ้าอิมัลชันมีสารลดแรงตึงผิวร่วมปนอยู่อนุภาคน้ำมันจะมีขนาดเล็กมาก (100-600 อังสตรอม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



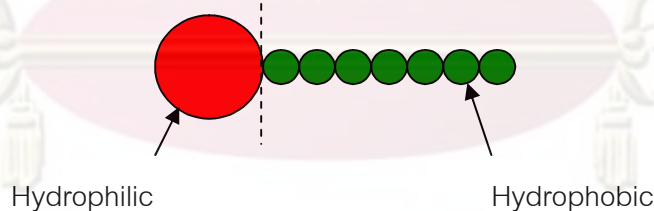
รูปที่ 2-2 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle, 1985)

2.1.4 ฟิล์มหรือชั้นน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ

น้ำมันส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงลอยอยู่บนผิวน้ำในลักษณะของฟิล์มบางๆ และบนเปลือกนี้สามารถเป็นพื้นที่กว้างแม้มีปริมาณน้ำมันน้อย เนื่องจากฟิล์มเหล่านี้มักมีเรียงตัวเป็นโมเลกุลเดี่ยว (Monolayer) จะแพร่กระจายขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสง โดยน้ำเสียลักษณะนี้สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าคือสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งอยู่ที่ผิวน้ำ

2.2 สารลดแรงตึงผิว (Rosen, 1989)

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมันประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Hydrophilic (ส่วนที่ชอบน้ำ) เป็นส่วนหัวของโมเลกุล และ Hydrophobic (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ) เป็นส่วนหางของโมเลกุล (ดังรูปที่ 2-3)



รูปที่ 2-3 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

สามารถแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนชอบน้ำออกเป็น 4 ประเภท (ดังรูปที่ 2-4) ได้แก่

2.2.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำเป็นประจุลบ นิยมใช้สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ในอุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน เป็นต้น โดยใช้มากถึง 49% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ขจัดคราบสกปรกได้ดี โดยส่วนมากอยู่ในรูปของ carboxylate, sulfate, sulfonate หรือ phosphate เป็นต้น

2.2.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำเป็นประจุบวก ส่วนมากจะเป็นพวก Quaternary ammonium ที่ไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะที่เป็นด่างสูง (pH 10 - 11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวกทำให้เกิดเป็นตะกอน ทั้งนี้สารลดแรงตึงผิวประเภทส่วนที่ชอบน้ำเป็นประจุบวกจะเกิดการระคายเคืองน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบ ดังนั้นจึงใช้เป็นส่วนประกอบของน้ำยาปรับผ้านุ่ม และครีมนวดผม เป็นต้น

2.2.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำไม่มีประจุ แต่สามารถพบพวกที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุได้ เช่น polyether หรือ polyhydroxyl ซึ่งใช้มากในกลุ่มของผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

2.2.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวก (Amphoteric surfactant)

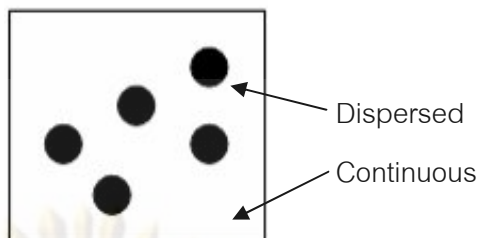
เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำเป็นได้ทั้งประจุลบและลบ โดยจะขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าเป็นด่าง (pH > 7) ประจุไฟฟ้าจะเป็นประจุลบ แต่ถ้าเป็นกรด (pH < 7) ประจุไฟฟ้าจะเป็นประจุบวก ส่วนสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดประจุไฟฟ้า สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม แต่ในปัจจุบันมีการนำไปใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่นๆ



รูปที่ 2-4 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวเมื่อแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำ

2.3 อิมัลชัน (Emulsion)

คือ ของผสมของของเหลวสองชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (ดังรูปที่ 2-5) โดยของเหลวที่มีลักษณะแขวนลอย เรียกว่า สารกระจาย (Dispersed หรือ Internal phase) และของเหลวอีกชนิด เรียกว่า สารต่อเนื่อง (Continuous หรือ External phase) และแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ **อิมัลชันตรง (Direct emulsion, O/W emulsion)** คือ อิมัลชันที่มีน้ำเป็นสารต่อเนื่องและน้ำมันเป็นสารกระจาย และ**อิมัลชันผกผัน (Inverse emulsion, W/O emulsion)** คือ อิมัลชันที่มีน้ำมันเป็นสารต่อเนื่องและน้ำเป็นสารกระจาย



รูปที่ 2-5 ลักษณะของอิมัลชัน

การจำแนกตามขนาดของอนุภาคน้ำมัน เป็นหลักเกณฑ์ที่สำคัญในการแบ่งลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน (Rachu, 2005)

2.3.1 อิมัลชันขั้นแรก (Primary emulsion)

เป็นน้ำเสียที่มีขนาดของอนุภาคอิมัลชันหรืออนุภาคน้ำมันเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 ไมครอน

2.3.2 อิมัลชันขั้นที่สอง (Secondary emulsion)

เป็นน้ำเสียที่มีขนาดของอนุภาคอิมัลชันหรืออนุภาคน้ำมันเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 20 ไมครอน

2.3.4 แมคโครอิมัลชัน (Macro emulsion)

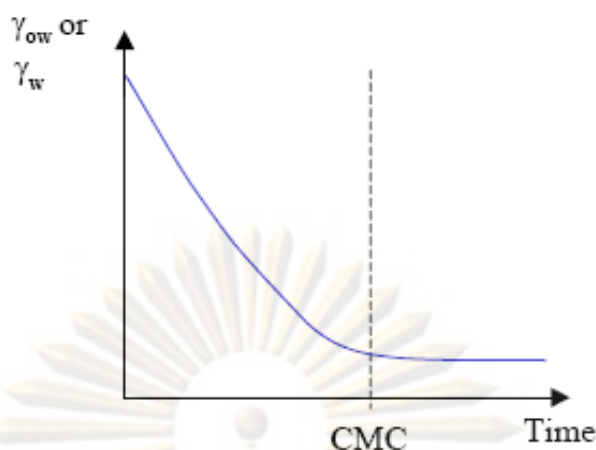
เป็นน้ำเสียที่มีสารลดแรงตึงผิวปนอยู่ด้วย ทำให้อิมัลชันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.06 - 1 ไมครอน จึงมองเห็นเป็นสีขาวขุ่นคล้ายนม (Milky appearance)

2.3.5 ไมโครอิมัลชัน (Micro emulsion)

เป็นน้ำเสียที่มีสารลดแรงตึงผิวปนอยู่ในปริมาณมาก ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเล็กมากอยู่ระหว่าง 10 - 60 นาโนเมตร อิมัลชันชนิดนี้จึงมีลักษณะโปร่งใสหรือโปร่งแสง

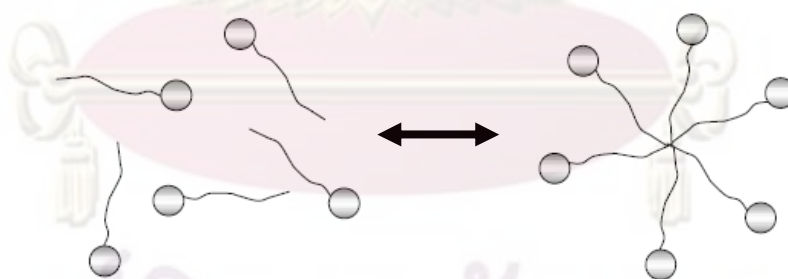
2.4 อิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว (Rosen, 1989)

น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ จะเป็นอิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion) โดยที่สารลดแรงตึงผิวจะแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมันเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กจนไม่สามารถรวมตัวกันได้ อนุภาคน้ำมันจึงมีความเสถียรเพิ่มขึ้นและยากต่อการบำบัด



รูปที่ 2-6 ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์

การเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำที่มีไขมันหรือน้ำมัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำและน้ำมันโดยส่วนหัว (ส่วนที่ชอบน้ำ) จะอยู่ในเฟสน้ำ และส่วนหาง (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ) จะอยู่ในเฟสน้ำมัน จึงทำให้ค่าแรงตึงผิวของน้ำมันลดลงและน้ำมันสามารถกระจายอยู่ในน้ำได้ ทั้งนี้เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในสารละลายจะกระจายตัวเป็นโมเลกุลเดี่ยวๆ (Unimolecular layer) อยู่ที่ผิวของสารละลายเท่านั้น ซึ่งเมื่อเติมในปริมาณมากขึ้น จะส่งผลให้แรงตึงผิวของสารละลายลดลงจนคงที่ได้เป็นค่าแรงตึงผิวที่ต่ำสุด (ดังรูปที่ 2-6) จึงเรียกความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในสารละลาย ณ จุดนี้ว่า ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC) และเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปอีกจะทำให้เกินค่า CMC และเกิดเป็นไมเซลล์ (ดังรูปที่ 2-7)



รูปที่ 2-7 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในการเกิดไมเซลล์

2.5 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย (แสดงดังตารางที่ 2-1)

2.5.1 กระบวนการแยกทางชีวภาพ (Biological processes)

เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่น้ำมันจะถูกย่อยสลายทางชีวภาพ แต่จะต้องบำบัดน้ำขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการ เช่น ระบบ Activated sludge, Tricking filter เป็นต้น

2.5.2 กระบวนการแยกทางเคมี (Chemical processes)

การเติมสารเคมีลงในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด เช่น การเติมคลอรีน (Cl_2) เป็นวิธีช่วยกำจัดไขมันต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ซึ่งคลอรีนที่เติมอยู่ในรูปของสารละลาย โดยเติมลงในถังตกตะกอนแรกหรือในถังเติมอากาศ

2.5.3 กระบวนการแยกทางกายภาพ-เคมี (Physio-Chemical processes)

2.5.3.1 การดูดซับ (Adsorption) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำได้ แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงและต้องมีการฟื้นฟูหรือเปลี่ยนคาร์บอนเมื่อเกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการดำเนินการแบบ Full-scale เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activate carbon) เป็นการเปลี่ยนน้ำมันที่ปนเปื้อนในรูปของเหลว ให้ถูกดูดซับอยู่บนผิวของแข็ง

2.5.3.2 การใช้อุปกรณ์โคalesceเซอร์ (Coalescer) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำได้ แต่เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย ดังนั้นน้ำที่เข้าระบบจะต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อน โดยจะเพิ่มโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กขณะที่ผ่านตัวกลาง เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.5.3.3 การกรอง (Filtration) สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย รวมทั้งกำจัดน้ำมันอิสระ, อิมัลชัน และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำ แต่ต้องทำการล้างย้อน (Backwash) หากมีการอุดตันและจะต้องบำบัดน้ำล้างย้อน เช่น Sand, anthracite เป็นต้น

2.5.3.4 การทำให้ลอย (Flotation) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากสำหรับการกำจัดน้ำมันและไขมัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ หลักการของกระบวนการนี้ คือ ทำให้น้ำมันหรือไขมันซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยขึ้นโดยอาศัยแรงลอยตัวขึ้นของฟองอากาศพยุ่งน้ำมันหรือไขมันให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ มีข้อดี คือ สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชัน นอกจากนี้สามารถรับ Shock load ได้มาก ตัวอย่าง เช่น

- Dissolved Air Flotation (DAF) ใช้หลักการเป่าอากาศลง-ในน้ำเสียภายใต้ความดันสูงจนกระทั่งอากาศละลายน้ำเกินจุดอิ่มตัว จากนั้นปล่อยให้เข้าสู่ภาวะความดันบรรยากาศ อากาศส่วนเกินก็จะหนีออกจากน้ำเป็นฟองเล็กๆ พาตะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำ

- Induce Air Flotation (IAF) การเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง ณ ความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถนำพาตะกอนต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ แต่ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งและไขมันต่ำกว่าระบบ Dissolved Air Flotation

- Vacuum Floatation การเป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัว มี 2 วิธี คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรงหรือปล่อยให้อากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำเองระบบนี้จะใช้ถังปิดสูญญากาศซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว ควบคุมการเปิดปิดด้วยวาล์ว อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ พาดตะกอนต่างๆ ในน้ำ เสียลอยขึ้นสู่น้ำในลักษณะของสกัม (Scum) ซับซ้อนทำให้ไม่เป็นที่นิยม

2.5.3.5 การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity separation) วิธีนี้สามารถกำจัดน้ำมันอิสระและน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำ กำจัดของแข็งแขวนลอย ทั้งนี้ยังประหยัดและง่ายต่อการนำไปใช้งาน แต่มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้ และในการกำจัด อิมัลชันอนุภาคน้ำมันจะต้องมีขนาดใหญ่กว่า 20 ไมครอน นอกจากนี้ต้องใช้เวลาไหลต่ำ เช่น API, CPI, TPS, PPI เป็นต้น

2.5.3.6 การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane processes) ใช้กำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำ ในกรณีนี้เกิดการอุดตันได้ง่ายและอายุการใช้งานจำกัด จึงต้องมีการบำบัดขั้นต้น ดังนั้นไม่เหมาะกับการดำเนินการแบบ Full-scale เช่น Reverse Osmosis, Ultrafiltration เป็นต้น

2.5.3.7 การใช้ความร้อน (Thermal process) เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำมัน ซึ่งถ้าอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำสูงขึ้น ค่าความตึงผิวเฉพาะของน้ำมัน จะลดลงทำให้น้ำมันสามารถลอยขึ้นมาที่ผิวได้ง่าย ซึ่งดีต่อการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำ

2.5.4 กระบวนการแยกไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemistry/Electrostatic processes)

การเพิ่มความสามารถในการทำลายเสถียรภาพ และการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coagulation) และการแยกสารโดยทำให้ลอยขึ้น (Floatation) ด้วยไฟฟ้า โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับปริมาณ และขนาดของขั้วไฟฟ้า แต่จะขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้ คือ ควบคุมง่าย ประสิทธิภาพสูงและระบบบำบัดมีขนาดเล็ก

จากกระบวนการในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า วิธีที่น่าสนใจในการแยกอนุภาคน้ำมัน คือ การใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Coalescer) และ กระบวนการทางไฟฟ้า (Electrostatic)

- การใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Coalescer)

เมื่ออิมัลชันไหลผ่านเข้าสู่โคอะเลสเซอร์ อนุภาคน้ำมันจะปะทะกับชั้นตัวกลาง ซึ่งเท่ากับการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้หากสามารถใช้ตัวกลางราคาถูกลงได้ก็จะมีราคาต้นทุนต่ำซึ่งส่งผลดีต่อการนำไปใช้งานจริง

- กระบวนการทางไฟฟ้า (Electrostatic process)

กระบวนการนี้เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองแล้ว จะเกิดกระแสอิเล็คตรอนขึ้นซึ่งส่งผลต่อประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งสามารถทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยขึ้นสู่อากาศได้ ใช้ระยะเวลาดำเนินการสั้น จึงถือว่าเป็นวิธีการที่น่าสนใจในการนำมาใช้เพื่อแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำ และเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ (Recycle) ต่อไป

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravity separation	API, CPI, TPS, PPI	-กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ -กำจัดน้ำมันอิสระและที่แพร่กระจายในน้ำได้ -ใช้งานง่ายและประหยัด	-กำจัดน้ำมันที่เล็กกว่า 20 ไมครอน/น้ำมันที่ละลายน้ำไม่ได้ -ต้องใช้ความเร็วการไหลต่ำ -ต้องการถังแยกขนาดใหญ่
Air Flotation	DAF, IAF	-สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้	-ต้องกำจัดตะกอนทางเคมี
Chemical flocculation	ใช้ร่วมกับ gravity separation และ air flotation	-ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้	-ต้องกำจัดตะกอนทางเคมี
Filtration	Sand, anthracite, multimedia, crushed graphite, oleophobic coated ceramic	-กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ -กำจัดน้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้	-ต้องทำการล้างย้อน ซึ่งต้องบำบัดน้ำล้างย้อนต่อไป
Coalescence	Fibrous membrane	-กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำ	-ต้องมีการบำบัดขั้นต้น -อุดตันง่าย -ไม่เหมาะสมกับ full-scale
Membrane processes	Reverse osmosis, ultrafiltration,	-สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้	-อุดตันง่ายอายุการใช้งานจำกัด ไม่เหมาะสมกับ full-scale -ต้องบำบัดขั้นต้น

ที่มา: (Arizona Department of Environmental Quality, 1996)

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (ต่อ)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Biological processes	Activated sludge	-สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ	-ต้องบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มก./ล.
Carbon adsorption	GAC และ PAC	-กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท รวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำ	-ต้องบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มก./ล. -ค่าใช้จ่ายสูง -ต้องฟื้นฟู/เปลี่ยนคาร์บอน -ไม่เหมาะกับ full-scale

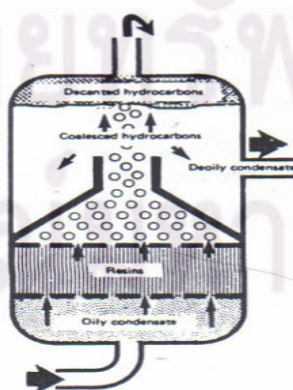
2.6 โคอะเลสเซอร์ (Coalescer)

2.6.1 หลักการทำงานของโคอะเลสเซอร์ (Aurelle, 1985)

กฎของสโตก

$$W = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18\mu_c} \quad (2-3)$$

จากกฎของสโตก ตัวแปรที่สำคัญที่สุด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (d_E) เนื่องจากตัวแปรถูกยกกำลังสอง ดังนั้นหากเพิ่มขนาดของอนุภาคขึ้น 2 เท่า ความเร็วในการลอยตัวจะเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า โดยเมื่ออิมัลชันผ่านเข้าสู่โคอะเลสเซอร์ (Coalescer) ที่ภายในบรรจุชั้นตัวกลางไว้ อนุภาคอิมัลชันจะเกิดการปะทะกับชั้นตัวกลาง ทำให้มีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกับอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กอื่นๆ ขณะที่ผ่านตัวกลาง (ดังรูปที่ 2-8) ซึ่งอนุภาคเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันจนขนาดใหญ่ขึ้นจะสามารถแยกออกได้ง่าย



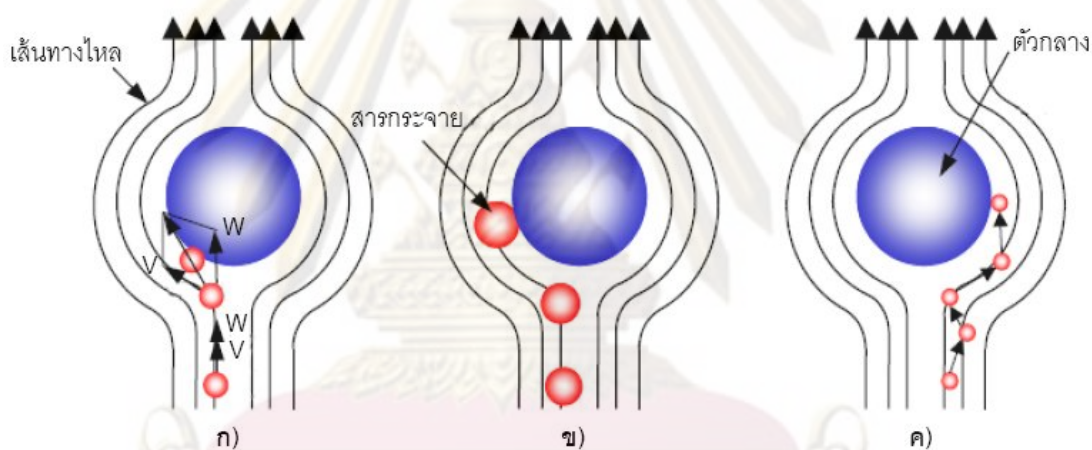
รูปที่ 2-8 อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

น้ำเสียจะถูกส่งเข้าถึงปฏิกิริยาทางด้านล่างของตัวกลาง (Coalescing bed) ประกอบด้วยวัสดุที่ชอบน้ำมัน (Oleophilic/Hydrophobic material) โดยลักษณะตัวกลางที่ใช้ คือ ตัวกลางแบบเม็ด (Granular) และตัวกลางแบบเส้นใย (Fibrous) ถ้าเลือกตัวกลางถูกต้องเมื่อหยดน้ำมันผ่านตัวกลางแล้วขนาดอนุภาคน้ำมันจะใหญ่ขึ้นและสามารถแยกออกจากน้ำได้ โดยน้ำมันจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบน ส่วนน้ำทิ้งจะแยกออกมาทางด้านล่าง

2.6.2 กลไกการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Rachu, 2005)

เมื่ออิมัลชันไหลผ่านเข้าสู่โคอะเลสเซอร์ อนุภาคน้ำมันจะปะทะกับชั้นตัวกลาง ซึ่ง จะเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาค โดยกลไกที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

2.6.2.1 การส่งถ่ายน้ำมันเข้าสู่สัมผัสผิวดังกล่าวในโคอะเลสเซอร์ (Transportation stage) ลักษณะเหมือนกลไกที่เกิดขึ้นในเครื่องกรอง แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ การส่งถ่ายด้วยการ ตกตะกอน การส่งถ่ายด้วยการปะทะโดยตรง และการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย (ดังรูปที่ 2-9)



รูปที่ 2-9 การส่งถ่ายน้ำมันเข้าสู่สัมผัสผิวดังกล่าว

ก) การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน

ข) การส่งถ่ายด้วยการปะทะ

ค) การส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย

- แบบจำลองการเคลื่อนย้ายที่ 1 : การตกตะกอน(Sedimentation)

พิจารณารูปที่ 2-9 (ก) อนุภาคน้ำมันซึ่งเคลื่อนที่มาตามเส้นการไหลที่ 5 จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ 2 เวกเตอร์ คือ W คือความเร็วในการลอยขึ้น และ V_0 คือความเร็วการไหลของน้ำที่ผ่านตัวกลาง ที่ระยะทางห่างจากตัวกลาง ความเร็วทั้ง 2 เวกเตอร์จะอยู่ในทิศทางเดียวกันคือในแนวตั้ง เมื่อเข้าใกล้ตัวกลาง เวกเตอร์ W จะยังคงอยู่ในแนวตั้ง แต่เวกเตอร์ V_0 จะเปลี่ยนทิศทางไปตามการไหลของน้ำ ซึ่งผลก็คืออนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ออกนอกเส้นการ

ไหลและชนเข้ากับตัวกลาง ทำให้อนุภาคน้ำมันเกาะติดอยู่กับตัวกลาง โดยที่ประสิทธิภาพของการชนกันโดยการตกตะกอน (η_s) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_s = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18\mu_c \cdot V_0} = \frac{W}{V_0} \quad (2-4)$$

- แบบจำลองการเคลื่อนย้ายที่ 2 : ปะทะ (Direct interception)

ถ้าอนุภาคของน้ำมันมีความหนาแน่นเท่ากับน้ำหรือ $\Delta\rho = 0$ กลไกการเคลื่อนย้ายแบบตกตะกอนจะไม่เกิดขึ้น (ดังสมการที่ 2-4) แต่อนุภาคน้ำมันก็ยังสามารถถูกจับได้โดยกลไกแบบการเกาะติดโดยตรง จากรูปที่ 2-9(ข) ถ้าพิจารณาอนุภาคของน้ำมันที่มีรัศมี r_A ที่เคลื่อนที่มาตามเส้นการไหลที่ 6 อนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นการไหลรอบตัวกลาง ถ้าเส้นการไหลห่างจากตัวกลางเป็นระยะทาง d_A ซึ่งมีค่าน้อยกว่ารัศมีของอนุภาคน้ำมัน r_A อนุภาคน้ำมันจะชนและถูกจับโดยตัวกลางด้วยกลไกแบบการเกาะติดโดยตรง โดยประสิทธิภาพของการชนกันโดยการเกาะติดโดยตรง (η_i) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_i = \frac{3}{2} \left(\frac{d_E}{d_p} \right)^2 \quad (2-5)$$

เมื่อ d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง

- แบบจำลองการเคลื่อนย้ายที่ 3 : การแพร่ (Diffusion)

แบบจำลองการเคลื่อนย้ายแบบนี้สามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 2-9 (ค) แต่การเกาะติดโดยกลไกการเคลื่อนย้ายแบบการแพร่จะเกิดขึ้นกับอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ซึ่งอนุภาคน้ำมันนี้จะเคลื่อนที่แบบบรานเนี่ยน ผลก็คือการเคลื่อนที่แบบสุ่มอาจทำให้อนุภาคน้ำมันนั้นไปเกาะติดกับตัวกลางได้ โดยประสิทธิภาพของการชนกันโดยการแพร่ (η_D) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_D = 0.9 \left(\frac{K \cdot T}{\mu_c \cdot d_E \cdot d_p \cdot V_0} \right)^{2/3} \quad (2-6)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่ BOLTZMANN

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์. (absolute temperature)

โดยกลไกการเคลื่อนย้ายที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของอิมัลชันที่จะทำการบำบัด และจะพิจารณาประสิทธิภาพของการชนเป็นประสิทธิภาพทั้งหมดของการเกาะติด (global efficiency of interception : η_T) โดยที่

$$\eta_T = \eta_s + \eta_i + \eta_D \quad (2-7)$$

- ประสิทธิภาพทั้งหมดของการเกาะติดของโคอะเลสเซอร์ที่มีตัวกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p และสูง H

พื้นที่โปรเจคและพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางมีค่าเท่ากับ $\frac{\pi d_p^2}{4}$ ดังนั้นปริมาณของอนุภาคน้ำมันที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยเวลาจึงเท่ากับ

$$\frac{V_0 \pi d_p^2 C}{4} \quad (2-8)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของอิมัลชันที่ต้องการทำการบำบัด (มก./ล.)

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลาง จะมีอนุภาคของน้ำมันบางส่วนเท่านั้นที่ถูกจับอยู่ที่ผิวของตัวกลาง ถ้าสมมติให้ปริมาณของน้ำมันที่ถูกจับเท่ากับ X จะได้ว่า ประสิทธิภาพทั้งหมดของตัวกลางจะเท่ากับ

$$\eta_T = \frac{X}{V_0 C \pi d_p^2 / 4} \quad (2-9)$$

ดังนั้น ปริมาณของน้ำมันที่ถูกดักจับโดยตัวกลางจึงมีค่าเท่ากับ

$$X = \eta_T \cdot \frac{V_0 \pi d_p^2 C}{4} \quad (2-10)$$

พิจารณาชั้นตัวกลางหนา d_H ถ้าอัตราส่วนช่องว่างของตัวกลางเท่ากับ ε จะได้ว่า จำนวนของตัวกลางจะเท่ากับ $\frac{A_0 d_H (1 - \varepsilon)}{\pi d_p^3 / 6}$ นั่นคือ ปริมาณของน้ำมันทั้งหมดที่ถูกจับโดย

ตัวกลางจึงเท่ากับผลคูณระหว่างค่า X กับจำนวนของตัวกลางหรือเท่ากับ $X \cdot \frac{A_0 d_H (1 - \varepsilon)}{\pi d_p^3 / 6}$

ถ้า α คือประสิทธิภาพในการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันกับพื้นผิวของตัวกลาง จะได้ว่าปริมาณน้ำมันที่เกาะติด (และเกิดการรวมตัวกัน) อยู่ที่ผิวของตัวกลาง จะคำนวณได้จาก

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

หรืออาจกล่าวได้ว่า ปริมาณของน้ำมันที่เกาะติดและเกิดการรวมตัวกันที่ผิวของตัวกลาง จะมีค่าเท่ากับปริมาณของน้ำมันที่ถูกกำจัดออกจากเฟสน้ำ

$$-V_0 \cdot A_0 \cdot dC = 3 \alpha \eta_T \cdot A_0 \frac{V_0 \cdot C (1 - \varepsilon) dH}{2d_p} \quad (2-11)$$

เมื่อ dC = ความเข้มข้นของน้ำมันที่ลดลงหลังจากผ่านโคอะเลสเซอร์

$$\text{นั่นคือ} \quad \frac{dC}{C} = -3(1 - \varepsilon) \alpha \eta_T \cdot \frac{dH}{2d_p} \quad (2-12)$$

อินทิเกรตสมการ (3-17) จะได้

$$\ln\left(\frac{C_s}{C_0}\right) = -\frac{3}{2}(1-\varepsilon)\alpha\eta_T\frac{H}{d_p} \quad (2-13)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของน้ำมันในอิมัลชันที่ต้องการบำบัด
 C_s = ความเข้มข้นของน้ำมันที่ยังเหลืออยู่ในน้ำหลังการบำบัด
 H = ความสูงของชั้นตัวกลาง

ดังนั้น ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$1 - \frac{C_s}{C_0} = 1 - e^{-\frac{3}{2}(1-\varepsilon)\alpha\eta_T\frac{H}{d_p}} \quad (2-14)$$

2.6.2.2 การจับยี่ดระหว่งอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางและการไหลผ่านชั้นตัวกลาง (Adhesion and coalescence stage) ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นหลังจากน้ำมันถูกส่งถ่ายเข้าสู่ชั้นตัวกลางที่ชอบน้ำมัน โดยที่อนุภาคน้ำมันจะยังไม่หลุดออกจากชั้นตัวกลางในทันที แต่จะค้างอยู่ในชั้นตัวกลางจนกระทั่งรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันอื่นๆ จนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ต้องเลือกใช้วัสดุตัวกลางที่พื้นผิวมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่ชั้นบนสุดของชั้นตัวกลางในโคอะเลสเซอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองของหยदन้ำมัน

2.6.2.3 การรวมตัวและหลุดออกจากชั้นตัวกลาง (Salting out stage) เมื่อน้ำมันรวมตัว และเคลื่อนผ่านช่องว่างสุ่วิพหน้าด้านบนของชั้นตัวกลางจะหลุดออกจากชั้นตัวกลางถือว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการโคอะเลสเซนซ์ โดยประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำจะขึ้นอยู่กับการหลุดออกจากชั้นตัวกลาง ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะและขนาดของหยदन้ำมัน

2.6.3 ปัจจัยควบคุมประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ (Wanichkul, 2000)

ปัจจัยควบคุมประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ ได้แก่ ลักษณะสมบัติของอิมัลชันซึ่งจะมีผลกระทบต่อกลไกในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน (ดังตารางที่ 2-2)

ตารางที่ 2-2 ผลกระทบของลักษณะสมบัติของอิมัลชันต่อการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน

ตัวแปร	ผลที่เกิดขึ้น
ขนาดอนุภาคน้ำมัน	การรวมตัวของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคน้ำมันใหญ่ขึ้น
มวลโมเลกุล	ประสิทธิภาพในการรวมตัวจะลดลงเมื่อมวลโมเลกุลลดลง
สารลดแรงตึงผิว	สารลดแรงตึงผิวจะลดอัตราการระคายของฟิล์มและลดประสิทธิภาพ
ความหนืด	ประสิทธิภาพจะลดลงเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับความหนืด
ของแข็งแขวนลอย	ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ที่ใช้วัสดุโพลีเมอร์จะลดลงเมื่อน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง

2.6.4 ข้อดี-ข้อเสียของโคอะเลสเซอร์

2.6.4.1 ข้อดี คือ สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท (ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำได้) เป็นอุปกรณ์ที่นำเชื่อถือ ใช้ค่าลงทุนและค่าดำเนินการต่ำ

2.6.4.2 ข้อเสีย คือ เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย ควรมีการป้องกัน เช่น ใช้เครื่องกรอง ทำการบำบัดขั้นต้น หรือมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวกลางโดยการล้างย้อนกลับ

2.7 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) (มันสิน ตันทูลเวศม์, 2542)

2.7.1 อนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-3} มม. เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจำตัว โดยกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือสารจำพวกสารลดแรงตึงผิว ส่วนกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีประจุลบ เช่น หยदन้ำมันและเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดเป็นแรงผลักระหว่างอนุภาคมีเสถียรภาพสูงทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับเป็นกลุ่มก้อนมี 2 ขั้นตอน คือ

2.7.2 การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization)

เสถียรภาพของหยदन้ำมันเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันบนหยदन้ำมัน สามารถอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหยदन้ำมันโดยใช้ทฤษฎี Electric Double Layer Theory โดยอไอออนประจุลบบนหยदन้ำมันสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้ไอออนประจุบวกมาแออัดอยู่ที่ใกล้ผิวหยदन้ำมัน ความหนาแน่นของไอออนประจุบวกจะสูงที่สุดในบริเวณที่ติดกับหยदन้ำมันและลดลงตามระยะห่างจากหยदन้ำมันทั้งนี้เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของ

หยดน้ำมันมีค่าสูงสุดที่ผิวและลดน้อยลงเมื่อห่างออกไป ดังนั้นการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันจะต้องทำให้แรงดึงดูด (Van der Waals Force) ของหยดน้ำมันมีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างหยดน้ำมันซึ่งเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของหยดน้ำมันหรือค่า Zeta Potential โดยอาศัยกลไก 4 แบบดังนี้

2.7.2.1 กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) โดยเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับหยดน้ำมันในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวนอกสุดของน้ำลดตามไปด้วย

2.7.2.2 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของหยดน้ำมัน (Adsorption and Charge Neutralization) โดยการเติมสารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงข้ามกับหยดน้ำมัน ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงเช่นกัน

2.7.2.3 กลไกการสร้างผลึกเพื่อให้หยดน้ำมันเกาะจับ (Sweep Coagulation) การใส่สารส้มให้เกิดผลึก $Al(OH)_3$ เหมือนวุ้นสีขาวเพื่อเป็นเป้าสัมผัสให้น้ำมันมาเกาะและรวมตัวเป็นฟล็อก

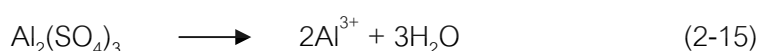
2.7.2.4 กลไกการสร้างสะพานเชื่อมต่อ (Polymer Bridging) เมื่อใส่สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ลงน้ำจะเกิดการเกาะจับกันหยดน้ำมันและยังมีแขนเพื่อเชื่อมต่อกับอนุภาคคอลลอยด์อื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟล็อกได้อีกด้วย

2.7.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

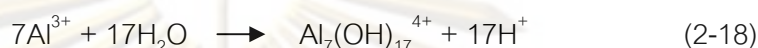
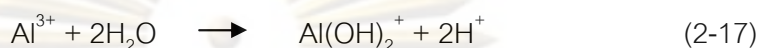
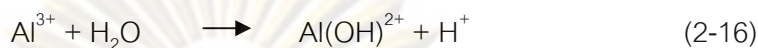
เนื่องจากหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กเกินไปไม่สามารถแยกได้ด้วยวิธีตกตะกอน จึงมักจะต้องทำการโคแอกกูเลชันก่อนเพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในด้านการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น เช่น การทำให้สารแขวนลอยมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.7.3.1 ส่วนประกอบของกระบวนการ จะเติมโคแอกกูแลนท์ถึงกวนเร็ว (Rapid mixing tank) เพื่อกระจายสารเคมีไปยังส่วนต่างๆ ของน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อให้มีการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันขึ้นและถึงกวนช้า (Flocculation tank) จะได้รับน้ำต่อจากถึงกวนเร็วเพื่อสร้างสัมผัสให้กับหยดน้ำมันเกิดการรวมตัวเป็นฟล็อก โดยสารเคมีที่ใช้ เรียกว่า โคแอกกูแลนท์ (Coagulant) หรือฟล็อกคูแลนท์ (Flocculants) เช่น สารส้ม เพอริริคโคลไรด์ ปูนขาว เป็นต้น

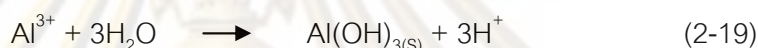
2.7.3.2 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม นิยมใช้สารส้มเนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง สูตรโมเลกุล $Al_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$ เมื่อลงในน้ำจะเกิดการแตกตัว ดังปฏิกิริยาที่ 2-15



เมื่อเติมสารส้มในน้ำอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จาก $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ หรือ Al^{3+} ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ Al^{3+} จะเกิดขึ้นทันทีโดยลิแกนด์ (Ligands) ชนิดต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง OH^- จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอะลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังปฏิกิริยาที่ 2-16 – 2.18 (Hamza, Stanonik และ Kessick, 1996)



ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดังปฏิกิริยาที่ 2-19



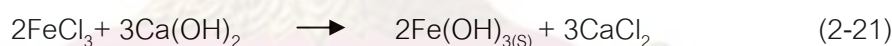
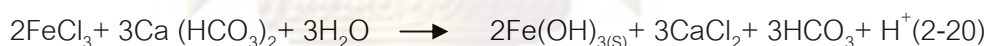
ผลของปฏิกิริยาที่เกิดจากการดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์คือสารคอมเพล็กซ์ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิสจาก Al^{3+} ถึง $\text{Al}(\text{OH})_3$ สารคอมเพล็กซ์อาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือถ้าพีเอชน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero point of charge) ของ $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ แต่ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ โดยสารส้มที่เติมลงในน้ำจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกหลักดังนี้

- กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวก ทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ที่มีประจุลบให้กลายเป็นกลาง (Neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีความเหมาะสมกับที่แคบจึงควบคุมการทำงานได้ยากเพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้นถ้าหากมีปริมาณต่ำเกินไปกระบวนการโคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคมากทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวกและเกิดเสถียรภาพขึ้นอีก แต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

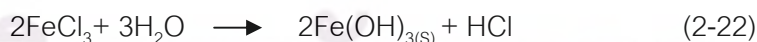
- กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มมากเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดังปฏิกิริยาที่ 2-19 การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารส้มเป็นจำนวนมากพอจนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ซึ่งทำให้ผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่มีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียวไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า จึงทำหน้าที่สร้างเป้าสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์จนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง พีเอช 6.8-8.2 ให้ผลดีที่สุด

- กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม (Combination Coagulation) เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและแบบกวาด โดยที่มีความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัด

2.7.3.3 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ สูตรโมเลกุล $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เป็นผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง ปกติจะละลายน้ำได้ดีโดยสารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรดและกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวแล้วจะให้สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำมีประจุบวกสามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอนด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอน เฟอร์ริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนรูปร่างเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ Bicarbonate alkalinity ดังปฏิกิริยาที่ 2-20



การสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มไม่อาจได้ผลดีมากนักกับน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม กรณีเช่นนี้เฟอร์ริกคลอไรด์ให้ผลดีกว่าเมื่อเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ให้กับน้ำมีผลึกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น ดังปฏิกิริยาที่ 2-22



2.8 การรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน (Ichikawa และคณะ, 2004)

2.8.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical method)

เป็นการแยกอนุภาคน้ำมันออกโดยใช้กระบวนการต่างๆ เช่น การให้ความร้อน การปั่นกวาด การกรองเบื้องต้น การกรองอนุภาคขนาดเล็กและการผ่านเมมเบรน วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นมีระบบการกรองเป็นพื้นฐาน ซึ่งจะต้องควบคุมอัตราการไหลของโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูเมมเบรน ทำให้อนุภาคอิมัลชันแตกเมื่อถูกอัดด้วยความดันผ่านรูขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวนี้ไม่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน

2.8.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical method)

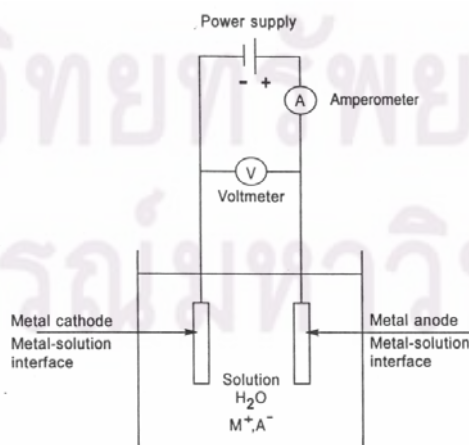
เป็นการเติมสารเคมีเข้าไปในกระบวนการ เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันหรือเพื่อทำลายโครงสร้างจนสามารถแยกน้ำมันออกได้ นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เช่น การใช้สารลดแรงตึงผิวหรือการเติมสารดีมัลซิฟายเออร์ ทั้งนี้จะเกิดการทำลายสภาพอิมัลชัน (Demulsification) ประกอบด้วย การกวนเร็ว (Rapid mixing) เมื่อเติมสารเคมีเพื่อลดประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันซึ่งจะช่วยเพิ่มโอกาสในการชน (Flocculation) และอนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบน (Floatation) แต่ยังไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด

2.8.3 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electro-chemistry process)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้ไฟฟ้า ที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Density current: J) และความต่างศักย์ (Voltage: V) โดยพิจารณาความถี่ในการสัมผัสกันของอนุภาคน้ำมันเป็นหลักและวิธีที่ดีที่สุดในการทำดีมัลซิฟิเคชัน คือ การผ่านสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความสามารถในการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองแล้วจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้น และเกิดการทำลายเสถียรภาพเมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าว โดยประจุที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมันจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปว่ามากน้อยเพียงใด (ดังรูปที่ 2-10)

- สนามไฟฟ้ากำลังสูง (High electric field) จะให้ประจุลบของกระแสอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีประจุลบมากเกินไปจนผลักกันไม่สามารถรวมตัวกันได้

- สนามไฟฟ้ากำลังต่ำ (Low electric field) ประจุลบของกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อย ซึ่งทำให้ประจุที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมันเกิดการเคลื่อนที่จนมีช่องว่าง ทำให้อนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้กันสามารถเข้ามารวมตัวกันได้



รูปที่ 2-10 การต่อวงจรไฟฟ้า

ผลที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านสนามไฟฟ้า คือ ความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะลดลง และเกิดการแยกตัวระหว่างน้ำกับน้ำมันเกิดเป็นชั้นน้ำมันลอยอยู่บนผิวน้ำ ซึ่งวิธีทางไฟฟ้ามีอยู่ 4 วิธี ดังนี้

2.8.3.1 อิเล็กโทรโคเนติก (Electrokinetic) กระบวนการแยกสารปนเปื้อนออกจากน้ำ โดยใส่สนามไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำและใช้กระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งจะทำให้ไอออนของสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า (ดังรูปที่ 2-11)

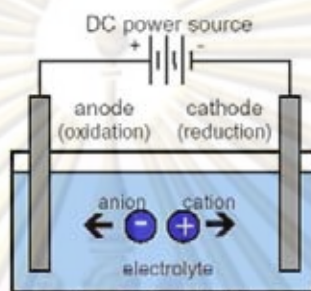
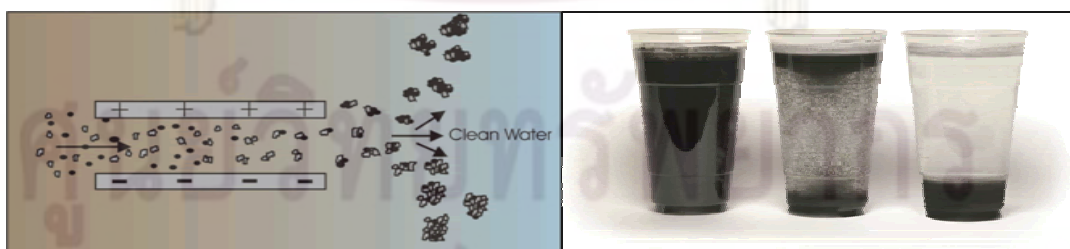


Figure 1. Electrolytic Cell

รูปที่ 2-11 อิเล็กโทรโคเนติก (Electrokinetic)

2.8.3.2 อิเล็กโทรโคแอกคูเลชัน (Electrocoagulation) กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย ใช้ต้นทุนในการติดตั้งและดำเนินการต่ำกว่าระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป อีกทั้งประหยัดเวลาในการบำบัด ทั้งนี้การแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ามีสองขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่งเป็นการทำให้เกิดตะกอนเบาด้วยไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการรวมตัวของน้ำมัน ขั้นที่สองเป็นการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย ทั้งนี้การสลายตัวของอิเล็กโทรดขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด กระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในระบบทำให้ขั้วไฟฟ้าแอโนดละลายกลายเป็นไอออนในน้ำเสีย และเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นตะกอนเบาขณะที่แคโทดจะเกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการลอยตัวของน้ำมัน (ดังรูปที่ 2-12)

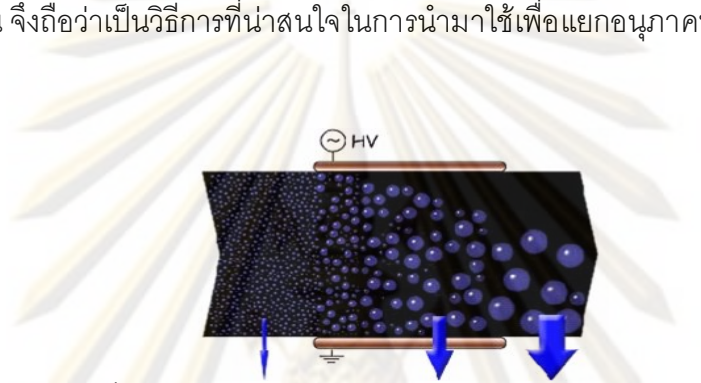


รูปที่ 2-12 อิเล็กโทรโคแอกคูเลชัน (Electrocoagulation)

2.8.3.3 อิเล็กโทรฟลอตเตชัน (Electrofloatation) การลอยตัวด้วยไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงที่ใช้สำหรับแยกอิมัลชันประเภทน้ำมันกับน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยขั้วไฟฟ้าแอโนดจะเกิดเป็นฟองก๊าซออกซิเจนขนาดเล็ก (ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมาก) และ

กระจายตัวออกอย่างรวดเร็วเพื่อช่วยในการลอยตัวขึ้นของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ขั้วไฟฟ้างดงกล่าวเกิดการสึกกร่อนได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนขั้วใหม่เสมอ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองก๊าซเพียงอย่างเดียว ไม่เกี่ยวกับเวลาในการทำปฏิกิริยา

2.8.3.4 อิเล็กโทรโคอะเลสเซนซ์ (Electrocoalescence) เป็นการใช้ไฟฟ้า (Electric) โดยผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองจากนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้น ดังนั้นอนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้กันจึงสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ ใช้ระยะเวลาดำเนินการสั้น จึงถือว่าเป็นวิธีการที่น่าสนใจในการนำมาใช้เพื่อแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำ (ดังรูปที่ 2-13)



รูปที่ 2-13 อิเล็กโทรโคอะเลสเซนซ์ (Electrocoalescence)

2.9 ไฟฟ้า

2.9.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้า (อภิรดี สุนทรภา, 2549)

2.9.1.1 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งของการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า วัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Amp) โดยที่จำนวนกระแสที่ผ่านไปในหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current intensity, I) การวัดของกระแสซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (conductivity) โดยที่โลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม ซึ่งสามารถเขียนในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_0) ได้คือ

$$I = \sigma \cdot E_0 \tag{2-23}$$

$$E_0 = I / \sigma \tag{2-24}$$

$$= V / R\sigma$$

- โดยที่
- E_0 ความเข้มของสนามไฟฟ้า (โวลต์/เซนติเมตร)
 - σ ค่าการนำไฟฟ้า (โมห์/เซนติเมตร)
 - V ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด (โวลต์)

R ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด (โอห์ม)

I ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (แอมแปร์)

2.9.1.2 ค่าการนำไฟฟ้า (σ) มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยาการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า หน่วยเป็นโมห์/เซนติเมตร ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ของประจุที่ผ่านเข้าวงจร จะชะอะลูมิเนียมออกมาจากขั้วไฟฟ้า 9 กรัม ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีอะลูมิเนียม หรือเหล็กหลุดออกมาจากขั้วไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น

2.9.1.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) เป็นพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยประจุที่สูญเสียไประหว่างจุด 2 จุด โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรเท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า (R)

$$V = I \times R \quad (2-25)$$

โดยที่ V ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
I ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
R ความต้านทาน (โอห์ม)

2.9.1.4 ความต้านทานไฟฟ้า (R) เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาร เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ถ้ามีความต้านทานน้อยกระแสไฟฟ้าจะไหลมาก (โลหะจะนำไฟฟ้าได้ดีที่สุดเมื่อความต้านทานเป็นศูนย์) และเป็นส่วนกลับกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้ายังสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จะมีค่าเท่ากับ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

$$R = \frac{D}{C \times A} \quad (2-26)$$

โดยที่ R ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)
D ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เซนติเมตร)
C ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)
A พื้นที่หน้าตัดที่อิเล็กโทรดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ (เซนติเมตร²)

2.9.1.5 กระแสไฟฟ้า (I) เป็นปริมาณของประจุทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดขวางของตัวนำใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทิศทางของกระแสจะเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของประจุบวก ซึ่งจะไหลจากศักย์ที่สูงกว่าไปยังศักย์ที่ต่ำกว่า เมื่อประจุไฟฟ้าได้รับพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้า ผ่านขดลวดความ

ต้านทานไปยังขั้วลบของเซลล์ ทั้งนี้กระแสอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไหลต่อเนื่องบนตัวนำไฟฟ้าที่เป็นของแข็งซึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด ซึ่งจะไหลจากศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าไปยังศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า

2.9.1.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูล ในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมป์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์จะหมายความว่า จุดสองจุดมีความต่างศักย์ 1 โวลต์ ฉะนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูล/คูลอมป์ และทางไฟฟ้าเคมีมักจะแทนโวลต์ด้วยเทอมแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force (E), emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้าพบว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมป์} \times \text{โวลต์} \quad (2-27)$$

เนื่องจากงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้ามาจากการถ่ายอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมป์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมล ของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมป์ สมมติว่าในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายอิเล็กตรอน n โมลจะมีปริมาณประจุเท่ากับ n x 96,487 หรือ nF คูลอมป์ ในเมื่อ F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมป์/โมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการ (2-20) จะเปลี่ยนเป็น

$$\begin{aligned} W_{\text{elec.}} &= (nF) (E) \\ &= nE \times 96,487 \end{aligned} \quad (2-28)$$

ในกรณีที่ปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นอย่างผันกลับได้ (Reversible) การลดพลังงานอิสระ ($-\Delta G$) จะเท่ากับงานที่กระทำ ดังนั้น

$$\Delta G = -nFE \quad (2-29)$$

เครื่องหมายของ ΔG มีความหมายสำคัญมาก คือ ถ้าที่อุณหภูมิและความดันหนึ่ง ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นไม่ได้เอง ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล ΔG จะเท่ากับศูนย์ แต่ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทำให้สามารถระบุได้ว่าปฏิกิริยาในเซลล์เป็นแบบเกิดได้เองหรือเกิดไม่ได้เองหรืออยู่ในภาวะสมดุล (ดังตาราง 2-3)

ตารางที่ 2-3 ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE (กัณฑ์มาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539)

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมายของ ΔG	เครื่องหมายของ ΔE
เกิดได้เอง	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดเองไม่ได้	บวก (+)	ลบ (-)
ที่ภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

2.9.1.7 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติก เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชัน หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$1 \text{ F (Faraday)} = eN \quad (2-30)$$

$$= (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})$$

$$= 96487 \text{ C mol}^{-1} \text{ (C = coulomb)}$$

$$\text{จะได้ } Q \text{ (coulomb)} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)}$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือ ไฟฟ้า ฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 1 โมล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

$$W = \frac{I \cdot t \cdot M}{Z \cdot F} \quad (2-31)$$

โดยที่	W	ปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)	I	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง
	M	น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด	Z	จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
	t	เวลาที่ใช้	F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎีหมายความว่า กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากความต้านทานต่างๆ เนื่องจากมีตัวออกซิไดซ์หลายชนิดละลายอยู่รวมกันในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2-32)$$

2.9.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) (อภิวัตน์ สุทธธรรมา, 2549)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ขั้วที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active Electrodes) ขั้วที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Inert Electrodes) และขั้วแก๊ส (Gas Electrodes) โดยวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก ไททาเนียม แพลทินัม และแกรไฟต์ เป็นต้น

2.9.2.1 อะลูมิเนียม (Aluminium) มีลักษณะสีขาวเหมือนเงิน เนื้อเป็นมันเงาไม่หมองมีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ไม่สึกกร่อนได้ง่าย ทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น และแข็งมากไม่ค่อยมีรอยแตกร้าวสามารถทำให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เช่น ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา โดยอะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ เมื่ออยู่ในน้ำ Al^{3+} จะเกิด ไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส เกิดอัลเฟต ไนเตรท และเฮไลต์ของอะลูมิเนียม ละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายน้ำ การใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสขึ้นทำให้อะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายในสารละลาย ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก

2.9.2.2 เหล็กกล้า (Steels) เป็นโลหะหนัก ที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้างแต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรงถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้น มักจะกลายเป็นสนิมที่เรียกว่าสนิมเหล็ก เหล็กทำปฏิกิริยารวมกับโลหะทั้งหลายได้เกือบทั้งหมด เมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ Fe^{2+} ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอกไซด์ $(\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6)^{2+}$ สารละลาย Fe^{2+} นี้ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศกลายเป็น Fe^{3+} ได้ Fe^{3+} อยู่ในสารละลายของน้ำเป็น hydrated ion เนื่องจาก Fe^{3+} มีขนาดไอออนเล็กและมีประจุมากจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้ง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้ การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสขึ้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูป Fe^{2+} ที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่า pH ของน้ำ

สูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ได้ ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้วแคโทดและค่า pH ของน้ำเสีย ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่ง โดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อง่ายและราคาถูกยิ่งไปกว่านั้นมันมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดี จึงเป็นที่นิยม

2.9.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่จัดอยู่ในขอบข่ายเหล็กกล้าผสม ธาตุผสมที่สำคัญ คือ โครเมียมซึ่งจะมีตั้งแต่ร้อยละ 11 ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้าฟิล์มอันนี้มีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิมให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาวาว

2.9.2.4 ไทเทเนียม (Titanium) โลหะทรานซิชันลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงแข็งและเหนียว สามารถดึงเป็นเส้นได้ มีความหนาแน่นต่ำที่สุดที่สภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อยมาก สามารถทนก๊าซคลอรีนแห้งได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับอโลหะได้สารประกอบโควาเลนต์ เช่น TiO_2 , TiCl_4 เป็นต้น สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน +2, +3 และ +4 ซึ่งจะเสถียรที่ +4 ไทเทเนียมขาวถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ และไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส ยิ่งไปกว่านั้นที่ขั้วลบพบว่าจะมีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายใสไม่มีตะกอน อีกทั้งยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเพราะจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับ แต่ข้อเสียคือไทเทเนียมมีราคาสูง หาซื้อได้ยาก

2.9.2.5 แพลตินัม (Platinum) ธาตุสีขาว มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะโลหะและไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลตินัมมักไม่ค่อยเสถียร โดยเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงพบโลหะพวกนี้ในรูปของธาตุอิสระในธรรมชาติอยู่บ้าง นอกจากจะเกิดเป็นสินแร่กับธาตุอื่นๆ แล้ว ยังปรากฏรวมอยู่กับพวกธาตุทองแดงเงิน และทองคำอีกด้วย ข้อเสียคือ หาซื้อได้ยากมีน้อยมาก จึงมีราคาแพงมาก แต่มีสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กโทรด เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูงได้

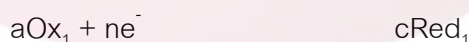
2.9.2.6 แกรไฟต์ (Graphite) อัลลิวรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน มีชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็งเป็นผลึกแผ่นบางๆ ทึบแสงและเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้มากในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย อะตอมของแกรไฟต์จะจัดตัวเป็นระนาบเป็นชั้นๆ อะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นจะอยู่ที่มุมของรูป regular hexagon การยึดกันระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์บอนด์ แต่ปิดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม ซึ่งสั้นพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนยึดกับอะตอมข้างเคียงด้วยพันธะโควาเลนต์ได้ แกรไฟต์มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ใส่ถ่านไฟฉาย ใส่ไฟอาร์ก รวมทั้งยังช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

2.10 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

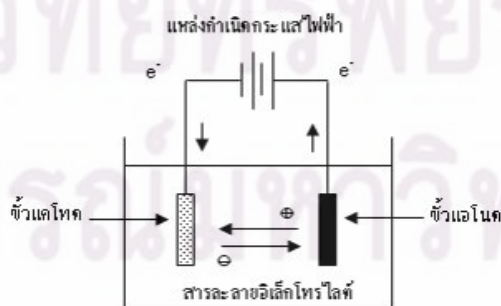
กระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว (รัตน จิระรัตนานนท์, 2541)

แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า แอโนด ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกว่า แคโทด (ดังรูปที่ 2-14)

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



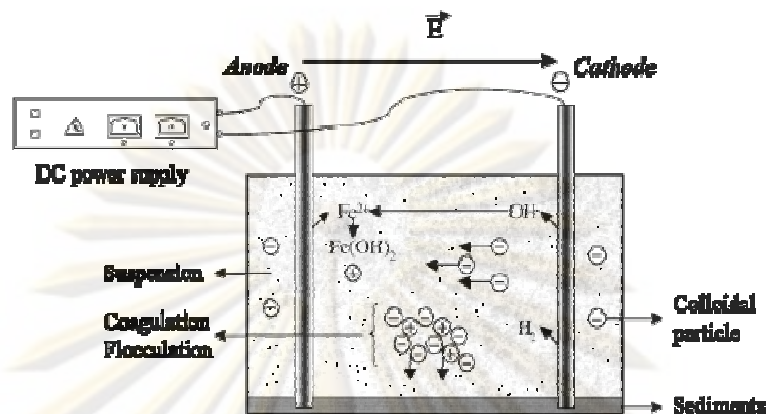
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



รูปที่ 2-14 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

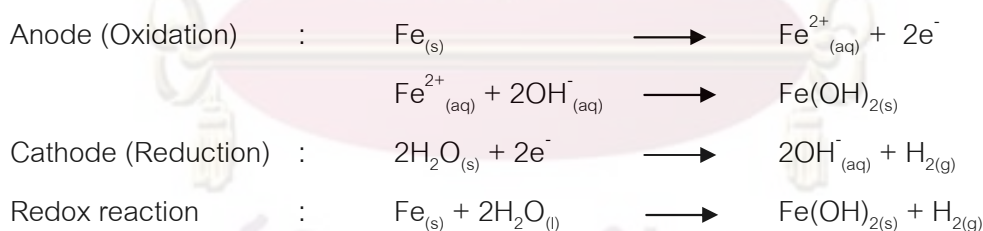
2.10.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรลิติกเซลล์ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ดังรูปที่ 2-15)



รูปที่ 2-15 การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Larue และ Vorobiev, 2003)

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถังปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็ก โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (ขั้วแอโนด) ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำ ในขณะที่ขั้วลบ (แคโทด) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่างเนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำและทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe^{3+}) ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_{2(s)}$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_{3(s)}$)



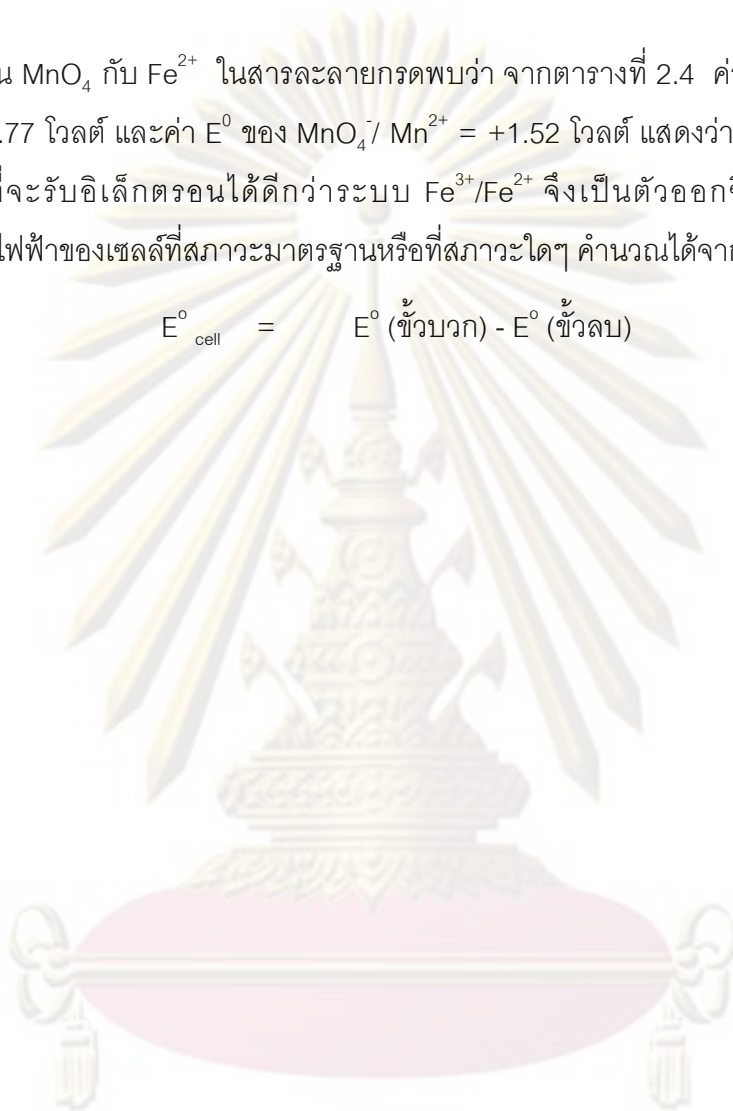
2.10.2 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด (ในทางปฏิบัติไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรงจึงต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์) เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น Fe^{3+} / Fe^{2+} เป็นต้น โดยนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดมาตรฐานและวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะ

มาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E°_{cell}) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E°_{cell}) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการนำเช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ (ดังตารางที่ 2-4)

เช่น MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า จากตารางที่ 2.4 ค่า E° ของระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และค่า E° ของ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+} = +1.52$ โวลต์ แสดงว่าระบบ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐานหรือที่สภาวะใดๆ คำนวณได้จากสมการ 2-33

$$E^{\circ}_{\text{cell}} = E^{\circ}(\text{ขั้วบวก}) - E^{\circ}(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-33)$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศา (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2528)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$I_2 + 2e^- \rightarrow 2I^-$	0.536
$I_2(s) + 2e^- \rightarrow 2I^-$	0.5355
$I_2(aq) + 2e^- \rightarrow 2I^-$	0.620
$Cu^+ + e^- \rightarrow Cu(s)$	0.521
$H_2SO_3 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow S(s) + 3H_2O$	0.45
$Ag_2CrO_4(s) + 2e^- \rightarrow 2Ag(s) + CrO_4^{2-}$	0.446
$VO^{2+} + 2H^+ + e^- \rightarrow V^{3+} + H_2O$	0.361
$Fe(CN)_6^{3-} + e^- \rightarrow Fe(CN)_6^{4-}$	0.36
$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu(s)$	0.337
$UO_2^{2+} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow U^{4+} + 2H_2O$	0.334
$BiO^+ + 2H^+ + 3e^- \rightarrow Bi(s) + H_2O$	0.32
$Hg_2Cl(s) + 2e^- \rightarrow 2Hg(l) + 2Cl^-$	0.368
$AgCl(s) + e^- \rightarrow Ag(s) + Cl^-$	0.222
$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow H_2SO_3 + H_2O$	0.17
$BiCl_4^- + 3e^- \rightarrow Bi(s) + 4Cl^-$	0.16
$Sn^{4+} + 2e^- \rightarrow Sn^{2+}$	0.154
$Cu^{2+} + e^- \rightarrow Cu^+$	0.153
$S(s) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2S(g)$	0.141
$TiO^{2+} + 2H^+ + e^- \rightarrow Ti^{3+} + H_2O$	0.1
$AgBr(s) + e^- \rightarrow Ag(s) + Br^-$	0.095
$S_4O_6^{2-} + 2e^- \rightarrow 2S_2O_3^{2-}$	0.08
$Ag(S_2O_3)_2^{3-} + e^- \rightarrow Ag(s) + 2S_2O_3^{2-}$	0.010
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2(g)$	0.000
$Pb^{2+} + 2e^- \rightarrow Pb(s)$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn(s)$	-0.136
$AgI(s) + e^- \rightarrow Ag(s) + I^-$	-0.151
$CuI(s) + e^- \rightarrow Cu(s) + I^-$	-0.185
$N_2(g) + 5H^+ + 4e^- \rightarrow N_2H_5^+$	-0.23
$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni(s)$	-0.250

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศา (ต่อ)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$V^{3+} + e^- \rightarrow V^{2+}$	-0.255
$Co^{2+} + 2e^- \rightarrow Co(s)$	-0.277
$Ti^+ + e^- \rightarrow Ti(s)$	-0.336
$PbSO_4(s) + 2e^- \rightarrow Pb(s) + SO_4^{2-}$	-0.356
$Ti^{3+} + e^- \rightarrow Ti^{2+}$	-0.37
$Cd^{2+} + 2e^- \rightarrow Cd(s)$	-0.403
$Cr^{3+} + 2e^- \rightarrow Cr^{2+}$	-0.41
$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe(s)$	-0.440
$2CO_2(g) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2C_2O_4$	-0.49
$Cr^{3+} + 3e^- \rightarrow Cr(s)$	-0.74
$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn(s)$	-0.763
$Mn^{2+} + 2e^- \rightarrow Mn(s)$	-1.18
$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al(s)$	-1.66
$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg(s)$	-2.37
$Na^+ + e^- \rightarrow Na(s)$	-2.714
$Ca^{2+} + 2e^- \rightarrow Ca(s)$	-2.87
$Ba^{2+} + 2e^- \rightarrow Ba(s)$	-2.90
$K^+ + e^- \rightarrow K(s)$	-2.925
$Li^+ + e^- \rightarrow Li(s)$	-3.045
$F_2(g) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2HF(aq)$	3.06
$O_3(g) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow O_2(g) + H_2O$	2.07
$S_2O_8^{2-} + 2e^- \rightarrow 2SO_4^{2-}$	2.01
$Co^{3+} + e^- \rightarrow Co^{2+}$	1.842
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$	1.776
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- \rightarrow MnO_2(s) + 2H_2O$	1.695
$MnO_2(s) + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23
$O_2(g) + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229
$IO_3^- + 6H^+ + 5e^- \rightarrow 1/2I_2(s) + 3H_2O$	1.195
$HNO_2 + H^+ + e^- \rightarrow NO(g) + H_2O$	1.00

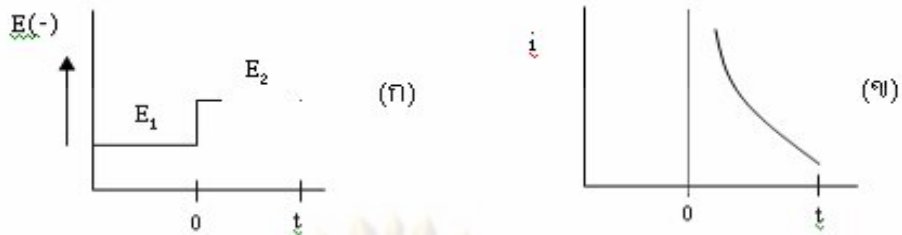
ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศา (ต่อ)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0.94
$2\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}$	0.92
$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{OH}^-$	0.88
$\text{Cu}^{2+} + \text{I}^- + \text{e}^- \rightarrow \text{CuI(s)}$	0.86
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg(l)}$	0.854
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)}$	0.799
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg(l)}$	0.789
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	0.771
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.682
$\text{PtCl}_6^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PtCl}_4^{2-} + 2\text{Cl}^-$	0.68
$\text{Hg}_2\text{SO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg(l)} + \text{SO}_4^{2-}$	0.615

2.11 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

2.11.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method)

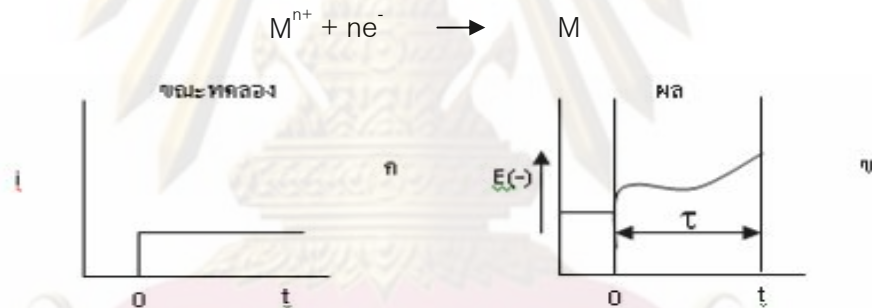
เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ดังรูปที่ 2-16) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด โดย E_1 คือค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในรูป (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($I = kC$)



รูปที่ 2-16 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
 (Friedrich, 1962)

2.11.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique เป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่



รูปที่ 2-17 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (Friedrich, 1962)

ดังนั้นค่าความต่างศักย์ จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้างี้จะลดลงเช่นกันตามสมการของเนินสต์ ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ 2-17 ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์สามารถแสดงได้ตามสมการของเนินสต์ (Nernst's equation)

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[red]} \quad (2-34)$$

เมื่อ	E	ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ณ สภาวะใดๆ (โวลต์)
	E^0	ค่าความต่างศักย์มาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและสารละลาย (โวลต์)
	R	ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
	T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
	n	จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา (ประจุต่อโมล)
	F	ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 (แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ)
	[Ox],[red]	ความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ตามลำดับ(โมลต่อลิตร)

เพื่อให้ได้อัตราในการกำจัดสูงสุด การรีดักชันของไอออนโลหะควรเป็นการควบคุมแบบถ่ายโอนมวลสาร (Mass transport control) สมการแสดงอัตราในการนำกลับโลหะออกจากสารละลาย เขียนได้ดังนี้

$$-V \frac{dc}{dt} = \frac{-I_L}{nF} = k_m A_e \quad (2-35)$$

เมื่อ	V	ปริมาตรของสารละลาย (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	C	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ (โมล/ลิตร)
	t	เวลา (วินาที)
	I_L	กระแสจำกัด (limiting current) (แอมแปร์)
	k_m	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer coefficient)
	A_e	พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า (ตารางเมตร)

อินทิเกรตสมการข้างต้นเทียบกับเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\frac{C_{(t)}}{C_{(0)}} = \frac{\exp(-k_m A_e t)}{V} \quad (2-36)$$

เมื่อ	$C_{(0)}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
	$C_{(t)}$	ความเข้มข้นไอออนโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเวลาเปลี่ยน (โมล/ลิตร)

จากสมการกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนโลหะขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญคือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า และการถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้าการกวนจะช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร

2.11.3 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

2.11.3.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้ามีส่วนโดยตรงกับกระแสที่ให้แก่ระบบ

2.11.3.2 การเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอน ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของไอออนขึ้นอยู่กับขนาดและประจุบนไอออน

2.11.3.3 อุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส

2.11.3.4 พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่ดีสำหรับการถ่ายเทและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด

2.11.3.5 ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า จำนวนกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้า ถ้ามีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น

2.11.3.6 จำนวนประจุของอิเล็กตรอน เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น จำนวนประจุของอิเล็กตรอนจะเพิ่มมากขึ้น

2.11.3.7 ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายนำไฟฟ้ามีสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้านั้นๆ

2.12 ทฤษฎีดีแอลวีโอ (DLVO theory)

เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นทางไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กับความมีเสถียรภาพของอิมัลชัน โดยใช้ค่าความต่างศักย์ที่ขวางกั้น (Height of potential energy barrier) การรวมตัวระหว่างอนุภาคทั้งสองเพื่อบอกเสถียรภาพของระบบที่ส่งผลต่ออัตราการรวมตัวของอนุภาค ดังนั้นจึงนำทฤษฎีดีแอลวีโอมาอธิบายเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าในการบำบัดและรวบรวมอนุภาคน้ำมันให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้

2.12.1 หลักการเบื้องต้น

สมบัติและความเสถียรของอนุภาคอิมัลชัน สามารถอธิบายได้จากผลรวมของแรงกระทำ (Interaction force) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของอนุภาค และผลรวมของพลังงานระหว่างอนุภาค (Interaction energy)

2.12.1.1 แรงระหว่างผิวหน้าของอนุภาค (Interaction force, F)

- แรงวัลเดอรัวาล์ว (Van der Waals Force: f_{vw})

$$f_{vw}(D) = - \frac{A_H}{12\pi D^2} \quad (2-37)$$

- แรงอิเล็คโตรสตาติก (Electrostatic Force: f_E)

$$f_E(D) = \frac{64n_0kT\gamma^2 e^{-KD}}{K} \quad (2-38)$$

ผลรวมของแรงสุทธิระหว่างอนุภาค (Total interaction force: F) ใช้บอกแนวโน้มการรวมตัวกันของอนุภาคทั้งสอง โดยที่แรงแวลเดออร์วาล์ว (f_{vw}) เป็นแรงดึงดูดที่ทำให้อนุภาครวมตัวกัน ส่วนแรงอิเล็คโตรสตาติก (f_E) เป็นแรงผลักที่ทำให้อนุภาคเสถียรและรวมตัวได้ยาก ทั้งนี้จะเกิดขึ้นจาก ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอนุภาคและความแตกต่างของประจุในสารละลาย ตัวอย่างเช่น ถ้ามีแรงแวลเดออร์วาล์ว (f_{vw}) มากจะส่งผลให้เสถียรภาพระหว่างอนุภาคลดลงและสามารถรวมตัวกันได้ เนื่องจากมีแรงดึงดูด (Attractive) มากกว่าแรงผลัก (Repulsive)

$$\begin{aligned} F(D) &= \frac{2\pi R_1 R_2}{R_1 + R_2} f(D) \quad (2-39) \\ &= \frac{2\pi R_1 R_2}{R_1 + R_2} [f_E(D) + f_{vw}(D)] \\ &= F_E(D) + F_{vw}(D) \end{aligned}$$

โดยที่

A_H	ค่าคงที่ Hamaker	(5×10^{-21} จูล)
D	ระยะห่างระหว่างอนุภาค (เซนติเมตร)	
n_0	จำนวนของไอออนใน 1 ลบ.ซม.	
k	ค่าคงที่ Boltzmann	(1.38×10^{-23} จูล/เคลวิน)
T	อุณหภูมิ	(298 เคลวิน)
γ	[exp (ze ζ /2kT) - 1] / [exp (ze ζ /2kT) + 1]	
K^{-1}	ค่าดีไบฮัคเคิล	(10^8 เมตร ⁻¹)
R	รัศมีของอนุภาค (เซนติเมตร)	

2.12.1.2 พลังงานระหว่างผิวหน้าของอนุภาค (Interaction energy, U)

- พลังงานแวลเดออร์วาล์ว (Van der Waals Energy: U_{vw})

$$U_{vw}(D) = - \frac{A_H}{12\pi D^2} \quad (2-40)$$

- พลังงานอิเล็คโตรสตาติก (Electrostatic Energy: U_E) (2-41)

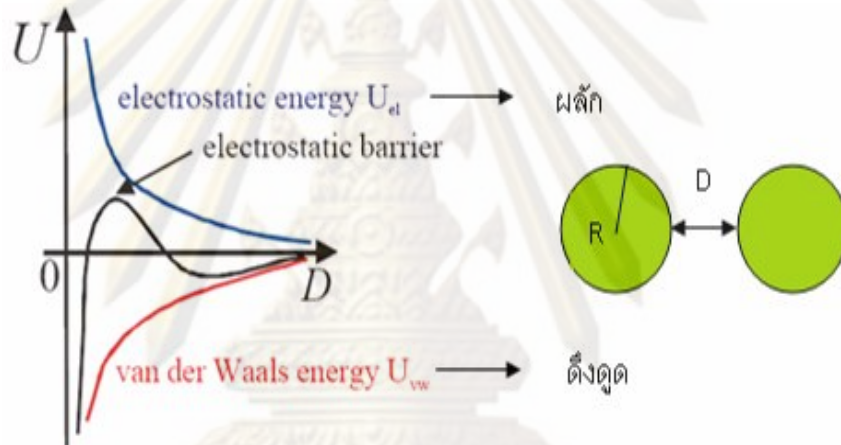
$$U_E(D) = \frac{2\pi\epsilon R\phi^2 \log(1 + e^{-KD}) - 2\pi\epsilon R(E_0 R)^2 \log \frac{1}{1 - e^{-KD}}}{1 - e^{-KD}}$$

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

$$U(D) = \int F(D) dD \tag{2-42}$$

$$= U_E(D) + U_{vw}(D)$$

โดยที่ ϵ ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของน้ำ (80 ฟาราเดย์/เซนติเมตร)
 ϕ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวอนุภาค (โวลต์)



รูปที่ 2-18 พลังงานที่ขวางกั้น (Height of potential energy barrier)

ความเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน จะขัดขวางความสามารถในการรวมตัว (ดังรูปที่ 2-18) ดังนั้นวิธีการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมัน จะต้องลดเสถียรภาพระหว่างอนุภาคน้ำมันลง โดยทำให้ประจุที่ผิวของอนุภาคเป็นกลาง เพื่อเพิ่มโอกาสในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันทำให้สามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบนได้

จากการศึกษาของ Ichikawa และ คณะ, 2004 กล่าวไว้ว่า การรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน เกิดขึ้นได้จากการลดลงของพื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาค และการลดลงของพลังงานที่ผิวหน้าของอนุภาคน้ำมัน โดยที่ความเสถียรของระบบขึ้นอยู่กับอัตราการรวมตัวของอนุภาค ทั้งนี้ อัตราจะขึ้นกับพลังงานศักย์ที่ขวางกั้นการรวมตัว (Height of potential energy barrier) ระหว่าง 2 อนุภาค ถ้าพลังงานศักย์ที่ขวางกั้นมากกว่าค่าพลังงานความร้อนจะส่งผลให้อัตราการรวมตัวของอนุภาคเข้าใกล้ศูนย์และอิมัลชันจะมีความเสถียรมาก โดยที่ค่าพลังงานศักย์ที่ผิวอนุภาคจะลดลงเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้ากำลังต่ำให้กับอิมัลชัน การผ่านสนามไฟฟ้าทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถ

ชนกัน โดยคล้ายกับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกคูเลชัน (Flocculation) คือ อนุภาคน้ำมันสามารถชนและเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ หลังจากนั้นอนุภาคน้ำมันจะลอยขึ้นด้านบนกลายเป็นชั้นน้ำมัน (Oil layer) ได้

และค่าสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพลด พิจารณาได้จากการกระจายตัวของประจุที่ล้อมรอบและประจุที่อนุภาคน้ำมัน ซึ่งเกิดจากการกระทำของประจุไฟฟ้าระหว่างสนามไฟฟ้าและประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพขึ้นได้ นอกจากนี้การใส่สนามไฟฟ้าจะก่อให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน รวมทั้งสามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคน้ำมันลงได้อีกด้วย

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 Rapid demulsification of dense oil-in-water emulsion by low electric field

I. Experiment (Ichikawa , Itoh , Yamoto and Sumita, 2004)

ทำการศึกษาการทำลายเสถียรภาพอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำโดยผ่านสนามไฟฟ้ากำลังต่ำ โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษา ได้แก่ อิทธิพลของสนามไฟฟ้า รูปแบบของกระแสไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงประจุที่ผิวอนุภาคน้ำมันเมื่อเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารลดแรงตึงผิว เตรียมอิมัลชันโดยการผสมน้ำมันกับน้ำในอัตราส่วน 4:1 – 3:1 แล้วเขย่าให้มากกว่า 100 ครั้ง จนผสมกันภายในกรวยแยก (Separating funnel) เกิดเป็นชั้นน้ำมัน ชั้นอิมัลชัน และชั้นน้ำ ตามลำดับ นำชั้นอิมัลชันออกมาใส่ในปีกเกอร์แก้ว ใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าจุ่มลงในอิมัลชันวางห่างกัน 5 เซนติเมตร ให้ความต่างศักย์ 30 โวลต์ ใช้ไม้บรรทัดวัดความสูงของชั้นน้ำมันที่เกิดขึ้นเพื่อบอกถึงการทำลายเสถียรภาพ โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ คือ Na_2SO_4 (Sodium Sulfate) ปริมาณ 5 มิลลิโมลต่อลิตร สารลดแรงตึงผิวประจุลบที่ใช้ คือ SDS (Sodium Dodecyl Sulfate) ปริมาณ 3 มิลลิโมลต่อลิตร และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุที่ใช้ คือ Tween 20 (Polyoxyethylene sorbitanmonolaurate)

ผลการศึกษา พบว่า

1. เมื่อผ่านสนามไฟฟ้า พบว่าเกิดการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง มีผลทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นชั้นน้ำมัน
2. เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า พบว่าไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทำลายเสถียรภาพอิมัลชันได้ดีกว่ากระแสไฟฟ้าสลับเมื่อพิจารณาที่เวลาและสนามไฟฟ้าเดียวกัน (ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าสลับจะต้องใช้ความถี่ต่ำกว่า 10 กิโลเฮิรท์ซ์)

3. การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้ความสูงของชั้นน้ำมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์แตกตัวให้ประจุบวกซึ่งจะลดประจุลบที่ผิวอนุภาคน้ำมัน ทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันได้

4. การเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบจะเพิ่มเสถียรภาพให้กับอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากประจุลบที่ผิวอนุภาคน้ำมันจะเพิ่มขึ้นทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันได้

5. การเติมสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุจะไม่มีผลต่อการทำลายเสถียรภาพอิมัลชัน เนื่องจากไม่ทำให้ประจุที่ผิวอนุภาคนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง

สรุปผลการศึกษา

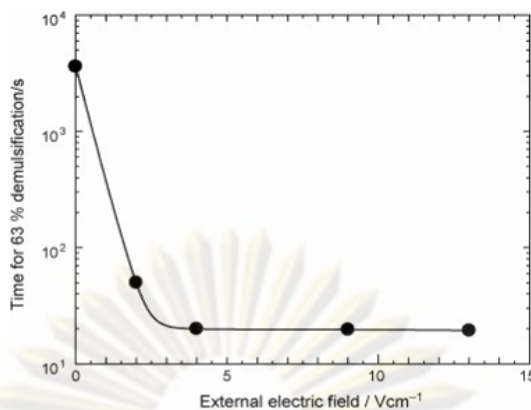
1. เมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าจะเพิ่มโอกาสในการชนและรวมตัวกันของอนุภาคเกิดเป็นชั้นน้ำมัน
2. กระแสไฟฟ้าตรงสามารถทำลายเสถียรภาพอิมัลชันได้ดีกว่ากระแสไฟฟ้าสลับ
3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เสถียรภาพอิมัลชันลดลงอนุภาคน้ำมันรวมตัวได้ดีขึ้น
4. สารลดแรงตึงผิวประจุลบทำให้อนุภาคน้ำมันมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นจึงรวมตัวกันได้ง่าย
5. สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุจะไม่มีผลต่อการทำลายเสถียรภาพ
6. การเคลื่อนที่ของประจุที่ผิวอนุภาคน้ำมันมีผลต่อการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน

2.13.2 Electrical demulsification of oil-in-water emulsion (Ichikawa, 2007)

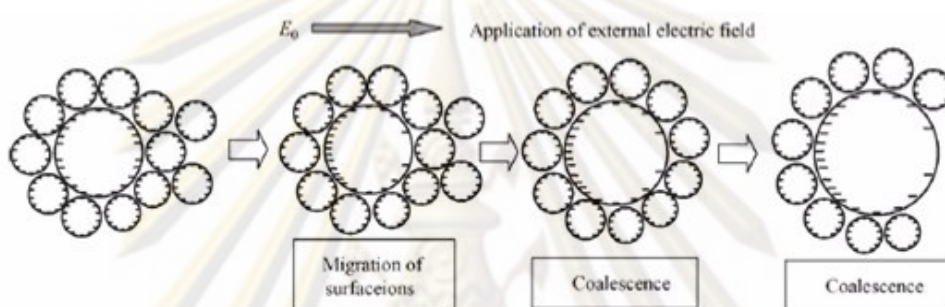
ทำการศึกษาการทำลายเสถียรภาพอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษาคือ ค่าสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน เติรมอิมัลชันโดยการผสมน้ำมันกับน้ำในอัตราส่วน 3:2 แล้วเขย่าให้มากกว่า 100 ครั้ง จนผสมกันในกรวยแยก (Separating funnel) โดยมีสารลดแรงตึงผิวปริมาณ 0.2 มิลลิโมลต่อลิตร ของ sodium 2-naphthyl sulfonate ถ้าใส่สนามไฟฟ้ามากกว่า 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะคงอยู่ในรูปอิมัลชันในเวลาที่น้อยกว่า 20 วินาที

ผลการศึกษา

1. เมื่อใส่สนามไฟฟ้ามากกว่า 4 โวลต์/เซนติเมตร จะสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันให้สามารถรวมตัวกันได้ภายในเวลา 20 วินาที (ดังรูปที่ 2-19)
2. เมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าจะเกิดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ประจุที่ผิวของอนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ และเกิดเป็นช่องว่างที่สามารถทำให้อนุภาคน้ำมันอื่นๆ สามารถเข้ามารวมตัวจนมีอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้ และเสถียรภาพความเป็นอิมัลชัน (ดังรูปที่ 2-20)



รูปที่ 2-19 เวลาที่ใช้ทำลายเสถียรภาพอิมัลชันเมื่อผ่านสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2-20 การทำลายเสถียรภาพด้วยไฟฟ้า

สรุปผลการศึกษา

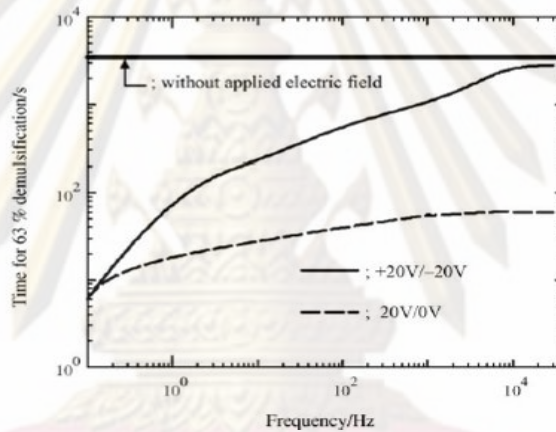
สนามไฟฟ้าทำให้ประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันเกิดการเคลื่อนที่ และสามารถรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันอื่นๆ ได้จนมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ามากกว่า 4 โวลต์/เซนติเมตร

2.13.3 Stability of oil-in-water emulsion with mobile surface charge (Ichikawa, Dohda, and Nakajima, 2006)

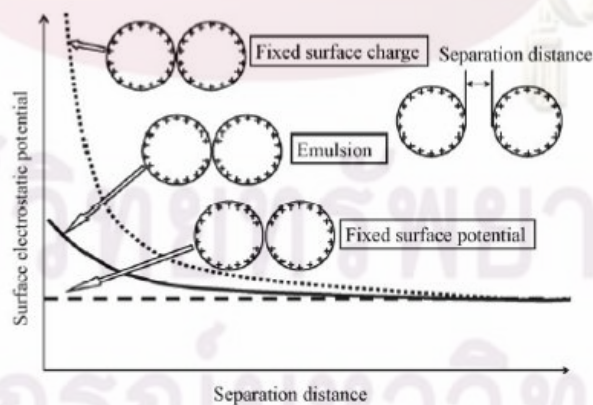
ทำการศึกษาคงความเสถียรภาพของอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ เมื่อประจุที่ผิวอนุภาคน้ำมันมีการเคลื่อนที่ โดยตัวแปรที่จะศึกษา คือ เวลาในการทำลายเสถียรภาพ เตรียมอิมัลชันโดยการผสมน้ำมันกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 ที่เติมสารลดแรงตึงผิว 0.2 มิลลิโมลต่อลิตร ของ sodium 2-naphthyl sulfonate แล้วเขย่าให้มากกว่า 100 ครั้ง จนผสมกันในกรวยแยก (Separating funnel) ใช้แผ่นสแตนเลสตีลเป็นขั้วไฟฟ้าขนาด 3.2 x 5 เซนติเมตร วางห่างกัน 3 เซนติเมตร จุ่มลงในอิมัลชันปริมาตร 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ จากนั้นวัดปริมาตรอิมัลชันที่ถูกทำลายเสถียรภาพในฟังก์ชันของเวลา

ผลการศึกษา

1. จากการทดลอง พบว่าถ้าให้กระแสไฟฟ้าความถี่ 0.1 เฮิรท์ ความต่างศักย์ +20 โวลต์/0 โวลต์ อิมัลชันจะถูกทำลายเสถียรภาพไป 63 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 5 วินาที เนื่องจากไม่มีการหน่วงของประจุ (ดังรูปที่ 2-21)
2. เมื่อให้กระแสไฟฟ้าความถี่ 10 กิโลเฮิรท์ ความต่างศักย์ +20 โวลต์/-20 โวลต์ ไม่สามารถทำลายเสถียรภาพได้เพราะการเคลื่อนที่ของประจุเกิดการหน่วงขึ้น
3. อนุภาคน้ำมันสามารถถูกทำลายเสถียรภาพและรวมตัวกันได้ โดยไม่ต้องผ่านสนามไฟฟ้า (0 โวลต์) แต่จะใช้เวลามากที่สุด
4. อิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำจะถูกทำลายเสถียรภาพอย่างรวดเร็ว เมื่อผ่านสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่า 10 โวลต์/เซนติเมตร



รูปที่ 2-21 กระแสไฟฟ้ากับการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชัน



รูปที่ 2-22 ศักย์ไฟฟ้ากับการเคลื่อนที่ของประจุที่ผิวอนุภาคน้ำมัน

สรุปผลการศึกษา

1. การเคลื่อนที่ของประจุที่ผิวอนุภาคเกิดจากการเข้าใกล้กันของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ประจุเคลื่อนที่ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวอนุภาคลดลง เท่ากับการลดแรงผลักดันระหว่างอนุภาค ดังนั้นอนุภาคน้ำมันจึงสามารถรวมตัวกันได้ (ดังรูปที่ 2-22)

2. เวลาในการทำลายเสถียรภาพ เรียงจากเร็วไปช้า คือ ความต่างศักย์ +20 โวลต์/0 โวลต์, +20 โวลต์/-20 โวลต์ และ 0 โวลต์ ตามลำดับ

2.13.4 Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds

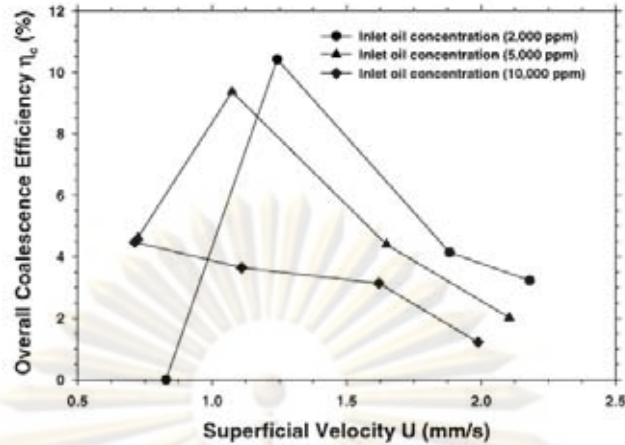
(Li and Gu, 2005)

ทำการศึกษารวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ โดยใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ตัวแปรที่จะทำการศึกษาคือ อัตราการไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย ความยาวของตัวกลาง และขนาดของเส้นใย อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้เป็นท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.3 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร โดยให้การไหลของน้ำเสียเป็นแบบการไหลในแนวนอน (Horizontal flow) และตัวกลางที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ เส้นใยโพลีโพรพิลีน เส้นใยไนลอน และโพลีโพรพิลีนเม็ด ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ สำหรับตัวกลางแบบเส้นใยและตัวกลางแบบเม็ด ตามลำดับ คำนวณจาก

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

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

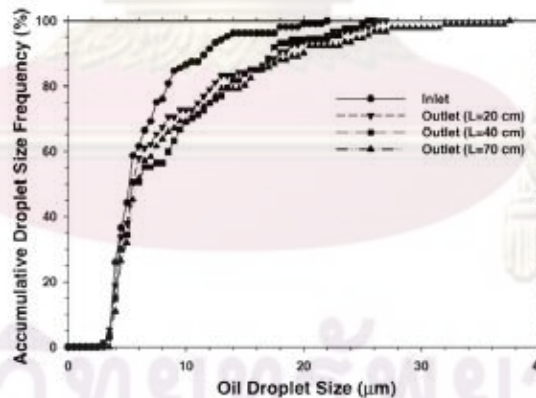
เมื่อ	η_c	ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์	S	ค่าดีกรีของความอิ่มตัว
	ϕ	ค่าความพรุนของตัวกลาง	C_0	ความเข้มข้นของน้ำมัน
	d_f	ขนาดของเส้นใย	d_g	ขนาดของตัวกลางแบบเม็ด
	d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของน้ำมันในน้ำเสียเข้า		
	Y	อัตราส่วนของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ต่อน้ำเสียเข้าระบบ		



รูปที่ 2-23 ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ที่ความเข้มข้นของน้ำมันต่างๆ

ผลการศึกษา

1. ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการไหลของน้ำเสียเพิ่ม และเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันมีค่าสูง (10,000 ส่วนในล้านส่วน) ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะลดลง (ดังรูปที่ 2-23)
2. ความยาวของชั้นตัวกลางมีผลน้อยมากในการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน (ดังรูปที่ 2-24)
3. เส้นใยขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน มากกว่าเส้นใยขนาดใหญ่เนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำมันมากกว่า



รูปที่ 2-24 การรวมตัวของอนุภาคน้ำมันที่ความยาวของชั้นตัวกลางต่างๆ

สรุปผลการศึกษา

1. โคอะเลสเซอร์ที่ให้น้ำเสียไหลในแนวนอน ความยาวของตัวกลางจะไม่มีผลต่อการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน

2. ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเข้าโคอะเลสเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดลองสามารถหาช่วงที่เหมาะสมในการบำบัดได้
3. ความเข้มข้นของน้ำเสียและชนิดของตัวกลางที่ใช้ จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดอิมัลชันของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

2.13.5 Comparison of ultrafiltration and distillation processes for treatment of cutting oil emulsion (Wanichkul, 2000)

ทำการศึกษามลกระทบที่เกิดขึ้นจากความสูงของชั้นตัวกลาง ความเร็วการไหลของน้ำเสีย และการวางตัวกลางเป็นชั้นสลับกับช่องว่าง (Multi-step) ต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ โดยใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ทรงกระบอก และตัวกลางแบบเส้นใยทำจากสแตนเลสสตีล ขนาด 60 ไมครอน (ดังรูปที่ 2-25) มีลักษณะเป็นแบบวงแหวน ซึ่งจะทำการทดลองโดยใช้อิมัลชันของคีโรซีนในน้ำที่ความเข้มข้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำมัน 10 ไมครอน เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ต้องการที่จะศึกษาโคอะเลสเซอร์ในการเพิ่มขนาดของหยดน้ำมัน ดังนั้น การประเมินประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ในการทดลองนี้จึงใช้การเปลี่ยนหยดน้ำมันให้มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน ซึ่งจากสมการของสโตกจะพบว่า ในการแยกตัวของอิมัลชันคีโรซีนขนาด 100 ไมครอน ในขวดตกตะกอนสูง 10 เซนติเมตร ต้องใช้เวลา 1 นาที



รูปที่ 2-25 ตัวกลางแบบเส้นใยทำจากสแตนเลสสตีล

ดังนั้นประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จึงสามารถคำนวณได้จากสมการ

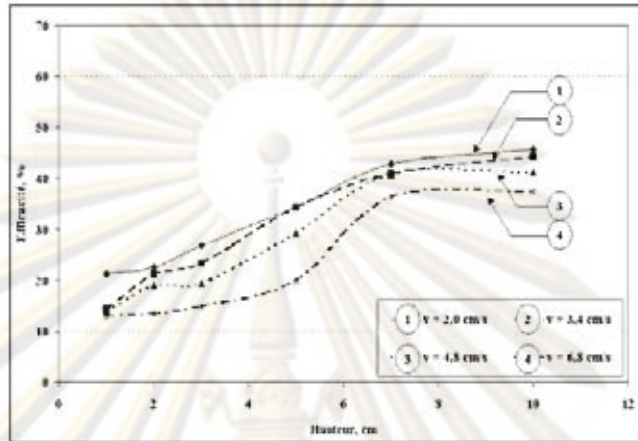
$$\text{Eff} (\%) = \frac{\text{TOC}_i - \text{TOC}_o}{\text{TOC}_i} \times 100 \%$$

เมื่อ TOC_i ค่า TOC ของอิมัลชันที่เข้าระบบ หลังจากที่ตั้งให้ตกตะกอน 1 นาที

TOC_o ค่า TOC ของอิมัลชันที่ออกจากระบบ หลังจากที่ตั้งให้ตกตะกอน 1 นาที

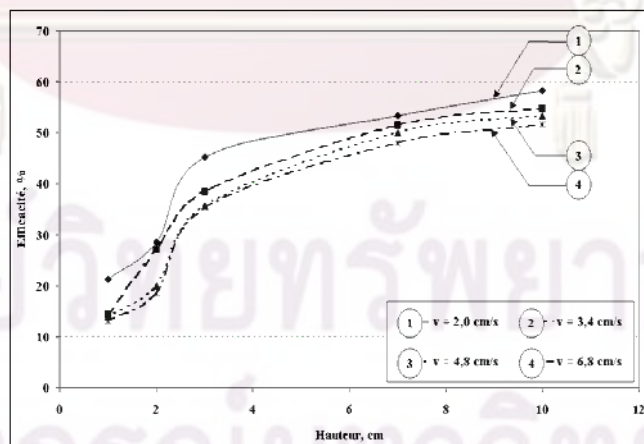
ผลการศึกษา

1. การเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลางจาก 1 เซนติเมตร เป็น 10 เซนติเมตร ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ที่ความเร็วการไหลของน้ำ 6.8 เซนติเมตร/วินาที จะเพิ่มขึ้นจาก 12 เป็น 38% ซึ่งประสิทธิภาพจะเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 1-7 เซนติเมตร (ค่าความสูงวิกฤติ)



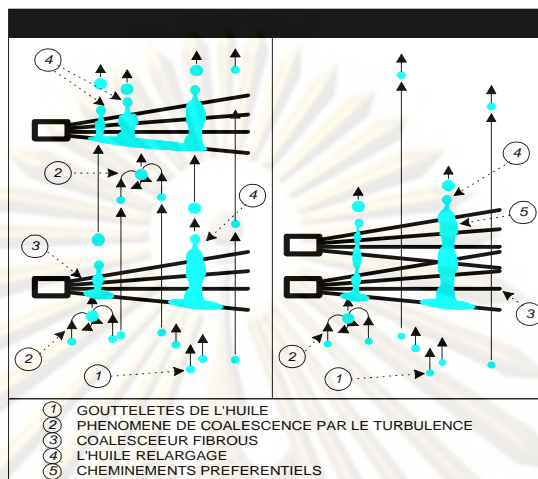
รูปที่ 2-26 ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์กับความสูงของชั้นตัวกลางที่ความเร็วการไหลต่างๆ

2. ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วการไหลของน้ำลดการวางตัวกลางแบบเป็นชั้นสลับกับช่องว่าง (ความสูงของแต่ละชั้นเท่ากับ 1 เซนติเมตร) พบว่าประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะเพิ่มขึ้นจาก 12 เป็นมากกว่า 50% เมื่อความสูงของชั้นตัวกลางเพิ่มจาก 1 เซนติเมตร เป็น 10 เซนติเมตร ผลที่ได้จะเหมือนกับการวางตัวกลางแบบติดกัน คือ ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลาง และเมื่อความเร็วการไหลของน้ำลดลง



รูปที่ 2-27 ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์แบบวางตัวกลางสลับกับช่องว่างกับความสูงของชั้นตัวกลางที่ความเร็วการไหลต่างๆ

3. โคอะเลสเซอร์แบบธรรมดา อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กจะเคลื่อนที่เข้าใกล้เส้นใยและรวมตัวกันเป็นหยดขนาดใหญ่แล้วจึงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไป ส่วนกรณีของโคอะเลสเซอร์แบบวางตัวกลางสลับกับช่องว่างอนุภาคน้ำมันที่ออกจากตัวกลางชั้นแรกจะการรวมตัวกันอีกในชั้นต่อไป



รูปที่ 2-28 เปรียบเทียบกลไกการรวมตัวของหยดน้ำมันในของโคอะเลสเซอร์แบบวางตัวกลางสลับกับช่องว่างกับโคอะเลสเซอร์แบบธรรมดา

สรุปผลการศึกษา

1. ความสูงของตัวกลางและความเร็วการไหลของน้ำ เป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ โดยประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-7 เซนติเมตร หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และการเพิ่มความเร็วการไหลของน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ลดลง
2. โคอะเลสเซอร์ที่มีการวางตัวกลางเป็นชั้นสลับกับช่องว่างจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการวางตัวกลางแบบติดกันถึง 25% และยังช่วยลดการอุดตันของตัวกลางด้วย

2.13.6 Separation of micro-dispersions in fiber-beds (Rebelein and Blass, 1990)

ทำการศึกษาการแยกอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กด้วยชั้นตัวกลางเส้นใย ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดของตัวกลาง วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อแยกอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กในถังตกตะกอนด้วยชั้นตัวกลางเส้นใย อนุภาคอิมัลชันที่ใช้ในการทดลองมีขนาดระหว่าง 1 - 100 ไมครอน ตัวกลางเส้นใยที่ใช้ คือ เส้นใยสแตนเลส เส้นใยแก้ว และเส้นใย PTFE ที่มีขนาดระหว่าง 5 - 50 ไมครอน โดยที่ชั้นตัวกลางยาว 5 - 60 มิลลิเมตร

ผลการศึกษา

1. ประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชันจะลดลง เมื่ออนุภาคอิมัลชันที่เข้าสู่ระบบมีขนาดเล็กลงหรือมีความเร็วในการไหลที่สูงขึ้น

2. ประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชัน เกี่ยวข้องกับลักษณะการเปียกได้ของเส้นใยและขนาดของเส้นใยที่ใช้เป็นตัวกลาง ส่วนความยาวของชั้นตัวกลางในการวิจัยนี้พบว่ามีผลต่อประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อย

สรุปผลการศึกษา

เส้นใยสแตนเลสมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคอิมัลชันได้เป็นอย่างดี อีกทั้งสามารถหาซื้อได้ง่าย เหมาะกับการนำมาใช้เป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

2.13.7 Novel electrode system for electroflotation of wastewater (Chen และคณะ, 2002)

ทำการศึกษากการใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบใหม่ ในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการลอยตัวด้วยไฟฟ้า ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าซีไอดี และประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน ในส่วนของการลอยตัวด้วยไฟฟ้าใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นไทเทเนียม (พื้นที่ผิว 9 ตารางเซนติเมตร) และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นไทเทเนียมเคลือบด้วย $\text{IrO}_x\text{-Sb}_2\text{O}_5\text{-SnO}_2$ (ยาว 5.3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และพื้นที่ผิว 6 ตารางเซนติเมตร) วางห่างกัน 2 มิลลิเมตร ส่วนช่วงการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ขนาด 100x55x3 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 2-29)

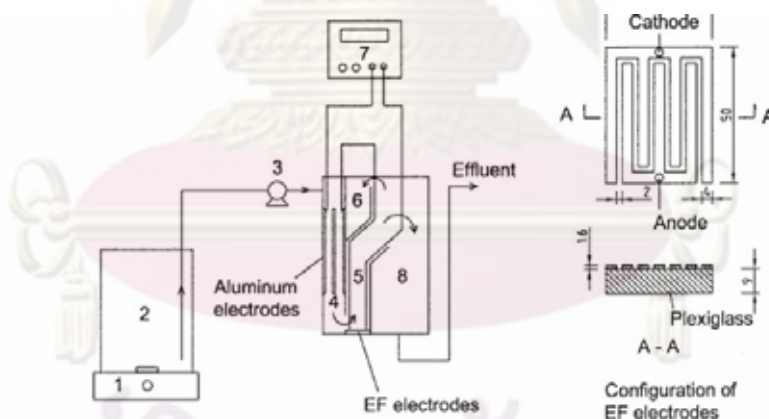


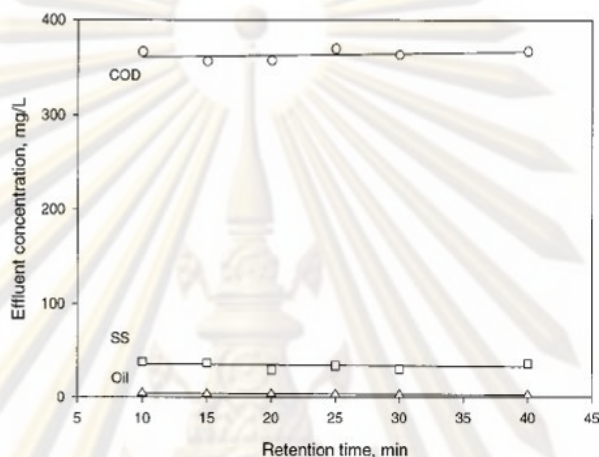
FIGURE 1. Schematic diagram of the experimental setup. 1, Magnetic stirrer; 2, tank; 3, pump; 4, CE cell; 5, EF cell; 6, sludge chamber; 7, DC power supply; 8, separation chamber.

รูปที่ 2-29 แผนผังการต่ออุปกรณ์

ผลการศึกษา

1. ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เคลือบไว้ไม่เสื่อมสภาพ (ไม่แตกและไม่เป็นรู) โดยระยะเวลาการใช้งานของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนมากจะใช้ค่าที่ต่ำกว่า 300 แอมแปร์/ตารางเมตร

2. น้ำเสียจะผ่านช่วงการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าก่อนทำให้เกิดตะกอนเบาขึ้น และอนุภาคสามารถเข้าไปเกาะตัวได้
3. เมื่อน้ำเสียผ่านช่วงการลอยตัวด้วยไฟฟ้าจะเกิดก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนขนาดเล็กขึ้นจำนวนมาก ซึ่งช่วยในการดันอนุภาคให้ลอยตัวขึ้นด้านบนได้โดยไม่ทำให้ตะกอนแตก
4. สามารถลดความสกปรกของน้ำ (ค่าซีโอดี ค่าตะกอนแขวนลอย และปริมาณน้ำมัน) ได้ 98 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (ดังรูปที่ 2-30)



รูปที่ 2-30 ความเข้มข้นของน้ำออกที่เวลาต่างๆ

5. ถ้าระยะระหว่างขั้วน้อย ทำให้ค่าแรงต้านทานกระแสไฟฟ้าน้อย ค่าการนำไฟฟ้าลดลง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งถือว่าการประหยัดพลังงาน

สรุปผลการศึกษา

1. การปรับปรุงสภาพของขั้วไฟฟ้าทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น (ขั้วแอโนดเสื่อมสภาพช้า)
2. กระบวนการลอยตัวด้วยไฟฟ้าสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้นได้ โดยไม่ขึ้นกับเวลาในการทำปฏิกิริยา

2.13.8 Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation (Chen 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

สรุปผลการศึกษา

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถบำบัดน้ำเสียจากร้านอาหารที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันและไขมันได้

2.13.9 Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes (Ayhan and Mahmut, 2006)

ทำการศึกษากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตนมโดยใช้วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า กับน้ำเสียที่มีค่าซีโอดี ค่าน้ำมันและไขมันในปริมาณสูง โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรดเบส เวลาในการบำบัด และค่าซีโอดี โดยใช้ทดลองกับน้ำเสียเริ่มต้นที่มีค่าซีโอดีเท่ากับ 18,300 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำมันและไขมันเท่ากับ 4,570 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นขั้วเหล็ก

ผลการศึกษา

1. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ 0.6 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
2. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 7
3. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 1 นาที
4. สามารถลดค่าซีโอดีลงได้ร้อยละ 98 และกำจัดปริมาณน้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 99

สรุปผลการศึกษา

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันและไขมันได้ รวมทั้งสามารถลดค่าความสกปรกของน้ำหรือค่าซีโอดีลงได้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดข้างต้น พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากเป็นน้ำมันที่มีเสถียรภาพสูง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นส่วนของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Coalescer) และส่วนของ

กระบวนการทางไฟฟ้า (Electro-chemistry/Electrostatic) แยกจากกัน เนื่องจากทั้งสองวิธีนี้มีแนวโน้มเพิ่มความสามารถการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้กลไกการทำงานรวมไปถึงปัจจัยสำคัญต่างๆ ในกรณีที่น่าทั้งสองวิธีมารวมกันนั้น ยังเป็นประเด็นที่น่าสนใจและศึกษาต่อไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษา การนำอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์มาใช้ร่วมกับกระบวนการทางไฟฟ้า เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถของการรวมตัวของอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าการใช้อุปกรณ์เพียงชนิดเดียว และเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกชั้นน้ำมันให้มากขึ้นสำหรับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ รวมทั้งเข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพ เช่น อัตราการไหลของน้ำเสีย อัตราการวนกลับของน้ำเสีย ศักย์ไฟฟ้า ชนิดขั้วไฟฟ้า และระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า เป็นต้น



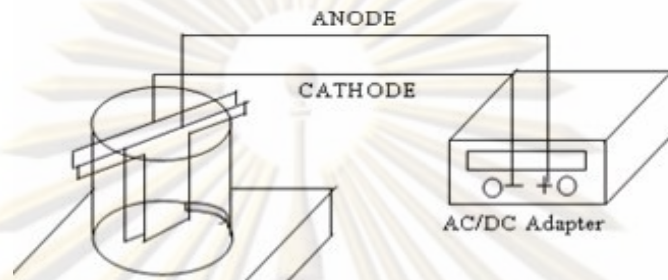
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

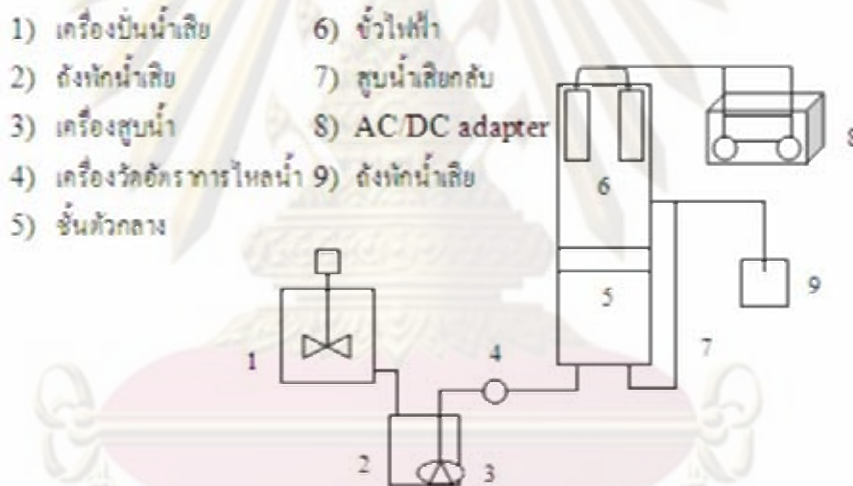
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง



รูปที่ 3-1 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรสตาติก



รูปที่ 3-2 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์

ทำการปั๊มน้ำเสียด้วยเครื่องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แล้วปั๊มเข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหลผ่านเข้าสู่อุปกรณ์โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ภายในที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเครื่องแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรงและทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่จุดน้ำออกตามเวลา

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรสตาติก กระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร (แสดงดังรูปที่ 3-1)
2. ชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ กระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 1 เมตร (แสดงดังรูปที่ 3-2)
3. ตัวกลางเส้นใยตู้ปลาสำหรับโคอะเลสเซอร์ (Fibrous coalescing bed)

4. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากอะลูมิเนียม เหล็กและแกรไฟต์ ขนาด 20cm x 5cm x 2mm
 5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรงให้ความต่างศักย์สูงสุด 20 โวลต์
 6. เครื่องปั่นกวนน้ำ (Motor stirrer) บริษัท เบคไทย (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น IKA LABORTECHIK
 7. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible pump) ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 1000 ลิตรต่อชั่วโมง บริษัท JUN aquarium equipment รุ่น HX-2500
 8. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 25 ลิตร/ชั่วโมง บริษัท New-Flow Technologies, INC
 9. ถังเก็บน้ำพลาสติกขนาด 10 และ 25 ลิตร
 10. นาฬิกาจับเวลา บริษัท KADIO รุ่น KD-2015
 11. กล้องถ่ายภาพดิจิตอล บริษัท Nikon รุ่น Coolpix L18
 12. กล้องจุลทรรศน์ บริษัท Nikon รุ่น YS2-H
 13. เครื่องวัดค่าพีเอช บริษัท Scientific Promotion รุ่น CG840
 14. ไม้บรรทัด
 15. ชุดทดสอบจาร์เทสต์
 16. อุปกรณ์วัดค่าซีโอดี
 - หลอดทดสอบวัดค่าซีโอดี ขนาด 16x150 มม. พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene, TFE)
 - ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น 600 สามารถให้ความร้อนอยู่ระหว่าง 150 ± 2 °C
 - ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร
 - กระบอกลอย (Cylinder) ขนาด 200, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
 - ปิเปต (Pipet) ขนาด 1, 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร
- 3.1.3 สารเคมี
1. น้ำมันปาล์ม บริษัท มรกต อินดรัสตรีส์ จำกัด มหาชน
 2. สารลดแรงตึงผิว ได้แก่ Sodium lauryl sulfate (Anionic)
 3. สารละลายมาตรฐาน Potassium Dichromate Digestion


4. สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulphate
5. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4) บริษัท J.T. Baker
6. สารโคแอกกูแลนต์ (Coagulants)
7. เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride, $FeCl_3$) บริษัท Carlo Erba
8. สารส้ม (Alum, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) บริษัท Carlo Erba

โดยที่ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์มและสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3-1 และ 3-2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3-1 ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์ม

ค่าความหนืด (CP) @21°C	88.6
ค่าความหนาแน่น (g/ml) @21°C	0.898
ค่าความร้อน (kJ/kg)	39,550

ตารางที่ 3-2 ลักษณะสมบัติของ Sodium lauryl sulfate (Anionic Surfactant)

IUPAC name	Sodium dodecyl sulfate
Other names	Sodium monododecyl sulfate; Sodium lauryl sulfate; Sodium monolauryl sulfate; Sodium dodecanesulfate; dodecyl alcohol, hydrogen sulfate, sodium salt; n-dodecyl sulfate sodium
Molecular formula	$C_{12}H_{25}SO_4Na$ 
Molar mass	288.38 g/mol

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมโดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร เติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Sodium Dodecyl Sulphate, SDS) ที่ 1 CMC มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.008 โมล/ลิตร (ประจักษ์ ศาสตร์เวช, 2551) ทำการปั่นกวนน้ำตัวอย่างที่ 125 รอบ/นาที นาน 30 นาที เพื่อนำไปใช้สำหรับการทดลอง ในการศึกษานี้แบ่งเป็น 5 ส่วน คือ

การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเพื่อหาขนาดอนุภาค น้ำมันเริ่มต้น และศึกษาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อทำการศึกษาลักษณะของตัวกลาง ความสูงของชั้นตัวกลาง ค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม

การทดลองที่ 2 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการทำลายเสถียรภาพโดยใช้วิธีจาร์เทสต์ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคน้ำมันคงตัวที่แขวนลอยในน้ำเสียและศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยการเติมสารเคมี

การทดลองที่ 3 ศึกษาการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของชนิดขั้วไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า โดยเดินระบบแบบทีละเท

การทดลองที่ 4 ศึกษากระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ เป็นการรวมการทดลองในส่วนของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ใช้ร่วมกับการใช้ไฟฟ้า เพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิว โดยนำค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย ชนิดขั้วไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้นมาประยุกต์ใช้กับการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ในการเดินระบบ

การทดลองที่ 5 ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเวียนกลับน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและความสูงของชั้นน้ำมันด้านบน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

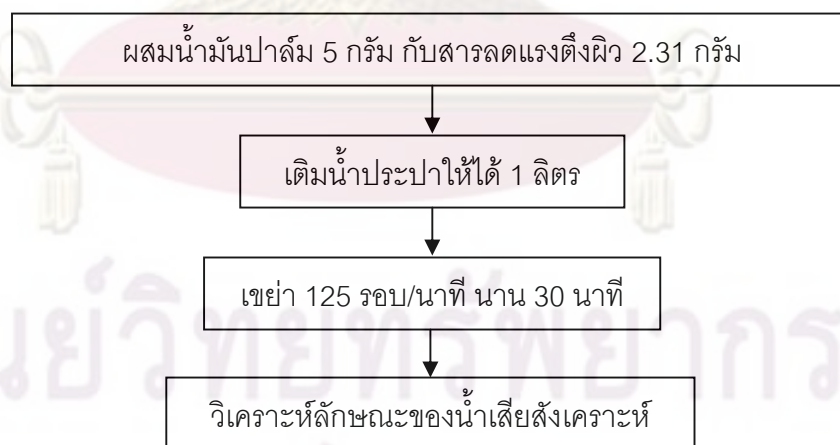
3.2.1 ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียและอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

การทดลองที่ 1.1 : ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของอนุภาคน้ำมัน ค่าความหนืด (Viscosity) และค่าซีไอดีเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-3 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. ชนิดของน้ำ 2. ชนิดของน้ำมัน 3. ชนิดของสารลดแรงตึงผิว 4. ความเข้มข้นของน้ำมัน 5. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 	<ol style="list-style-type: none"> 1. น้ำประปา 2. น้ำมันปาล์ม 3. Sodium lauryl sulphate (SDS) 4. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 5. 0.008 โมล/ลิตร (2.31 กรัม/ลิตร)
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> 1. ขนาดอนุภาคน้ำมัน 2. ค่าความหนืด 3. คุณภาพน้ำ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 2. ค่าความหนืด 3. ค่าซีไอดี

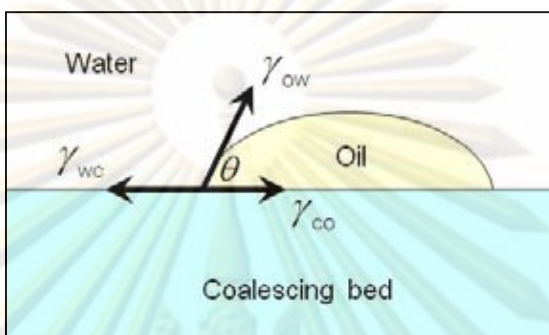


รูปที่ 3-3 แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองที่ 1.2 : ศึกษาลักษณะของตัวกลาง

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยทำการศึกษาลักษณะของตัวกลาง ศึกษาความสูงของชั้นตัวกลาง รวมทั้งหาค่าอัตราการไหลของน้ำเสียและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาการเกาะติดของหยดน้ำมันในน้ำบนผิวของตัวกลาง แสดงดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 แรงตึงผิวระหว่างน้ำ น้ำมันและตัวกลาง

จะเห็นได้ว่า

$$\gamma_{wc} = \gamma_{co} + \gamma_{ow} \cos \theta \quad (3-1)$$

เมื่อ

γ_{wc} แรงตึงผิวระหว่างน้ำกับตัวกลาง

γ_{co} แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง

γ_{ow} แรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำ

จากสมการที่ 3-1 พบว่าหากต้องการทราบค่ามุมสัมผัสจะต้องทราบค่าแรงตึงผิวทั้งหมดก่อน แต่เนื่องจากค่าแรงตึงระหว่างน้ำกับตัวกลาง (γ_{wc}) และค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง (γ_{co}) นั้นทำการวัดได้ยาก จึงต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้การหยดน้ำมันและน้ำลงบนตัวกลางภายใต้อากาศ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิวได้

$$\text{จะได้ว่า} \quad \gamma_{cg} = \gamma_{co} + \gamma_{og} \cos \theta \quad (3-2)$$

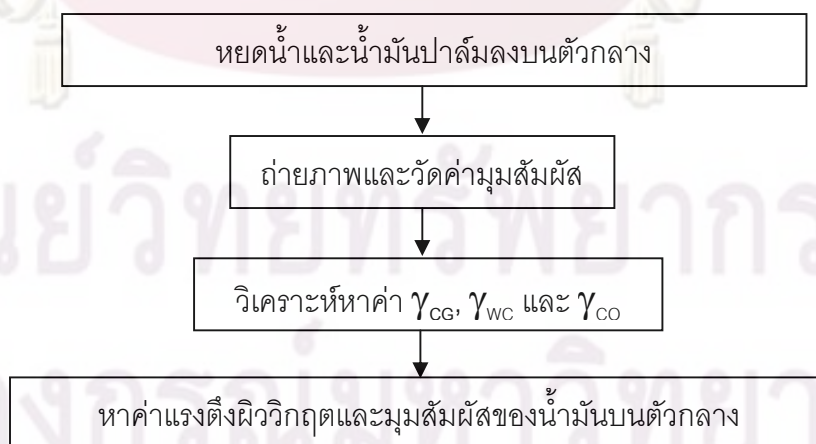
$$= \gamma_{wc} + \gamma_{wg} \cos \theta \quad (3-3)$$

โดยที่ค่า γ_{cg} เป็นสมบัติเฉพาะของตัวกลาง เรียกว่า แรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง (Critical surface tension) ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีการของ Zisman (Method of Zisman) โดยจะทำการหยดที่มีสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ กันลงบนผิวของตัวกลาง จากนั้นจึงทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแต่ละค่า เมื่อนำค่าแรงตึงผิวของน้ำ

ที่ความเข้มข้นต่างๆ มาวาดกราฟเทียบกับค่าโคไซน์ของมุมสัมผัส ($\cos\theta$) จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่าแรงตึงผิวของน้ำที่ให้ค่าโคไซน์เท่ากับ 1 คือ ค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง (γ_{CG}) เมื่อทราบค่า γ_{CG} แล้วจะสามารถหาค่า γ_{CO} และ γ_{WC} ได้จากสมการที่ 3-2 และ 3-3 หลังจากนั้นก็จะหาค่ามุมสัมผัสได้จากสมการที่ 3-1

จากสมการที่ 3-1 เห็นได้ว่าความไม่ชอบน้ำของตัวกลางสามารถบอกได้ด้วยค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันบนตัวกลาง โดยที่ตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำจะให้ค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า ดังนั้นในการทดลองจึงศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลางซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยทำการวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง (Critical surface tension, γ_{CG}) และค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ เพื่อใช้อธิบายความไม่ชอบน้ำของตัวกลาง โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-4 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-5

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ 2. ชนิดน้ำมัน 3. สารลดแรงตึงผิว 4. ชนิดของตัวกลาง	1. น้ำประปา 2. น้ำมันปาล์ม 3. SDS เข้มข้น 0.008 โมล/ลิตร 4. เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง 2. ค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลาง	1. ค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง 2. ค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลาง



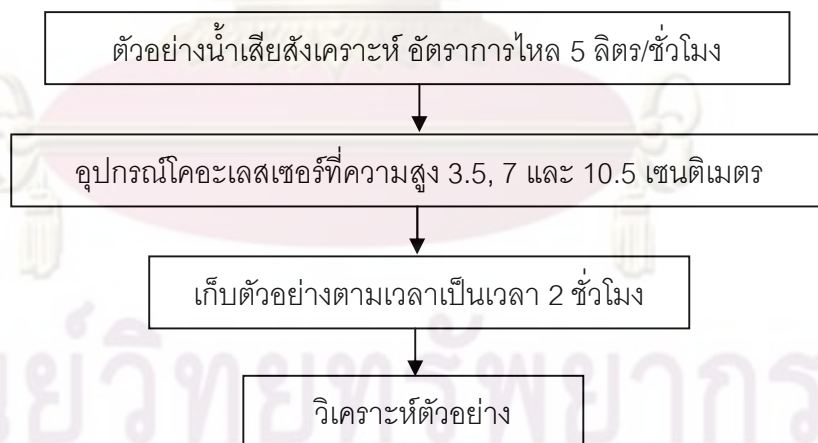
รูปที่ 3-5 แผนผังการศึกษาลักษณะของตัวกลาง

การทดลองที่ 1.3 : ศึกษาความสูงของชั้นตัวกลาง

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาค่าความสูงของชั้นตัวกลาง 3 ค่า คือ 3.5, 7 และ 10.5 เซนติเมตร และควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่ 5 ลิตร/ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างตามเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-5 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-6

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษาความสูงของชั้นตัวกลาง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว	2. 0.008 โมล/ลิตร
3. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	3. 5 ลิตร/ชั่วโมง
4. ชนิดตัวกลาง	4. เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความสูงของชั้นตัวกลาง	1. 3.5, 7 และ 10.5 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำทิ้ง	1. ค่าซีไอดี



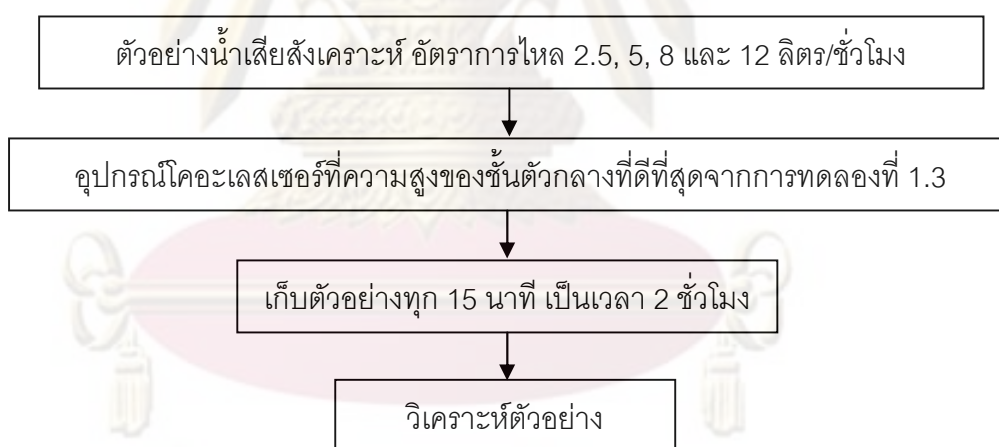
รูปที่ 3-6 แผนผังการศึกษาความสูงของชั้นตัวกลาง

การทดลองที่ 1.4 : ศึกษาผลของอัตราการไหลของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

นำน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิว มาศึกษาหาค่าอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีความสูงของชั้นตัวกลางที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.3 ซึ่งทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสีย 4 ค่า คือ 2.5, 5, 8 และ 12 ลิตร/ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างตามเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าซีไอดีโดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-6 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-7

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	1. 2.5, 5, 8 และ 12 ลิตร/ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1. ค่าซีไอดี



รูปที่ 3-7 แผนผังการหาค่าอัตราการไหล

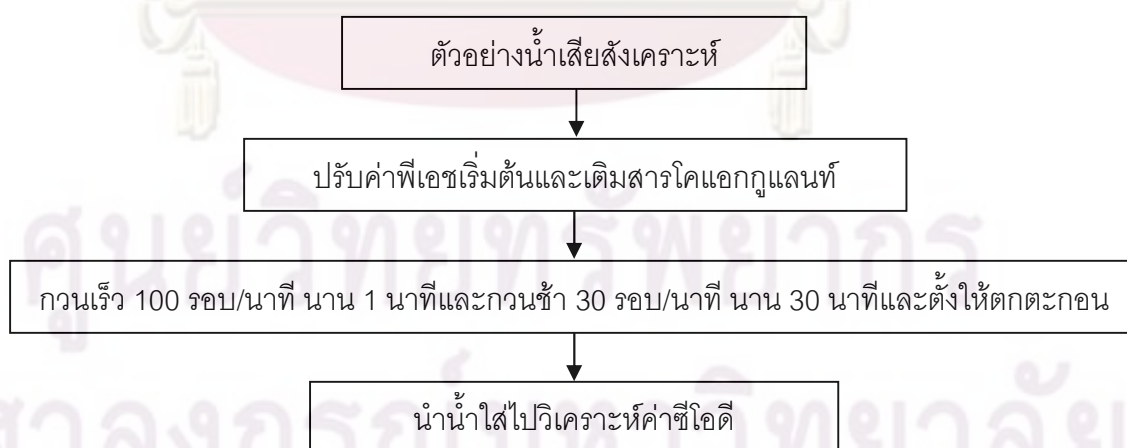
ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการทำลายเสถียรภาพ

การทดลองที่ 2.1 : ศึกษาผลของค่าพีเอชและปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม

นำน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวใส่ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 โดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ ใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 0.4, 0.8, 1 และ 1.2 กรัม/ลิตร ทำการกวนเร็ว 100 รอบ/นาที นาน 1 นาทีและกวนช้า 30 รอบ/นาที นาน 30 นาทีและตั้งให้ตกตะกอน 30 นาที นำน้ำเสียส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-7 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-8

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยวิธีจาร์เทสต์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง	2. 1 ลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าพีเอช	1. 3-12
2. ชนิดโคแอกกูแลนต์	2. สารส้ม เฟอร์ริกคลอไรด์
3. ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์	3. 0.4, 0.8, 1 และ 1.2 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1. ค่าซีไอดี



รูปที่ 3-8 แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ

การทดลองที่ 2.2 : ศึกษาการเติมสารเคมีในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยใช้ชนิดสารเคมีที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 เติมในบริเวณท่อน้ำเสียเข้า ใช้ความสูงของชั้นตัวกลางที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.3 และค่าอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.4 ทำการเก็บตัวอย่างตามเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าซีไอดี ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-8 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-9 ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการศึกษาผลของการเติมสารเคมีในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดสารเคมี	2. จากการทดลองที่ 2.1
3. ความสูงของชั้นตัวกลาง	3. จากการทดลองที่ 1.3
4. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	4. จากการทดลองที่ 1.4
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของสารเคมี	1. 0.4 และ 1 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1. ค่าซีไอดี

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ อัตราการไหลที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.4

เติมสารเคมีที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 ที่ความเข้มข้น 0.4 และ 1 กรัม/ลิตร

นำความเข้มข้นสารเคมีที่เหมาะสม เติมลงในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

เก็บตัวอย่างตามเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

วิเคราะห์ค่าซีไอดี

รูปที่ 3-9 แผนผังการหาความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสม

ศึกษากระบวนการทางไฟฟ้า

การทดลองที่ 3.1 : การศึกษาหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

นำน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวมาศึกษาหาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม, แกรไฟต์-แกรไฟต์ และเหล็ก-เหล็ก ที่มีความยาว 20 ซม. และส่วนที่จมน้ำยาว 15 ซม. ที่ค่าความต่างศักย์ 1, 5, 10 และ 20 โวลต์ โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 3 เซนติเมตร ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-10 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-10

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการศึกษาชนิดขั้วไฟฟ้า

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 2. 0.75 ลิตร 3. 3 เซนติเมตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดขั้วไฟฟ้า 2. ค่าศักย์ไฟฟ้า	1. อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็ก 2. 1, 5, 10 และ 20 โวลต์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง 2. ขนาดฟองก๊าซที่เกิดขึ้น	1. ค่าซีไอดี 2. ภาพถ่ายจากกล้องความเร็วสูง



รูปที่ 3-10 แผนผังการหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

การทดลองที่ 3.2 : ศึกษาหาระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ทำการศึกษาเพื่อหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการทางไฟฟ้า โดยทำการศึกษาที่ 1, 3 และ 5 เซนติเมตร ที่ค่าความต่างศักย์ 1, 5, 10 และ 20 โวลต์ ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-10 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-11

ตารางที่ 3-10 ตัวแปรในการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 2. 0.75 ลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. ชนิดขั้วไฟฟ้า 2. ค่าศักย์ไฟฟ้า 3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 	<ol style="list-style-type: none"> 1. อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็ก 2. 1, 5, 10 และ 20 โวลต์ 3. 1, 3 และ 5 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> 1. คุณภาพของน้ำทิ้ง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าซีไอดี

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 0.75 ลิตร

ใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม แกรไฟต์และเหล็ก

วางขั้วไฟฟ้าห่างกัน 1, 3 และ 5 เซนติเมตร

ให้ค่าความต่างศักย์ที่ 1, 5, 10 และ 20 โวลต์

วิเคราะห์ผลการทดลอง

รูปที่ 3-11 แผนผังการหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ศึกษากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โพรสตาดิกโคอะเลสเซอร์

การทดลองที่ 4.1 : ศึกษาการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างแบบไม่มีตัวกลาง

ประยุกต์ใช้ชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 และใช้ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2 โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างแทนการเติมสารเคมีในอุปกรณ์โอะเลสเซอร์แบบที่ไม่มีตัวกลางถือว่าการทดลองโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าอย่างเดียวแต่เดินระบบผ่านอุปกรณ์โอะเลสเซอร์ที่ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.4 ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-11 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-12

ตารางที่ 3-11 ตัวแปรในการศึกษาการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างในโอะเลสเซอร์แบบไม่มีตัวกลาง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดขั้วไฟฟ้า	2. จากการทดลองที่ 3.1
3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	3. จากการทดลองที่ 3.2
4. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	4. จากการทดลองที่ 1.4
5. ความสูงชั้นตัวกลาง	5. จากการทดลองที่ 1.3
6. ตำแหน่งวางขั้วไฟฟ้า	6. วางด้านล่าง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าศักย์ไฟฟ้า	1. 0.5, 1, 3, 5, 10 และ 20 โวลต์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1. ค่าซีไอดี
2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	2. เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค
3. ชั้นน้ำมันที่เกิดขึ้น	3. ความหนาแน่นน้ำมันด้านบน

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์อัตราการไหลจากการทดลองที่ 1.4 และความสูงชั้นตัวกลางจากการทดลองที่ 1.3

ใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจากการทดลองที่ 3.2

ให้ค่าความต่างศักย์ที่ 0.5, 1, 3, 5, 10 และ 20 โวลต์

วิเคราะห์ผลการทดลอง

รูปที่ 3-12 แผนผังศึกษาการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างในโอะเลสเซอร์แบบไม่มีตัวกลาง

การทดลองที่ 4.2 : ศึกษาตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวกลาง

ศึกษาตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าด้วยการประยุกต์ใช้ชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 และใช้ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2 ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.4 โดยวางขั้วไฟฟ้าทั้งด้านบนและด้านล่างในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่มีตัวกลาง ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-12 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-13

ตารางที่ 3-12 ตัวแปรในการศึกษาดำเนินการวางขั้วไฟฟ้าในโคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดขั้วไฟฟ้า	2. จากการทดลองที่ 3.1
3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	3. จากการทดลองที่ 3.2
4. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	4. จากการทดลองที่ 1.4
5. ความสูงชั้นตัวกลาง	5. จากการทดลองที่ 1.3
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าศักย์ไฟฟ้า	1. 0.5, 1, 3, 5, 10 และ 20 โวลต์
2. ตำแหน่งวางขั้วไฟฟ้า	2. ด้านบนและด้านล่าง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1. ค่าซีไอดี
2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	2. เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค
3. ชั้นน้ำมันที่เกิดขึ้น	3. ความหนาน้ำมันด้านบน

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์อัตราการไหลจากการทดลองที่ 1.4 และความสูงชั้นตัวกลางจากการทดลองที่ 1.3

ใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจากการทดลองที่ 3.2

วางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนและด้านล่าง ค่าความต่างศักย์ที่ 0.5, 1, 3, 5, 10 และ 20 โวลต์

วิเคราะห์ผลการทดลอง

รูปที่ 3-13 แผนผังการหาตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าในโคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง

การปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 5.1 : ศึกษาการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

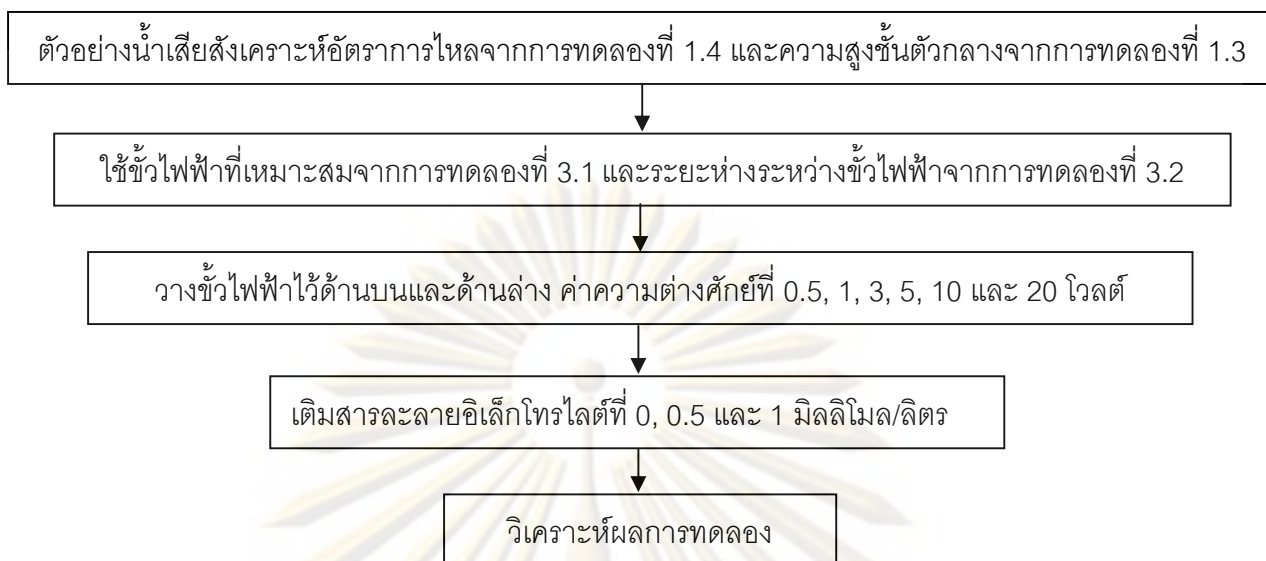
ประยุกต์ใช้ชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 ตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าในโคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลางที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 และใช้ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2 ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.4 เพื่อพิจารณาผลจากการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้น 0, 0.5 และ 1 มิลลิโมล/ลิตร ที่ค่าความต่างศักย์ 0.5, 1, 3, 5, 10 และ 20 โวลต์ โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-13 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-14

ตารางที่ 3-13 ตัวแปรในการศึกษาผลจากการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ความสูงชั้นตัวกลาง 3. อัตราการไหลของน้ำเสีย 4. ชนิดขั้วไฟฟ้า 5. ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 2. จากการทดลองที่ 1.3 3. จากการทดลองที่ 1.4 4. จากการทดลองที่ 3.1 5. จากการทดลองที่ 3.2
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. ตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้า 2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 3. ค่าศักย์ไฟฟ้า 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ด้านบน, ด้านล่าง 2. 0, 0.5 และ 1 มิลลิโมล/ลิตร 3. 0.5, 1, 3, 5, 10 และ 20 โวลต์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> 1. คุณภาพของน้ำทิ้ง 2. ชั้นน้ำมันที่เกิดขึ้น 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าซีไอดี 2. ความหนาน้ำมันด้านบน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



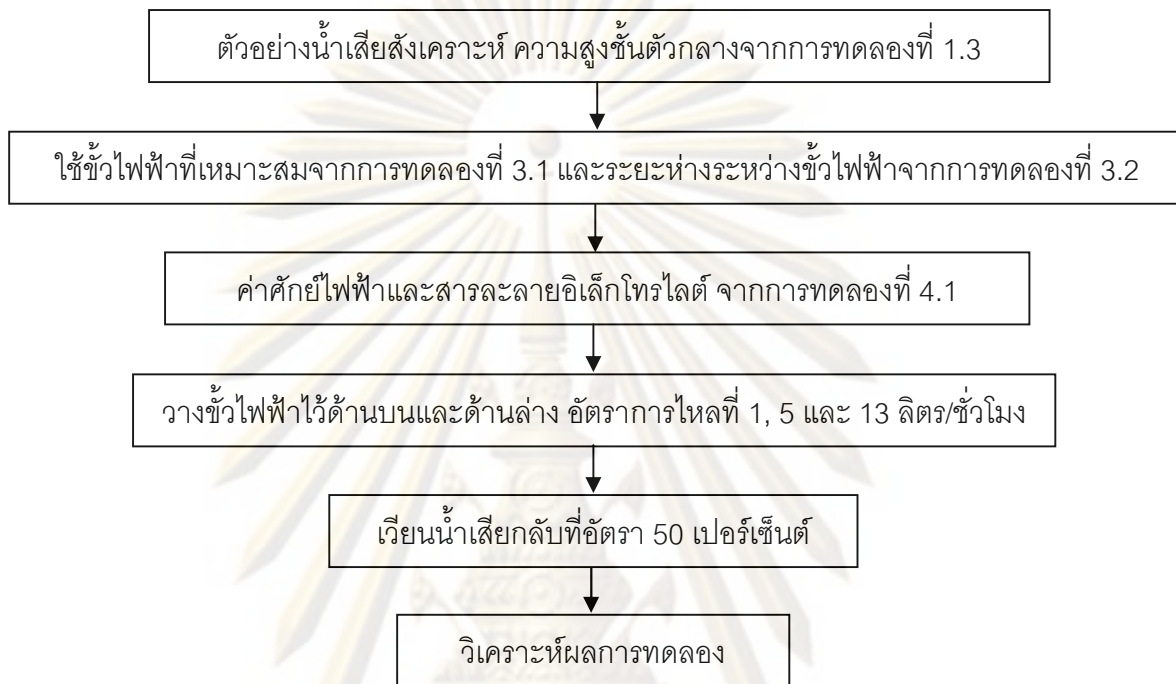
รูปที่ 3-14 แผนผังศึกษาผลจากการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การทดลองที่ 5.2 : ศึกษาผลของการเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์

นำน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวผ่านส่วนของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยใช้ความสูงของชั้นตัวกลางที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.3 รวมทั้งชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 และระยะห่างขั้วไฟฟ้าจากการทดลองที่ 3.2 รวมทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าและปริมาณการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 5.1 มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำเสียกลับที่อัตรา 50 เปอร์เซ็นต์ โดยศึกษาค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเดินระบบนาน 5 ชั่วโมง และตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้า รวมทั้งวัดค่าซีไอดี ความหนาของชั้นน้ำมันที่เกิดขึ้น โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-14 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-15 ตารางที่ 3-14 ตัวแปรในการศึกษาการเวียนกลับของน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความสูงชั้นตัวกลาง	2. จากการทดลองที่ 1.3
3. ชนิดขั้วไฟฟ้า	3. จากการทดลองที่ 3.1
4. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	4. จากการทดลองที่ 3.2
5. ค่าศักย์ไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์	5. จากการทดลองที่ 4.1
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	1. 1, 5 และ 13 ลิตร/ชั่วโมง
2. ตำแหน่งวางขั้วไฟฟ้า	2. ด้านบนและด้านล่าง
3. อัตราเวียนกลับน้ำเสีย	3. 0, 50 เปอร์เซ็นต์

ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1. ค่าซีไอดี
2. ชั้นน้ำมันที่เกิดขึ้น	2. ความหนาของชั้นน้ำมัน



รูปที่ 3-15 แผนผังศึกษาการเวียนกลับของน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์

3.3 สรุปตัวแปรที่ศึกษา

ตารางที่ 3-15 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
-อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	-เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
-ความสูงของชั้นตัวกลาง	-ไม้บรรทัด
-ศักย์ไฟฟ้า	-AC/DC Adapter
-ชนิดขั้วไฟฟ้า	
-ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	
-ตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้า	
-ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์	-วิธีจาร์เทสต์
-อัตราการเวียนกลับของน้ำเสีย	
-คุณภาพของน้ำทิ้ง	-ค่าซีไอดี
-ความหนาของชั้นน้ำมัน	-ไม้บรรทัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

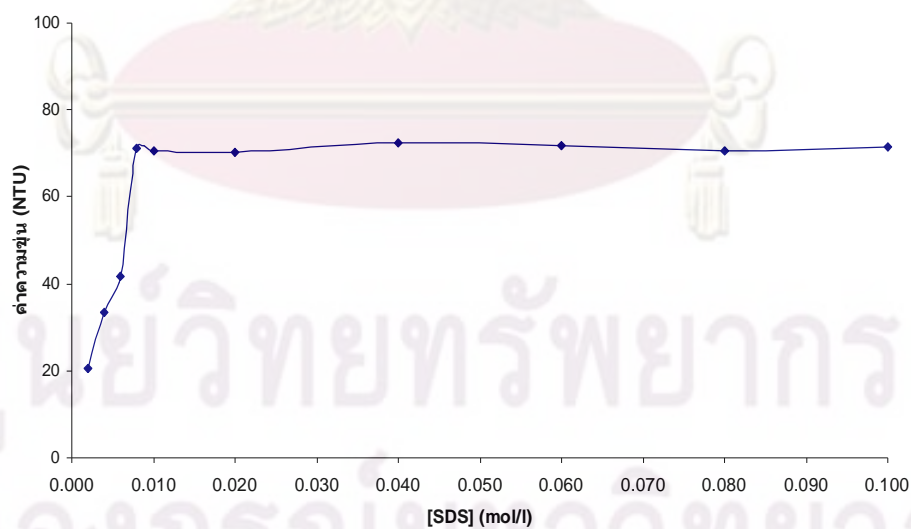
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและการประยุกต์ใช้อุปกรณ์โคเอสเซอร์

4.1.1 การศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่มีสารลดแรงตึงผิวประจุลบ ซึ่งเมื่อผสมกันแล้วจะเกิดเป็นอิมัลชันของน้ำมันที่มีความคงตัว (Stabilized oily emulsion) เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของน้ำมันที่ 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร (Kajitvichyanukul, 2006) ผสมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ที่ 1 CMC (Critical Micelle Concentration) ซึ่งทำให้น้ำเสียมีค่าความขุ่นค่อนข้างคงที่ เป็นผลมาจากค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมันเริ่มคงที่และพื้นที่ผิวของหยดน้ำมันที่เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กดูดซับโมเลกุล SDS จนเต็ม จึงส่งผลให้โมเลกุลของ SDS ที่เหลือจะจับตัวกันเองเกิดเป็นไมเซลล์ซึ่งค่าความขุ่นของน้ำเสียจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในที่นี้ความเข้มข้นของ SDS ดังกล่าวที่ 1 CMC มีค่าเท่ากับ 0.008 โมล/ลิตร แสดงดังรูปที่ 4-1 ซึ่งจะถูกประยุกต์ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสำหรับการทดลองส่วนอื่นๆ



รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นกับปริมาณสารลดแรงตึงผิว

ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) ทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด (Viscosity) ด้วยเครื่องวัดความหนืด (Brookfield Digital Rheometer) ยี่ห้อ Brookfield รุ่น DV-III และทำการวัดขนาดอนุภาคน้ำมันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nikon รุ่น YS2-H ที่กำลังขยาย 40 เท่า ร่วมกับอุปกรณ์วัดขนาดอนุภาคน้ำมัน State micrometer ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-1 โดยขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) จะใช้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, D_{32}) เป็นตัวแทน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) สามารถคำนวณได้จากสมการ 4-1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, D_{32}) สามารถคำนวณได้จากสมการ 4-2 ตามลำดับ ส่วนรูปถ่ายขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4-2

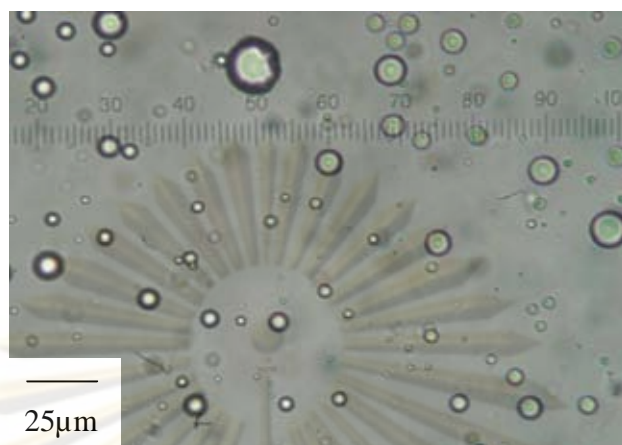
$$D_{mean} = \frac{\sum D_i}{n} \quad (4-1)$$

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

โดยที่ D_i ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน
 n จำนวนอนุภาคน้ำมัน

ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

ค่าซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	13,860	ค่าพีเอชเริ่มต้น	7.4
ค่าความหนืด (Centipoises, cps)	19.7	ค่าความขุ่น (NTU)	71.24
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean} , μm)	10.33	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย แบบซอเทอร์ (D_{32} , μm)	10.82



รูปที่ 4-2 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น

จากขนาดอนุภาคน้ำมันเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์จะเห็นได้ว่าน้ำเสียมีลักษณะเป็นอิมัลชันขั้นสอง (Secondary emulsion) คือ มีขนาดของอนุภาคน้ำมันเล็กกว่า 20 ไมครอน (Aurelle, 1985) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงและถูกกำจัดโดยแรงโน้มถ่วงของโลกได้ยาก ดังนั้น ในส่วนต่อไป จะเป็นการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวสูงดังกล่าวด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการแยกน้ำมันที่มีความคงตัวสูงโดยจะเพิ่มโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กขณะที่ผ่านตัวกลาง เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ (Aurelle, 1985)

4.1.2 ศึกษาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยทำการศึกษาลักษณะของตัวกลาง ศึกษาความสูงของชั้นตัวกลางรวมทั้งหาค่าอัตราการไหลของน้ำเสียและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม

4.1.2.1 ศึกษาลักษณะของตัวกลาง

โดยทั่วไปวัสดุที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์นั้น ควรเลือกวัสดุที่ชอบน้ำมันหรือมีความไม่ชอบน้ำ (Oleophilic or Hydrophobic material) ซึ่งชอบที่จะให้น้ำมันเกาะมากกว่าน้ำ และเกิดการยึดเกาะของน้ำมันที่ผิวของตัวกลางมีค่าสูงจึงสามารถรวมตัวกันได้ดีก่อนที่จะหลุดออกจากชั้นตัวกลาง ทั้งนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง (Critical surface tension, γ_{CG}) และค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ เพื่อใช้อธิบายความไม่ชอบน้ำของตัวกลางที่เป็นลักษณะสำคัญของตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยใช้

ตัวกลางเป็นเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาดังรูปที่ 4-3 และลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 4-2 (กชกร กิ่งกัญญาลัย, 2552)



รูปที่ 4-3 ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

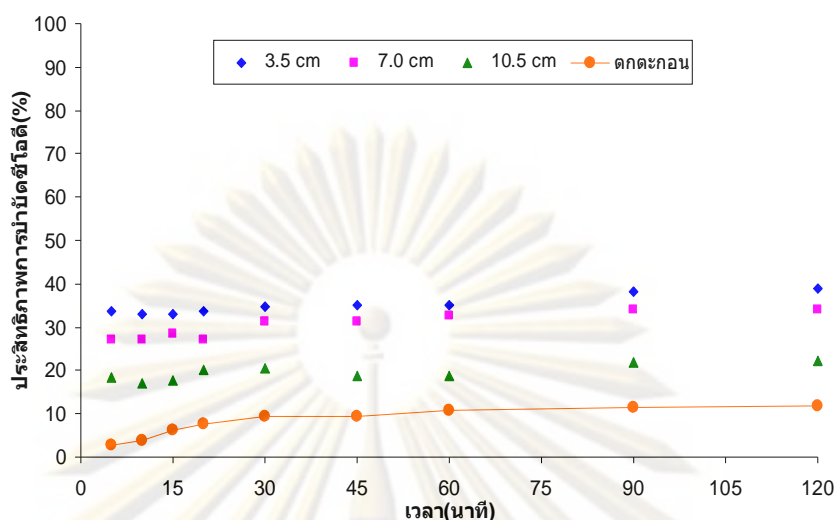
ตารางที่ 4-2 ลักษณะสมบัติของตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสมบัติ	เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา
ชนิดของวัสดุ	โพลีเอสเตอร์ (Polyester base)
ความพรุน (%)	97.23
ความหนาแน่นของตัวกลาง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.72
มุมสัมผัส (องศา)	87.88
ค่าแรงตึงผิววิกฤต (mN/m)	33.98

4.1.2.2 ศึกษาความสูงของชั้นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ทำการศึกษาความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาโดยความสูงที่ทำการศึกษาคือ 3.5, 7 และ 10.5 เซนติเมตร และใช้ค่าอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่ 5 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาความสูงของตัวกลางที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด โดยรูปที่ 4-4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงความสูง 3.5-10.5 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



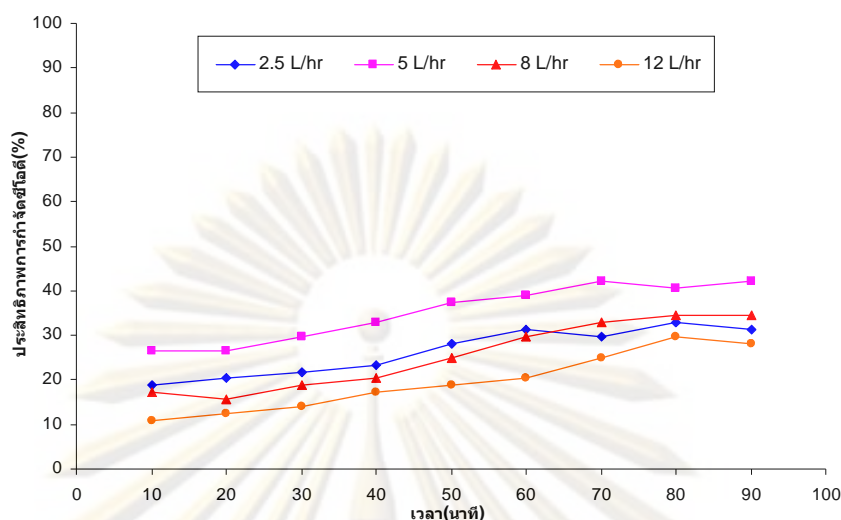
รูปที่ 4-4 ผลของประสิทธิภาพการบำบัดที่ความสูงต่างๆ ของตัวกลาง

จากการทดลองพบว่าความสูงของชั้นตัวกลางที่ 3.5 เซนติเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด โดยมีค่าประมาณ 30-35% นอกจากนี้เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น (ที่ 7 และ 10.5 เซนติเมตร) ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเป็นไปได้อาจว่าความสูงของชั้นตัวกลางที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เกิดการรวมตัวกันแล้วนั้นแตกออกอีกครั้ง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2-13

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความสูงของตัวกลางทั้ง 3 ค่า พบว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าสูงกว่าการตั้งให้ตกตะกอนโดยไม่ผ่านชั้นตัวกลาง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาเป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียที่มีสารลดแรงตึงผิวได้

4.1.2.3 ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำเสีย

รูปที่ 4-5 แสดงผลการศึกษาค่าผลของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อค่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยเลือกใช้ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาที่ชั้นตัวกลางมีความสูง 3.5 เซนติเมตร ซึ่งทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสีย 4 ค่า คือ 2.5, 5, 8 และ 12 ลิตร/ชั่วโมง



รูปที่ 4-5 ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด

จากการทดลองพบว่า ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเดินระบบคือ 5 ลิตร/ชั่วโมง (ความเร็วการไหล 0.91 มิลลิเมตรต่อวินาที) ดังแสดงในรูปที่ 4-5 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 30-40% ทั้งนี้ค่าอัตราการไหลที่ได้สัมพันธ์กับค่าความเร็วในการไหลผ่านตัวกลางที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ (กชกร ก้องกังวาลย์, 2552) (Li และ Gu, 2005) กล่าวคืออยู่ในช่วง 0.83 – 2.18 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากที่อัตราการไหลดังกล่าวส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการชนและการเกาะติดระหว่างตัวกลางและอนุภาคน้ำมันที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราการไหลมีค่าที่ต่ำเกินไปจะทำให้อนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่แบบบราวเนียนและเกิดการชนกันเองน้อยลง ในขณะที่ถ้าอัตราการไหลสูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนภายในตัวกลางซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคน้ำมันจึงเกิดการแตกตัวและหลุดออกจากตัวกลางได้ง่าย โดยที่สภาพการทำงานทั้งสองกล่าวได้ว่าส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Li และ Gu, 2005)

จากการศึกษาข้างต้นเกี่ยวกับลักษณะของน้ำเสียพบว่าเนื่องจากตัวอย่างน้ำเสียนั้นมีความคงตัวสูงจึงควรบำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย 5 ลิตร/ชั่วโมง เนื่องจากเมื่ออนุภาคน้ำมันผ่านตัวกลางแล้วขนาดอนุภาคน้ำมันจะใหญ่ขึ้นและสามารถแยกออกจากน้ำได้ รวมทั้งควรใช้ตัวกลางแบบเส้นใยที่มีความนุ่มสัมผัสน้อยๆ มีความไม่ชอบน้ำ และหนา 3.5 เซนติเมตร แต่เนื่องจากเกิดปัญหาการอุดตันได้ง่ายจึงเป็นข้อจำกัดในการเดินระบบ ดังนั้นจึงสนใจที่จะศึกษากระบวนการอื่นที่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ เช่น การเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน (Destabilization / Coagulation) ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

4.2 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการทำลายเสถียรภาพ

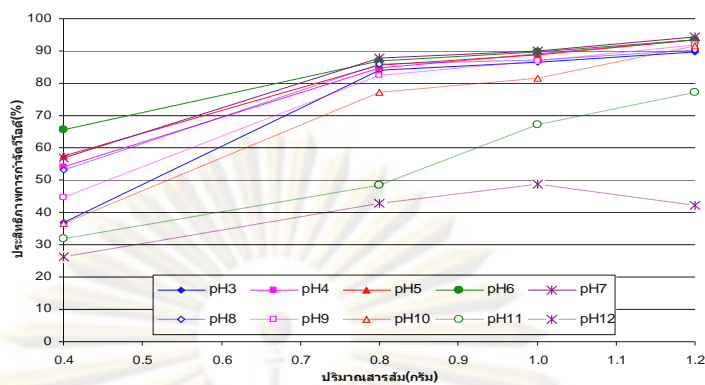
ในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร่วมกับสารลดแรงตึงผิวประจุลบ โดยทำการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 3-12 ปริมาณความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ทำการศึกษในช่วง 0.4-1.2 กรัม/ลิตร และชนิดของโคแอกกูแลนต์ ได้แก่ สารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์

4.2.1 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม

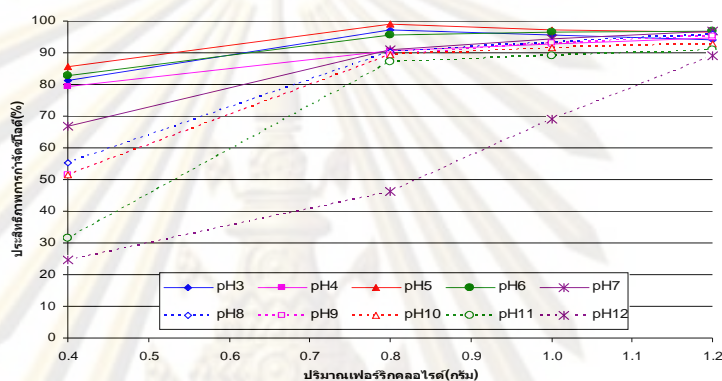
วิธีจาร์เทสต์ถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคน้ำมันคงตัวที่แขวนลอยในน้ำเสีย ประกอบด้วยสองกลไกหลักคือ ส่วนแรกจะเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยการเติมสารเคมีลงในถังกวนเร็วซึ่งจะช่วยให้การกระจายตัวของสารเคมีและการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมัน ส่วนที่สองจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงโดยการกวนช้า ซึ่งตะกอนจะรวมกันเป็นฟล็อกและตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยรูปที่ 4-6 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงพีเอช 3-12 และปริมาณสารเคมี (สารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์) 0.4-1.2 กรัม/ลิตร

ค่าประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากผลของการทำลายเสถียรภาพโดยการเติมโคแอกกูแลนต์ ซึ่งจะต้องอาศัยกลไก 4 แบบ (มันสัน ตันซุลเวตม์, 2542) ดังนี้

- การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) เป็นการเพิ่มจำนวนอ็อกอนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย แต่มีข้อเสียคืออ็อกอนบวจะอยู่ที่ชั้นกระจายเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น จึงไม่สามารถทำลายประจุลบของคอลลอยด์ได้ดีเท่าที่ควร
- กลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า (Charge neutralization) การดูดติดผิวจะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ซึ่งกลไกนี้สามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามได้ (Charge Reversal) เนื่องจากการเติมโคแอกกูแลนต์ที่มากเกินไป
- การห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ (Sweep Floc Coagulation) เป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ทำให้สูญเสียสภาพและตกตะกอนได้ โดยคอลลอยด์เป็นแกนกลางในผลึกดังกล่าว
- การใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer Bridging) เนื่องจากโมเลกุลโพลีเมอร์สามารถเกาะติดกับอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่งจึงอาจเกิดควมมีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle) ดังนั้นการเติมมากเกินไปก็ก่อให้เกิดผลเสียได้



(4-6a)



(4-6b)

รูปที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชและปริมาณสารเคมีต่างๆ

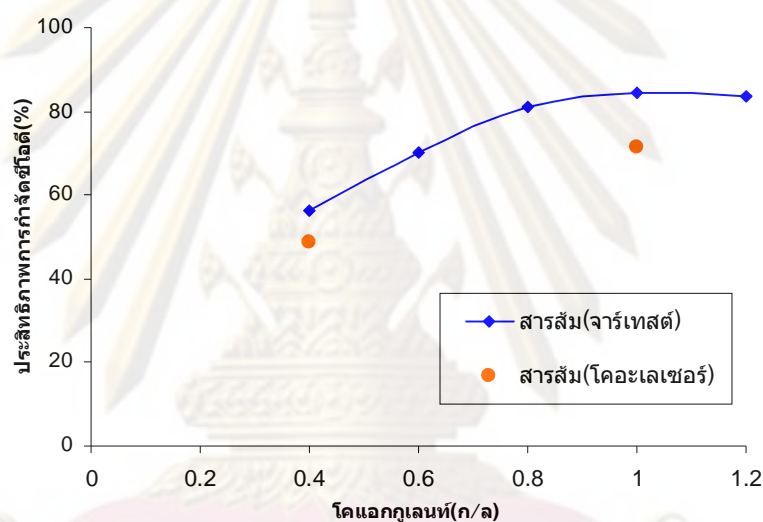
จากรูปที่ 4-6 พบว่าในช่วงท้ายที่ความเข้มข้นของสารเคมีสูงประสิทธิภาพจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารเคมีให้สูงขึ้น แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงประจุของอนุภาคน้ำมันให้เป็นตรงกันข้าม (Charge Reversal) มีผลกระทบค่อนข้างต่ำ แต่จะเกิดการห่อหุ้มอนุภาคน้ำมันไว้ในผลึกสารประกอบ (Sweep Floc Coagulation) ขึ้นเป็นหลัก นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมคือ 1 กรัม/ลิตร โดยสารส้มจะทำงานได้ดีในช่วงพีเอชเริ่มต้น 6-7 (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 85%) ส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์จะทำงานได้ดีในช่วงพีเอชเริ่มต้น 5-6 (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 90%) ดังแสดงในรูปที่ 4-6a และรูปที่ 4-6b ตามลำดับ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมจึงไม่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบำบัด แต่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายทั้งในด้านปริมาณสารเคมีที่เกินความจำเป็น รวมถึงปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นซึ่งต้องมีการจัดการต่อไป

ดังนั้น จึงสนใจที่จะศึกษาการเติมสารเคมีลงในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เพื่อลดเวลาและประหยัดพลังงานในการกวนผสมสารเคมี รวมถึงการสร้างสัมผัสที่อาจเกิดขึ้นภายในตัวกลางโคอะเลสเซอร์ระหว่างทำการเดินระบบ โดยเลือกใช้สารส้ม (Alum) เป็นสารเคมีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน แม้ว่าการเติมสารส้มจะให้ค่าการบำบัดต่ำกว่าการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์

ไรต์ แต่เนื่องจากฟลอคที่เกิดจากสารส้ม (ลักษณะเป็นปุยสีขาว) มีความชอบน้ำมากกว่าฟลอคที่เกิดจากเฟอริกคลอไรด์ซึ่งโดยทั่วไปมีการอัดตัวกันแน่นและมีขนาดใหญ่ (Al-Shamrania และคณะ, 2002) ซึ่งอาจส่งผลต่อการอุดตันภายในชั้นตัวกลางได้มากกว่าในทางปฏิบัติ

4.2.2 ศึกษาการเติมสารเคมีในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยกระบวนการเติมสารเคมีในบริเวณท่อน้ำเสียเข้าก่อนที่จะผ่านเข้าสู่อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อเพิ่มโอกาสในกวนผสมสารเคมี รวมถึงการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน โดยเลือกใช้สารเคมีคือ สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเติมสารส้ม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจากการเติมสารส้มระหว่างวิธีจาร์เทสต์กับการเติมสารส้มในบริเวณท่อน้ำเสียก่อนเข้าสู่อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีจาร์เทสต์สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ประมาณ 60-80% ซึ่งสูงกว่าการบำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ซึ่งสามารถบำบัดได้เพียง 50-70%

นอกจากนี้การเดินระบบโดยใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ร่วมกับการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 0.4 และ 1 กรัม/ลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารส้มที่ความเข้มข้นสูงขึ้น โดยการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 0.4 กรัม/ลิตร (ความเข้มข้นต่ำ) ทำให้ประสิทธิภาพการจับตัวของอนุภาคน้ำมันกับสารส้มเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นฟลอคหรือตะกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และลอยสู่อ่างน้ำอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นไปตามสมการของสโตก (Stoke 's law) ที่ความเร็วสุดท้ายในการ

ลอยตัวของอนุภาคแปรผันตามขนาดอนุภาคยกกำลังสอง ในขณะที่การเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร (ความเข้มข้นสูง)เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มจนเกินปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ในน้ำเสีย จึงเกิดการแย่งกันจับอนุภาคน้ำมัน รวมทั้งเกิดการจับตัวกันเองของสารส้มซึ่งเป็นกลไกแบบ Sweep Flocculation (Al-Shamrania และคณะ, 2002) นอกจากนี้เมื่ออนุภาคน้ำมันจับตัวกับสารส้มจะเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่และติดค้างอยู่ที่ตัวกลางทำให้เกิดปัญหาการอุดตันภายในชั้นตัวกลาง (Media clogging) ได้อีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 4-8



(4-8a)



(4-8b)

รูปที่ 4-8 ตะกอนจากการเติมสารส้มที่ความเข้มข้นต่ำและสูงตามลำดับ

ดังนั้น ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของการเติมสารส้มในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ คือ 0.4 กรัม/ลิตร เนื่องจากทำให้ขนาดของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดตะกอนขึ้นที่ตัวกลางในปริมาณต่ำ รวมถึงไม่เกิดผลเสียจากการกรองที่ทำให้มีการรวมของอนุภาคน้ำมันลดลงและเกิดการอุดตันขึ้นที่ตัวกลางได้ (ประจักษ์ ศาสตร์เวช, 2551)

ตารางที่ 4-3 ตารางสรุปข้อดี-ข้อเสีย

	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีจาร์เทสต์	<ul style="list-style-type: none"> ● มีการประยุกต์ใช้งานทั่วไป ● สามารถออกแบบและเดินระบบในขั้นต้นได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> ● เวลาทำลายเสียรภาพและบำบัดนาน ● พลังงานกวนผสมที่สูง
โคอะเลสเซอร์	<ul style="list-style-type: none"> ● ประหยัดพลังงาน เวลา และค่าใช้จ่ายในการบำบัด ● มีแนวโน้มในการประยุกต์ร่วมกับกระบวนการบำบัดชนิดอื่นๆ 	<ul style="list-style-type: none"> ● ประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่ำกว่า ● เกิดการอุดตันของตัวกลาง ● ข้อจำกัดในด้านการเติมสารเคมี

เมื่อพิจารณาผลคูณของค่าความเร็วแกวเดียนท์และระยะเวลาสัมผัส (G.T) ซึ่งเป็นค่าความเร็วแกวเดียนท์สำหรับการไหลผ่านตัวกลาง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-3

$$G = \sqrt{(\rho g Q H / \epsilon A L \mu)} \quad (4-3)$$

และความเร็วแกวเดียนท์ของการไหลในท่อคำนวณได้จากสมการที่ 4-4 (Ladislav, 2000) ดังนี้

$$G = \sqrt{(\rho g Q H / A L \mu)} \quad (4-4)$$

โดยที่

ρ	ความหนาแน่นของน้ำ
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s ²)
Q	อัตราการไหลของน้ำเสีย
H	ความดันลด
ϵ	ความพรุนของตัวกลาง
A	พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์
L	ความยาว
μ	ความหนืดพลศาสตร์ของน้ำ

ความเร็วการไหลผ่านท่อขนาดเล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-5 (Ladislav, 2000) ดังนี้

$$G = \sqrt{(32v^2 / d^2)} \quad (4-5)$$

โดยที่

v	ความเร็วการไหลของน้ำ
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

พบว่า เมื่อพิจารณากระบวนการโคแอกกูเลชัน จะเห็นได้ว่าการเติมสารส้มในท่อน้ำเสียเข้าจะให้ค่า G สูงเนื่องจากท่อน้ำเสียเข้ามีขนาดค่อนข้างเล็กจึงมีความเร็วในการไหลสูงรวมทั้งระยะเวลาในการสัมผัสของสารส้มกับน้ำเสยค่อนข้างนาน ในทางทฤษฎี ค่า G และ T จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันในกระบวนการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสยทางเคมีทั่วไปควรมีค่า 700-1000 S⁻¹ และ 30-60 วินาที ตามลำดับ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) โดยในการทดลองนี้เลือกการเติมสารส้มในท่อน้ำเสียเข้าที่มีขนาด 0.35 เซนติเมตร ให้ค่าความเร็วการไหลค่อนข้างสูง และให้ค่า G เท่ากับ 233.32 s⁻¹ ซึ่งน้อยกว่าที่ควรจะเป็นแต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีจารีตปฏิบัติดังในรูปที่ 4-7 พบว่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แสดงว่าอุปกรณ์โคเอสเซอร์นั้น สามารถประยุกต์ใช้ในการกวนเร็วและกวนช้าได้ เนื่องจากมีระยะเวลาในการสัมผัสนาน ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการเติมสารส้มในท่อน้ำเสียเข้ามีค่าสูง (กชกร ก้องกังวาลย์, 2552)

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างวิธีจาร์เทสต์กับกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์นั้นมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้พลังงานที่น้อยกว่าส่งผลให้ค่าไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าวิธีจาร์เทสต์ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับค่าพลังงานและค่าไฟฟ้าจึงสูงกว่า ดังนั้นจึงควรเลือกใช้กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ต่ำกว่าก็ตาม

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์

น้ำเสียปริมาตร 0.75L ใช้ขั้ว Al กว้าง 5cm ยาว 15cm หนา 2mm วางห่างกัน 3cm ศักย์ไฟฟ้า 3V กระแสไฟฟ้า 0.06A เวลา 2hr

- หากระแสไฟฟ้าหน่วยฟาราเดย์

$$\text{ปริมาณไฟฟ้า} = I(\text{แอมแปร์}) * t(\text{วินาที})$$

$$= 0.06 (120*60) = 432 \text{ คุลอมป์/โมล} = 432/96500 = 0.0045 \text{ ฟาราเดย์}$$

$$\text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า } C = I/A$$

$$= (0.06*1000)/(3.4*5*15) = 0.235 \text{ mA/cm}^3$$

$$\text{พลังงานที่ใช้} = Vit/1000v$$

$$= (3(0.06)(120/60))/(1000*0.75/1000) = 0.48 \text{ KW-hr/m}^3$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = \text{พลังงานที่ใช้} * \text{ค่ายูนิตต่อหน่วย} * \text{ภาษีร้อยละ 7}$$

$$= 0.48 * 1.8047 * 1.07 = 0.93 \text{ บาท/m}^3$$

- ราคาขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม 155 บาท/kg (น้ำหนักขั้วหายไป 0.0889g/1L = 88.9 g/m³)

$$\text{ดังนั้น ค่าขั้วไฟฟ้า} = 88.9 * 0.155 = 13.78 \text{ บาท/m}^3$$

- ค่าใช้จ่ายทั้งหมด = 0.93 + 13.78 = 14.71 บาท

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายของวิธีจาร์เทสต์

เติมสารส้ม 0.4 g/L ปั่นกวนนาน 31min ศักย์ไฟฟ้า 220V กระแสไฟฟ้า 0.35A

- ราคาสารเคมี = 0.4g * 1.3บาท/g

$$= 0.52 \text{ บาท}$$

- พลังงานที่ใช้ = Vit/1000v

$$= (220(0.35)(31/60))/(1000*1/1000) = 39.78 \text{ KW-hr/m}^3$$

- ค่าไฟฟ้า = พลังงานที่ใช้ * ค่ายูนิตต่อหน่วย * ภาษีร้อยละ 7

$$= 39.78 * 1.8047 * 1.07 = 76.79 \text{ บาท}$$

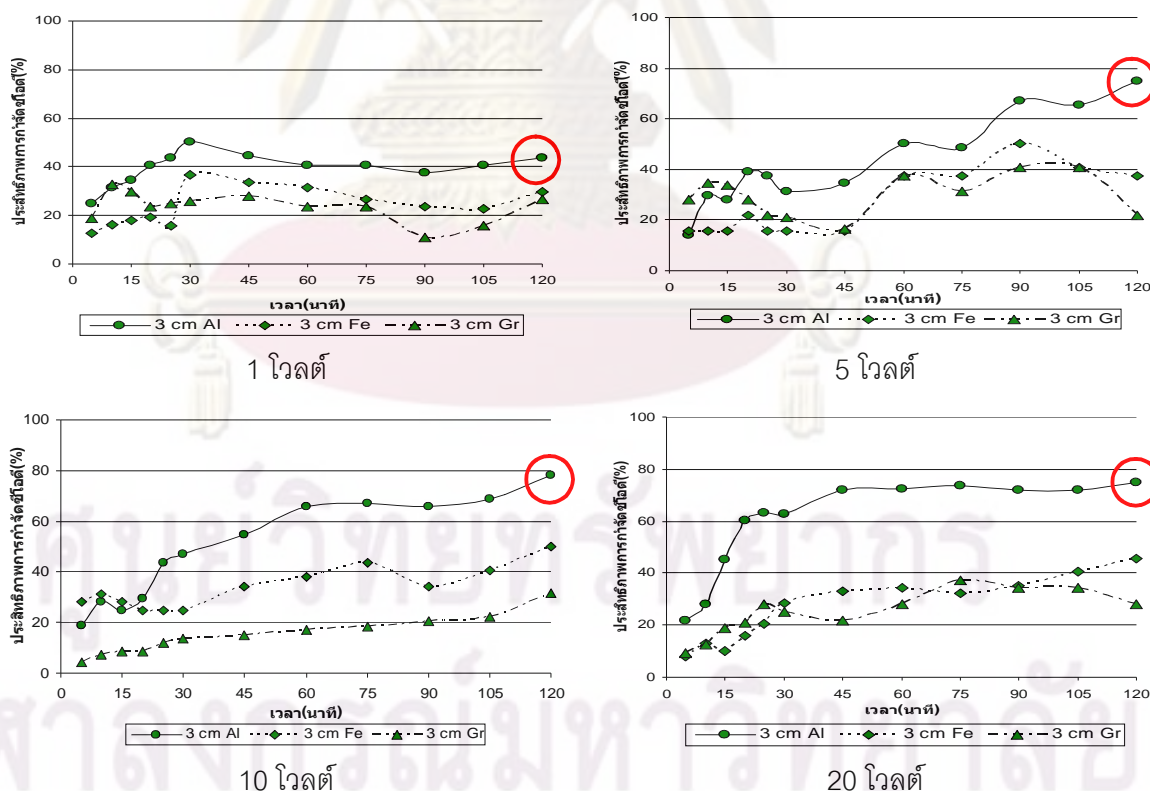
- ค่าใช้จ่ายทั้งหมด = 0.52 + 76.79 = 77.31 บาท

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเติมสารเคมีมีความจำเป็นต่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน แต่ก็ยังมีปัจจัยจำกัดในด้านการควบคุมดูแลในเรื่องการเติมสารเคมีซึ่งยุ่งยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบจริง ดังนั้นในส่วนต่อไป จึงสนใจที่จะศึกษาการใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-coagulation) เพื่อทดแทนการเติมสารเคมี เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของชนิดขั้วไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า สำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ต่อไป

4.3 การศึกษากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

4.3.1 ศึกษาหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาหาชนิดของขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าแบบทีละเท (Batch process) โดยทำการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม, แกรไฟต์-แกรไฟต์ และเหล็ก-เหล็ก ที่ค่าความต่างศักย์ 1-20 โวลต์ โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-9



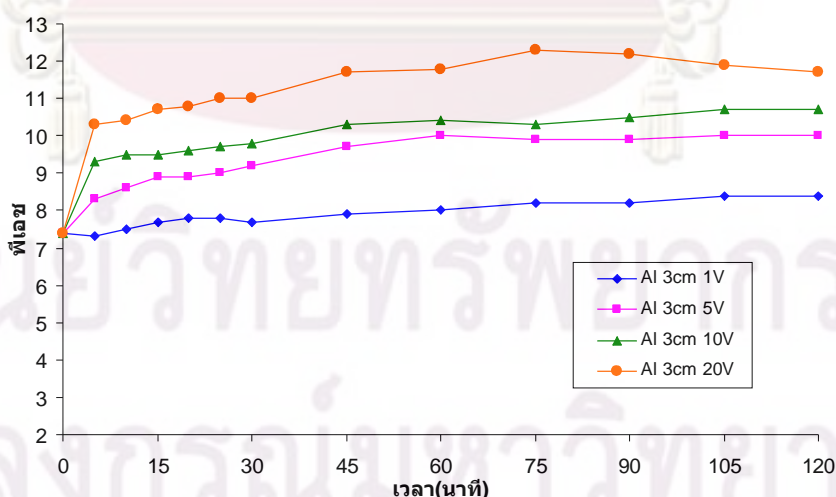
รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพการบำบัดของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ระยะ 3 เซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

จากการทดลองในขั้นต้นพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นสำหรับทุกๆ การทดลอง โดยปรากฏการณ์ รวมถึงผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นสามารถสรุปในรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- เนื่องจากขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างสูงเมื่ออยู่ในน้ำ (วรรณ วัฒนชัย, 2546) ปฏิกิริยาอเล็กโตรลิซิสแสดงดังตารางที่ 4-4 โดยที่ขั้วแอโนดอะลูมิเนียมจะเกิดการกัดกร่อนและละลายน้ำออกมาในรูปไอออน Al^{3+} ส่วนที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4-10 ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเกิดผลึกไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมที่ไม่ละลายน้ำที่สัมพันธ์กับกลไกการสร้างผลึกเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาจับ (Sweep Coagulation) เพื่อให้เกิดเป็นฟล็อกและสามารถถูกกำจัดได้โดยกระบวนการทำให้ลอยตัว (Flotation process) ด้วยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดจึงทำให้สามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้มากที่สุด โดยมีช่วงการบำบัดอยู่ที่ 50-70%

ตารางที่ 4-4 ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม

ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม	ปฏิกิริยาอเล็กโตรลิซิส
Oxidation (ขั้วแอโนด)	$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
Reduction (ขั้วแคโทด)	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
Redox reaction	$2Al + 3H_2O \rightarrow 3H_2 + 2Al^{3+} + 6OH^-$

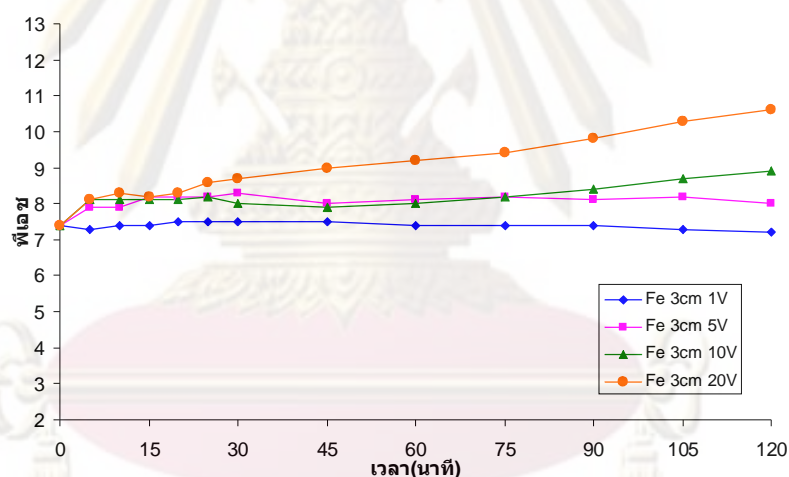


รูปที่ 4-10 พีเอชหลังทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร

- การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทดคล้ายกับการใช้ขั้วอะลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 4-5 คือ ที่ขั้วแอโนดจะเกิดการกัดกร่อนและละลายน้ำออกมาในรูปไอออน ส่วนที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4-11 แต่พบว่าสามารถลดค่าซีไอดีของน้ำเสียได้น้อยกว่าซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความว่องไวในการทำปฏิกิริยาซึ่งแปรผกผันกับมวลโมเลกุล (มวลโมเลกุล: Al = 26.98 และ Fe = 55.85 กรัมต่อโมล) โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ระหว่าง 30-50%

ตารางที่ 4-5 ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าเหล็ก

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

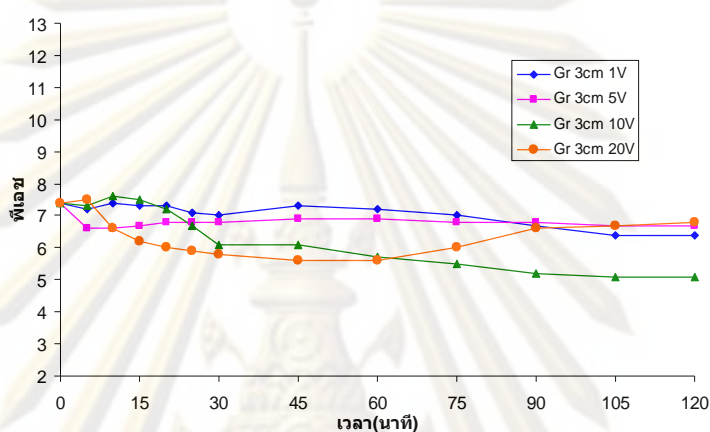


รูปที่ 4-11 พีเอชหลังทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร

- การใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าพบว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสแสดงดังตารางที่ 4-6 โดยที่ขั้วแอโนดจะไม่เกิดการแตกตัวเนื่องจากมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้น้อยจึงไม่มีไอออนของโลหะช่วยในการรวมตะกอนแต่จะเกิดฟองก๊าซออกซิเจนทดแทน และขั้วแคโทดจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งฟองก๊าซทั้งสองชนิดจะช่วยในกระบวนการลอยตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-Flotation) ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำลดลงแสดงดังรูปที่ 4-12 ดังนั้นการเลือกใช้ขั้วแกรไฟต์จึงสามารถลดค่าซีไอดีของน้ำเสียได้น้อยที่สุด (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 20 - 40%)

ตารางที่ 4-6 ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์

ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์	ปฏิกิริยาอเล็กโตรลิสซิส
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	$4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{OH}^-$

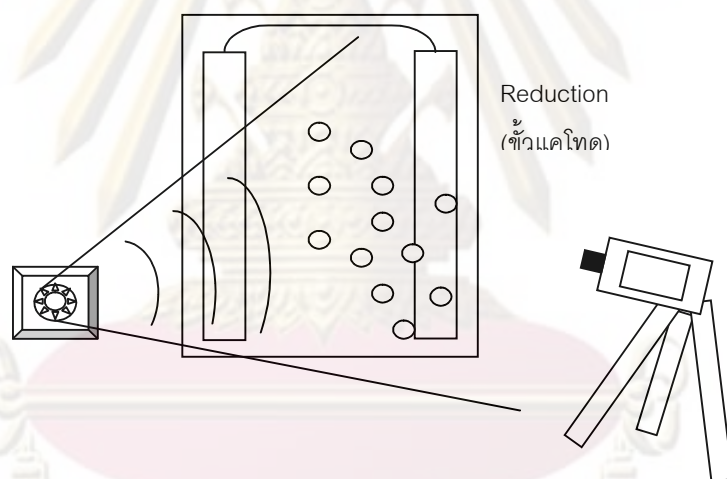


รูปที่ 4-12 พืเชษหลังทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้น (Interfacial area, a) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการทำให้ลอย (Flotation) โดยในกรณีของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมและขั้วเหล็กนั้น เป็นกระบวนการที่มีการนำสารเคมีในกลุ่มดีมัลซิฟายเออร์หรือสารโคแอกกูแลนต์และสารลดแรงตึงผิวมาใช้ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยเพื่อปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด โดยการเติมสารเคมีเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันในกระบวนการทำให้ลอยซึ่งส่งผลทำให้ขนาดของหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดของหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นสิ่งสำคัญตามสมการของสโตก โดยการใส่สารเคมีดังกล่าวจะไปทำให้เกิดการลดลงของแรงผลักดันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากประจุชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของหยดน้ำมัน ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการขัดขวางการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน รวมทั้งน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันมีการรวมตัวของหยดน้ำมันจะเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นกล่าวได้ว่าประจุของ Al^{3+} และ Fe^{3+} ช่วยในการปรับปรุงประจุพื้นผิวบนอนุภาคของหยดน้ำมันและพื้นผิวระหว่างหยดน้ำมันและฟองอากาศ โดยที่ประจุตรงข้ามกับพื้นผิวของหยดน้ำมันจะไปเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดสภาพเป็นกลางทางประจุไฟฟ้า (Neutralization) บนพื้นผิวของหยดน้ำมันและสามารถเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มฟล็อกของหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ฟองอากาศ

เคลื่อนที่เข้าใกล้จึงชนกันได้ง่ายและถูกจับด้วยฟองอากาศทำให้เคลื่อนที่ลอยตัวได้เร็วยิ่งขึ้น (ซูลีกร ชูกลิ่น, 2547) ซึ่งเมื่อขั้วไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสจะเกิดฟองก๊าซขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดซึ่งช่วยในการดักจับอนุภาคดังกล่าวออกจากน้ำเสีย โดยกระบวนการดังกล่าวสัมพันธ์กับกระบวนการโมดิฟายอินดิวิชแอร์โฟลเทชัน (Modified Induced Air Floatation, MIAF) ซึ่งรวมกระบวนการทำให้ลอยแบบเติมอากาศ (Induce Air Flotation, IAF) และกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เข้าด้วยกัน ในขณะที่จะเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยการทำให้ลอยตัวเท่านั้นในกรณีของขั้วไฟฟ้าแบบแกรไฟต์

การวัดขนาดฟองอากาศที่อัตราการไหลของอากาศ (Q_g) ใดๆ สามารถทำได้โดยใช้ทำการเก็บและวิเคราะห์ภาพถ่ายของฟองอากาศเพื่อนำมาหาค่าขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย (d_{avg}) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลของตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameter) ด้วยกล้องความเร็วสูงความเร็ว 500 ภาพต่อวินาที (Basler camera) และทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยชุดคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ภาพถ่าย (Photron FASTCAM Viewer) ได้ค่าขนาดของฟองก๊าซ (D_b) แสดงดังรูปที่ 4-13 และตารางที่ 4-7



รูปที่ 4-13 รูปจำลองอุปกรณ์ถ่ายภาพฟองก๊าซ

ตารางที่ 4-7 ขนาดของฟองก๊าซของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ความต่างศักย์ต่างๆ

ชนิดขั้วไฟฟ้า	ขนาดฟองก๊าซ (มิลลิเมตร)		
	ที่ 7 โวลต์	ที่ 14 โวลต์	ที่ 21 โวลต์
Al 3cm	0.24	0.24	0.24
Fe 3cm	0.30	0.28	0.24
Gr 3cm	0.23	0.23	0.22

จากตารางที่ 4-7 ขนาดของฟองก๊าซที่เกิดจากขั้วไฟฟ้า (D_B) ที่ศักย์ไฟฟ้า 7, 14 และ 21 โวลต์ ตามลำดับ พบว่าขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีขนาดของฟองก๊าซที่เท่ากัน (0.24 มิลลิเมตร) ในทุกศักย์ไฟฟ้า แต่เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าเหล็กและแกรไฟต์แล้วพบว่าขนาดของฟองก๊าซที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าเหล็กมีแนวโน้มลดลง (0.30-0.24 มิลลิเมตร) โดยมีขนาดของฟองก๊าซใหญ่กว่าที่เกิดจากขั้วอะลูมิเนียม ส่วนขนาดของฟองก๊าซที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีแนวโน้มลดลง (0.23-0.22 มิลลิเมตร) รวมทั้งขนาดของฟองก๊าซยังเล็กกว่าที่เกิดจากขั้วอะลูมิเนียมด้วย อย่างไรก็ตาม เราอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดนั้นมีขนาดเล็กมาก (0.22 – 0.3 มิลลิเมตร) เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากอุปกรณ์สร้างฟองก๊าซชนิดต่างๆ เช่น Rigid diffuser หรือ Flexible membrane diffuser ซึ่งมักจะมีขนาดฟองก๊าซที่ใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร นอกจากนี้ค่าที่ได้ดังกล่าวยังสอดคล้องกับขนาดฟองอากาศที่ได้จากกระบวนการทำให้ลอยตัวแบบอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation, DAF) อีกด้วย

ทั้งนี้ค่าอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) สามารถหาได้โดยก๊าซที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าไปดันฟิล์มของฟองสบู่ให้เคลื่อนที่ไปด้านบนและทำการจับเวลาว่าใน 1 นาที ฟิล์มสบู่สามารถเคลื่อนที่ไปได้กี่มิลลิเมตร และเมื่อนำไปหารด้วยปริมาตรของฟองอากาศ (V_B) จะได้เป็นค่าความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) คือ จำนวนฟองที่เกิดขึ้นในเวลา 1 นาที และเมื่อนำ f_B ไปคูณกับค่าความสูงของของเหลว (H_L) และหารด้วยความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งหาได้จากการใช้กล้องถ่ายภาพฟองอากาศที่ลอยตัวขึ้นในถังปฏิกรณ์เพื่อวิเคราะห์หาระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้น (ΔD) ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ หรือ ณ ช่วงเวลาการเก็บภาพของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (t_{frame}) จะได้ออกมาเป็นค่าจำนวนฟองอากาศ (N_B) ซึ่งถ้าคูณกับพื้นที่ผิวของฟองอากาศ (S_B) และหารด้วยปริมาตรของถังปฏิกรณ์ทั้งหมด (V_{Total}) แล้วก็จะได้เป็นค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a)

ซึ่งค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area, a) ถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยรวม โดยที่ถ้าค่า a สูงขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมันนั่นคือทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นด้วย (Painmanakul และคณะ, 2005) โดย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-6

$$a = N_B \times (S_B / V_{Total}) \quad (4-6)$$

$$= f_B \times (H_L / U_B) \times (S_B / V_{Total})$$

โดยที่

N_B จำนวนฟองอากาศ ($f_B \times (H_L / U_B)$)

S_B พื้นที่ผิวของฟองอากาศ (πD_B^2 , ตารางเมตร)

V_{Total} ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ทั้งหมด ($\pi r^2 h$, ลูกบาศก์เมตร)

- f_B ความถี่ในการเกิดฟอง (Q_g/V_B , วินาที⁻¹)
 H_L ความสูงของของเหลว (เมตร)
 U_B ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ($\Delta D/t_{frame}$, เมตร/วินาที)

ตารางที่ 4-8 ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ความต่างศักย์ต่างๆ

ชนิดขั้วไฟฟ้า	ตัวแปร	ที่ 7 โวลต์	ที่ 14 โวลต์	ที่ 21 โวลต์
Al 3cm	Q_g (มิลลิลิตร/นาที่)	6.5	10.3	17.1
	a (เมตร ⁻¹)	15.86	29.96	55.43
Fe 3cm	Q_g (มิลลิลิตร/นาที่)	2.3	4.2	7.1
	a (เมตร ⁻¹)	2.11	5.74	13.57
Gr 3cm	Q_g (มิลลิลิตร/นาที่)	1.2	2.2	4.0
	a (เมตร ⁻¹)	0.92	2.76	7.69

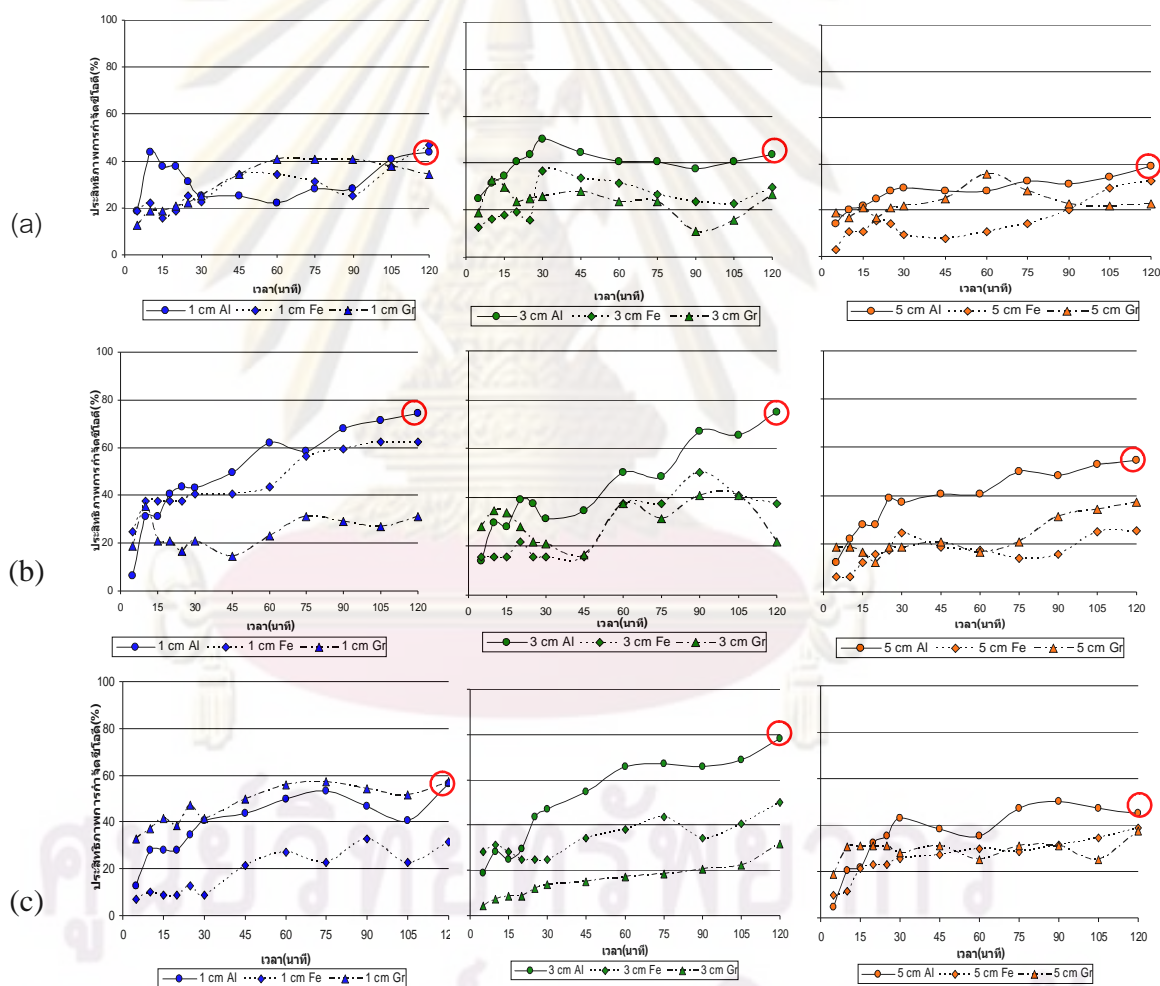
จากตารางที่ 4-8 การวางขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดไว้ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ของ ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ พบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นนั้นจะทำให้เกิดฟองก๊าซจำนวนมากขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด (ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็ก) และเกิดขึ้นที่ทั้งสองขั้วไฟฟ้าในกรณีของขั้วแกรไฟต์จึงส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมจะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่สูงที่สุด (15.86-55.43 เมตร⁻¹) รองลงมาคือขั้วไฟฟ้าเหล็ก (2.11-13.57 เมตร⁻¹) และน้อยที่สุดคือขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ (0.92-7.69 เมตร⁻¹) โดยตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อค่า a ที่แตกต่างกันในการทดลองนี้ กล่าวคือค่าอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ที่มีค่าสูงมากในกรณีของขั้วอะลูมิเนียม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความถี่ในการเกิดฟองก๊าซ รวมถึงจำนวนของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบในที่สุด

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในตารางที่ 4-8 กับค่าประสิทธิภาพการบำบัดในรูปที่ 4-9 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเป็นการยืนยันว่าขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าเหล็กและขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้นั้นพบว่ามีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าโดยทั่วไปที่ได้จากกระบวนการทำให้ลอยแบบอากาศละลาย (DAF) ซึ่งมีค่าสูงกว่า 95% (Rachu, 2005) โดยอัตราการไหลของก๊าซที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อจำนวนฟองก๊าซและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศสำหรับการดักจับอนุภาคน้ำมันน่าจะเป็นสาเหตุหลักต่อผลการ

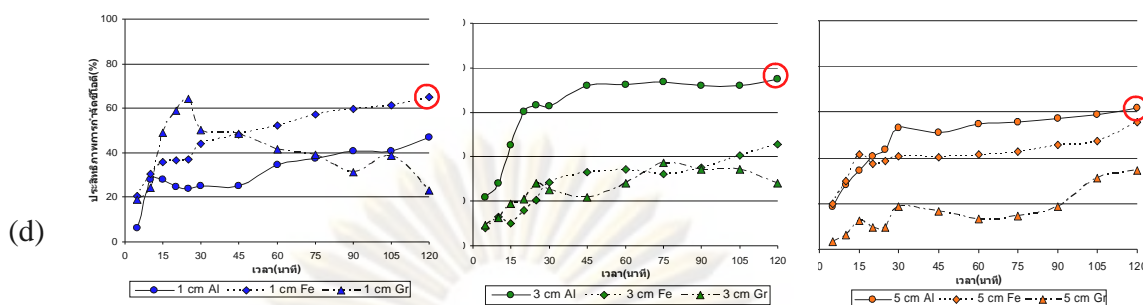
ทดลองดังกล่าว นอกจากนี้เพื่อพิจารณาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากลักษณะการวางตัวของขั้วไฟฟ้า ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นในส่วนต่อไปจะทำการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบแบบต่อเนื่องต่อไป

4.3.2 ศึกษาหาระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียบนเบื่อน้ำมันปาล์มร่วมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าโดยเดินระบบแบบทีละเท (Batch process) และทำการศึกษาที่ 1, 3 และ 5 เซนติเมตร ที่ค่าความต่างศักย์ 1-20 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4-14



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ 1, 5, 10 และ 20 โวลต์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4-14a – 4.14d พบว่าสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ **1) ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (Reactive phase)** จะมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มตามเวลาอย่างรวดเร็วเนื่องจากในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยามีความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันสูง ประกอบกับฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยดักจับให้อนุภาคน้ำมันสามารถลอยขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นจะเกิด **2) ส่วนคงที่ (Steady phase)** เมื่อระยะเวลาการบำบัดมากกว่าโดยเฉลี่ยประมาณ 30 นาที ซึ่งจะทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากการลดลงของจำนวนอนุภาคน้ำมันซึ่งทำให้ปริมาณการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อการบำบัดซีโอดี (Ichikawa และคณะ, 2004) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างในการวางขั้วไฟฟ้าต่อค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบ (สนามไฟฟ้า = ศักย์ไฟฟ้า/ระยะห่างระหว่างขั้ว) จะพบว่าเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลง (Ichikawa และคณะ, 2004) รวมทั้งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพในการบำบัดซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- การวางขั้วไฟฟ้าที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร จะเกิดฟองก๊าซจำนวนมากจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area, a) สูงทำให้สามารถดักจับอนุภาคน้ำมันได้มากขึ้น (Painmanakul และคณะ, 2008) เห็นได้จากค่าประสิทธิภาพการบำบัดกรณีที่ใช้ขั้วแกรไฟต์ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นเมื่อเทียบกับสองขั้วไฟฟ้าที่เหลือเนื่องจากการเกิดของฟองก๊าซทั้งจากขั้วแคโทดและแอโนด
- ส่วนขั้วไฟฟ้าเหล็กเนื่องจากอิออน Fe^{3+} ที่เกิดขึ้นมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า Al^{3+} ถือว่าเป็นข้อจำกัดในด้านการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของประจุ Fe^{3+} ดังนั้นขั้วไฟฟ้าเหล็กจึงให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร สูงที่สุด เนื่องจากระบบได้ข้อดีทั้งจากการมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงและความเข้มข้นของไอออน Fe^{3+} ในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันที่มีความคงตัวในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้พบว่าขั้วแกรไฟต์มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะคือเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

- การวางขั้วไฟฟ้าที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร จะเกิดฟองก๊าซขึ้นในปริมาณที่พอดีสำหรับการดักจับอนุภาคน้ำมัน โดยพบว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุดโดยเฉพาะที่เวลาการบำบัดสูงๆ แม้ว่าที่ระยะห่างดังกล่าวมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่าและมีเพียงก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดเท่านั้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการละลายของ Al^{3+} ที่ช่วยในการทำลายเสถียรภาพ การรวมตะกอน และถูกแยกออกด้วยการทำให้ลอยตัว (ดังที่กล่าวถึงข้างต้น)
- สภาพความปั่นป่วน (Turbulent condition) ภายในเฟสน้ำเสียจากจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ค่าสนามไฟฟ้าสูงๆนั้น (ระยะห่าง 1 เซนติเมตร) ส่งผลเสียต่อเกาะติดระหว่างอนุภาคน้ำมันและฟองก๊าซ ดังนั้น ระยะห่าง 3 เซนติเมตร จึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในกรณีของขั้วอะลูมิเนียมเนื่องจากต้องการพื้นที่สำหรับการทำลายเสถียรภาพจึงควรวางห่างกัน 3 เซนติเมตร เพราะถ้าวางแค่ 1 เซนติเมตร พื้นที่ทำปฏิกิริยาจะน้อยไปไม่เพียงพอ
- การวางขั้วไฟฟ้าที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร จะให้ค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำเกินไปซึ่งไม่เหมาะสมในด้านการกวนผสมหรือสร้างสัมผัสอย่างทั่วถึงภายในระบบ นอกจากนี้ฟองก๊าซที่เกิดจากขั้วไฟฟ้ามีปริมาณน้อยและความเร็วในการลอยขึ้นต่ำด้วยส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด จึงไม่เหมาะสมกับการวางขั้วไฟฟ้า

ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุด โดยสรุปจากการทดลองนี้พบว่าควรเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด ดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทางไฟฟ้า

ชนิดขั้วไฟฟ้า	ระยะห่างขั้วไฟฟ้า	ศักย์ไฟฟ้า	ประสิทธิภาพการบำบัด
ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม	3 เซนติเมตร	20 โวลต์	60-70%
ขั้วไฟฟ้าเหล็ก	1 เซนติเมตร	20 โวลต์	40-60%
ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์	1 เซนติเมตร	20 โวลต์	40-60%

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุด พบว่าควรเลือกใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กไว้ที่ระยะห่าง 3 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยที่ค่าดังกล่าวจะนำมาใช้เพื่อทำการทดลองต่อไปเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าศักย์ไฟฟ้าจากการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ส่วนขั้วแกรไฟต์

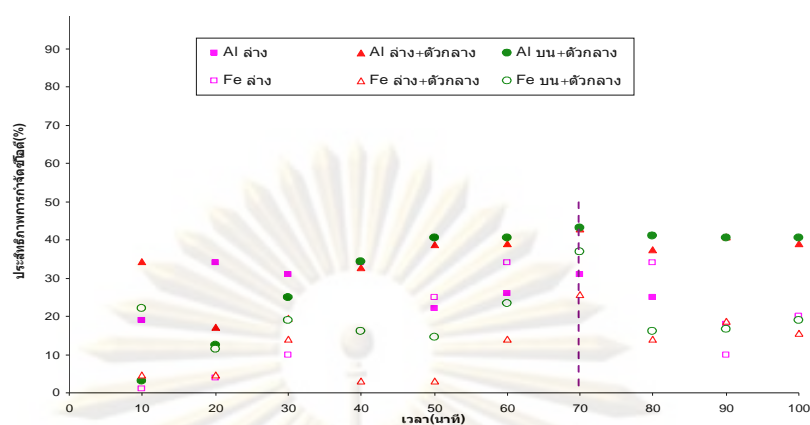
เนื่องจากเป็นกระบวนการลอยตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-flotation) ซึ่งเหมาะสมกับการจัดการอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่า 10 ไมครอนและมีความหนาแน่นสูง รวมถึงไม่เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันเกิดขึ้น ดังนั้นจึงไม่นำไปประยุกต์ใช้ในหัวข้อต่อไป

โดยในหัวข้อต่อไปจะศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยการนำกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-coagulation) มาใช้ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Coalescer) ซึ่งเรียกว่ากระบวนการอิเล็กโทรสถติกโคอะเลสเซอร์ (Electrostatic-coalescer process) เพื่อนำข้อดีของการเติมสารเคมีที่สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและการใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อรวมอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยรวม

4.4 การศึกษากระบวนการอิเล็กโทรสถติกโคอะเลสเซอร์

ในส่วนนี้จะเป็นการนำกระบวนการทางไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสีย โดยนำขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมและระยะห่างที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้นมาประยุกต์ใช้คือ วางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร และวางขั้วไฟฟ้าเหล็กไว้ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ซึ่งการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันโดยการใช้ไฟฟ้าจะต้องผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าวถูกทำลายเสถียรภาพ ในส่วนนี้สนามไฟฟ้าที่เลือกใช้จะเป็นสนามไฟฟ้ากำลังต่ำ (Ichikawa, 2007) เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ ฟองก๊าซที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าจะมีไม่มากและไม่ก่อให้เกิดการปั่นป่วนภายในระบบ จึงดีต่อการทำลายเสถียรภาพและการลอยขึ้นของอนุภาคน้ำมัน

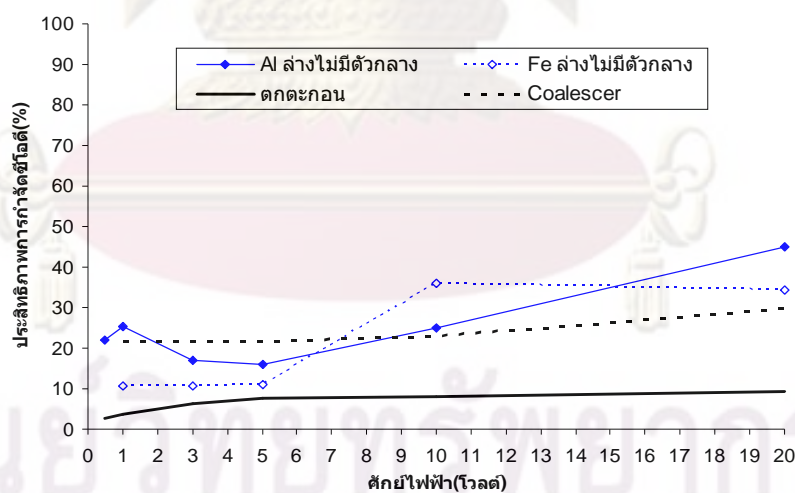
ดังนั้นในขั้นต้น จะเป็นการศึกษาจลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการประยุกต์ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์สำหรับแต่ละรูปแบบการทดลอง (วางขั้วไฟฟ้านานล่าง วางขั้วไฟฟ้านานล่างร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ และวางขั้วไฟฟ้านานบนร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์) มาพิจารณา เพื่อวิเคราะห์หาระยะเวลาที่สภาวะคงตัว (Steady state Time) สำหรับนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการเดินระบบที่ความต่างศักย์อื่นๆ รวมถึงเพื่อหาค่าซีโอดีสุดท้าย และการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เป็นตัวแทนสำหรับแต่ละการทดลอง โดยจากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมคือ 70 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-15 ซึ่งจะนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ในกรณีอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4-15 จลนศาสตร์ของค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ 1 ไมครอน สำหรับรูปแบบการทดลองต่างๆ (วางขั้วไฟฟ้าด้านล่าง, วางด้านล่างร่วมกับโคอะเลสเซอร์ และวางด้านบนร่วมกับโคอะเลสเซอร์)

4.4.1 ศึกษาตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบไม่มีตัวกลาง

ในส่วนนี้เป็นการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและขั้วไฟฟ้าเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยวางขั้วไฟฟ้าบริเวณด้านล่าง (ไม่มีการวางอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์หรือตัวกลาง) โดยถือว่าการทดลองโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าภายในระบบบำบัดอย่างเดียว โดยเลือกเดินระบบที่ค่าอัตราการไหล 5 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งสัมพันธ์ค่าที่ได้จากการศึกษาอัตราการไหลในส่วนของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่กล่าวถึงข้างต้น โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4-16






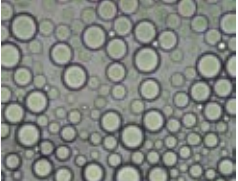

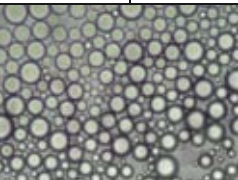
รูปที่ 4-16 ประสิทธิภาพการวางขั้วไฟฟ้านด้านล่าง (ไม่มีตัวกลางโคอะเลสเซอร์)

จากกราฟพบว่าที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมสามารถบำบัดน้ำเสียได้ 20-25% ซึ่งมีค่าสูงมากกว่าขั้วไฟฟ้าเหล็กที่สามารถบำบัดได้เพียง 10% เนื่องจากขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเมื่ออยู่ในน้ำ (วรรณวรรณ วัฒนชัย, 2546) รวมถึงทำให้เกิดผลึกไฮดรอก

ไซตซ์ของอะลูมิเนียมที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการสร้างผลึกเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาจับ (Sweep Coagulation) เพื่อให้เกิดเป็นฟlocsขนาดใหญ่และถูกกำจัดโดยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด จึงส่งผลทำให้สามารถลดค่าซีไอดีของน้ำเสียได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การที่ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าต่ำนั้นอาจมีสาเหตุมาจากการใช้ค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าที่สูงเกินไป (5 ลิตร/ชั่วโมง) รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ไม่มีโซนทำให้เกิดกระบวนการฟล็อกคูล์ชันและโซนการตกตะกอนที่เหมาะสม รวมถึงอาจเป็นผลมาจากการที่มีขนาดอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กที่แขวนลอยในน้ำเสีย จึงเป็นข้อจำกัดในการลอยขึ้นของอนุภาคน้ำมันภายในระบบบำบัด

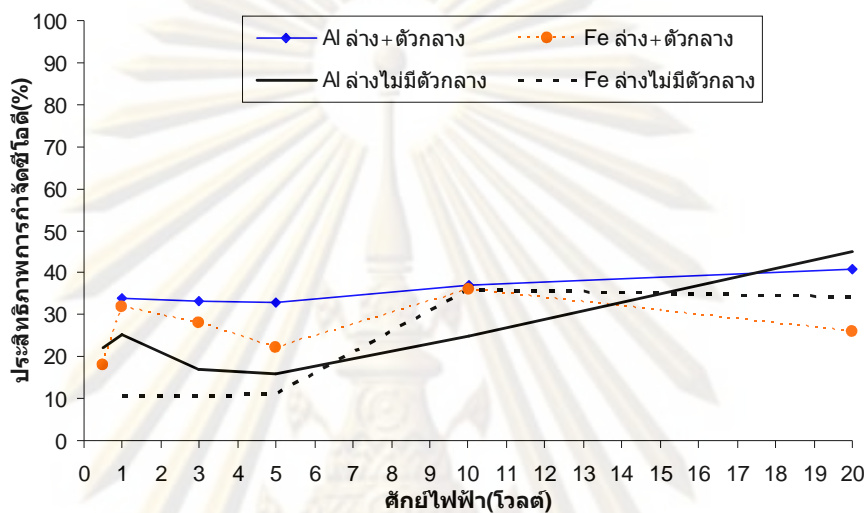
นอกจากนี้ ยังพบว่าการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างแบบไม่มีตัวกลางจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าการปล่อยให้แยกตามแรงโน้มถ่วงของโลก (ตกตะกอน) และยิ่งสูงกว่ากว่าการใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป โดยความสูงของชั้นน้ำมันด้านบน (Oil layer at surface) จะเพิ่มขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ การวัดขนาดอนุภาคน้ำมันทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nikon รุ่น YS2-H ที่กำลังขยาย 40 เท่า ร่วมกับอุปกรณ์วัดขนาดอนุภาคน้ำมัน State micrometer โดยขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) และลักษณะของชั้นน้ำมันโดยรวมสามารถแสดงดังตารางที่ 4-10 โดยกล่าวได้ว่า การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยใช้ขั้วไฟฟ้าวางไว้ด้านล่างเพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้านั้น (ไม่มีอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์) พบว่าสามารถรวมอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้โดยอนุภาคน้ำมันจะถูกทำลายเสถียรภาพโดยอิออนที่สลายตัวออกมาจากขั้วไฟฟ้า ซึ่งขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมจะให้ค่าขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการบำบัดดังแสดงในรูปที่ 4-16 ข้างต้น

ตารางที่ 4-10 ขนาดอนุภาคน้ำมันกรณีวางขั้วไฟฟ้าด้านล่างแบบไม่มีตัวกลางในโคอะเลสเซอร์

ขั้วไฟฟ้า	ที่ 1 โวลต์	ที่ 5 โวลต์	ที่ 20 โวลต์	$D_{mean}(\mu m)$	$D_{32}(\mu m)$
Al					
ชั้นน้ำมัน(ซม.)	0.5	2.3	3.6	16.60	17.26
Fe					
ชั้นน้ำมัน(ซม.)	0.4	2.2	3.5	16.38	16.98

4.4.2 ศึกษาตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง

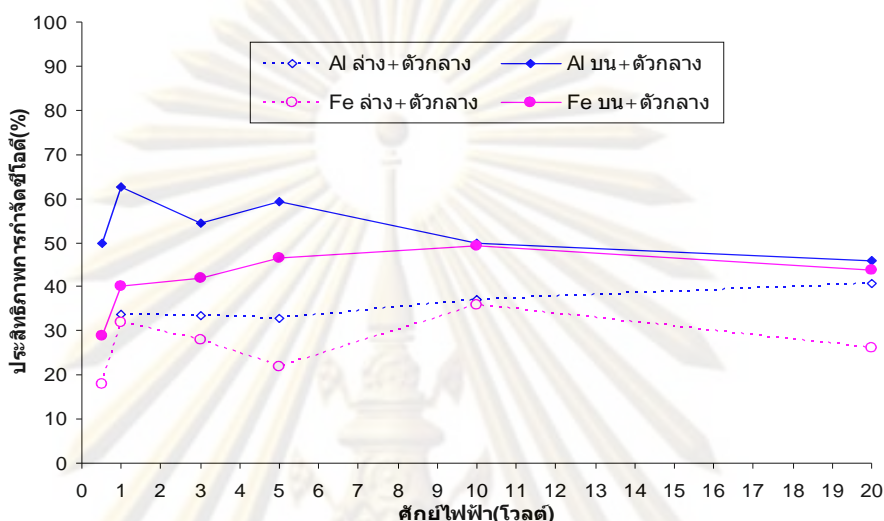
ในส่วนนี้เป็นการประยุกต์ใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยวางขั้วไฟฟ้าทั้งด้านล่างในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่มีตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4-17



รูปที่ 4-17 ประสิทธิภาพการกำจัดขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่าง

จากการทดลองพบว่าการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างแบบมีตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ด้วยการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและขั้วไฟฟ้าเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของขั้วอะลูมิเนียมจะมากกว่าขั้วเหล็กคือ 35% และ 30% ตามลำดับ โดยที่การวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างนั้นเมื่ออนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพจากไอออน Al^{3+} และ Fe^{3+} แล้วจะเคลื่อนผ่านชั้นตัวกลางโคอะเลสเซอร์เหมือนกัน ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงอาจส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้ที่ไม่มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับกรวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างแบบมีตัวกลางและไม่มีตัวกลาง พบว่าการวางชั้นตัวกลางสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพบำบัดให้สูงขึ้นได้ทั้งขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและขั้วไฟฟ้าเหล็ก ทั้งนี้เนื่องจากชั้นตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาไม่ชอบน้ำสูงอนุภาคน้ำมันจึงสามารถรวมตัวกันได้ดีก่อนที่จะหลุดออกจากชั้นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียที่มีสารลดแรงตึงผิวได้ โดยตัวกลางมีผลทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าเนื่องจากสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลือกเดินระบบบำบัดที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ ซึ่งเกิดความปั่นป่วนภายในตัวกลางน้อยด้วย จึงสามารถส่งผลดีต่อการ

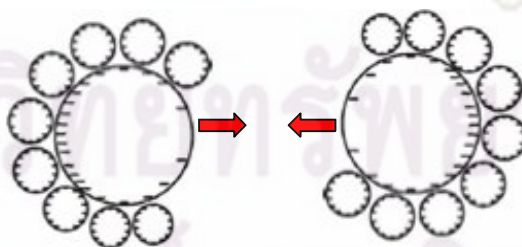
รวมตัวของอนุภาคน้ำมันอีกทางหนึ่งด้วย โดยในส่วนนี้เป็นการประยุกต์ใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยวางขั้วไฟฟ้าทั้งด้านบนในอุปกรณ์โคะเลสเซอร์แบบที่มีตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4-18



รูปที่ 4-18 ประสิทธิภาพการกำจัดขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบน

จากผลการศึกษาข้างต้น กล่าวได้ว่าน่าสนใจที่จะประยุกต์ใช้แนวทางการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนแบบมีตัวกลางในอุปกรณ์โคะเลสเซอร์ด้วยการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและขั้วไฟฟ้าเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงถึง 60% ส่วนขั้วเหล็กสามารถบำบัดได้เพียง 40% ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำในกรณีขั้วเหล็กนี้ อาจเนื่องมาจากระยะห่างของขั้วไฟฟ้าเหล็กอยู่ใกล้กันมากกว่าจึงมีความหนาแน่นของฟองก๊าซมากทำให้เกิดความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ทั้งนี้การที่ไอออน Fe^{3+} มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า Al^{3+} จึงส่งผลเสียต่อการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของประจุ Fe^{3+} รวมทั้งประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมด้วย แต่ถ้าเป็นที่ความต่างศักย์สูงกว่า 10 โวลต์ขึ้นไป กล่าวได้ว่าจะเกิดกระบวนการโพแทสเซียมทำให้เกิดฟองก๊าซมากขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นได้จนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้ขั้วอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ค่าความต่างศักย์ที่สูงเกินไปนั้น กล่าวได้ว่าไม่น่าสนใจทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมที่ต่ำกว่าที่ได้จากการเดินระบบที่ความต่างศักย์ต่ำๆ รวมไปถึงด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายในส่วนของการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้า เป็นต้น

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบการวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนกับการวางไว้ด้านล่างแบบมีตัวกลางที่ศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ พบว่าการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูง (60%) เมื่อเทียบกับการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่าง (35%) ที่ให้ค่าการบำบัดต่ำกว่า โดยผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนแบบมีตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์นั้นจะมีการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันสองครั้ง คือเมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนผ่านชั้นตัวกลางซึ่งเกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันครั้งแรกแล้วนั้น จะเกิดการชนและเกาะติดระหว่างตัวกลางร่วมกับอนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพจากระบบการทางไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งบริเวณด้านบน ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การรวมอนุภาคน้ำมันทางไฟฟ้า (Electrostatic Coalescence phenomena) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้าในกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปนเปื้อนสูง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันที่เคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าวถูกทำลายเสถียรภาพ ดังนั้นอนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้กันจึงสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและเคลื่อนตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ความเสถียรของระบบขึ้นอยู่กับอัตราการรวมตัวของอนุภาค ซึ่งสัมพันธ์กับค่าพลังงานศักย์ที่ขวางกั้นการรวมตัว (Height of potential energy barrier) ระหว่าง 2 อนุภาค ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะต้องลดพลังงานระหว่างอนุภาคลง เพื่อลดแรงผลักระหว่างอนุภาคน้ำมัน รวมถึงทำให้การเคลื่อนที่ของประจุที่บริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคน้ำมัน เพื่อก่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 4-19 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังประหยัดค่าเดินระบบด้วยเนื่องจากต้องการค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ เพื่อให้ประจุที่ผิวหน้าอนุภาคน้ำมันเคลื่อนออกเท่านั้น นอกจากนี้ ยังอาจประยุกต์ใช้เพื่อการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสีย (Oil recovery from wastewater) ได้อีกทางหนึ่งด้วย

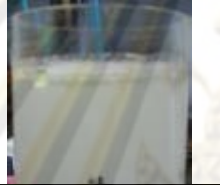

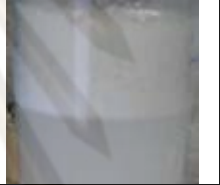

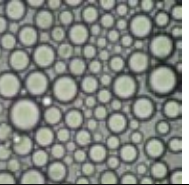
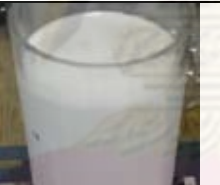



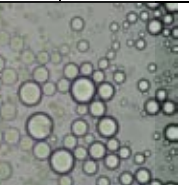









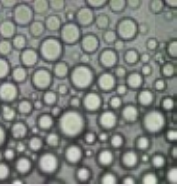


รูปที่ 4-19 การรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน

โดยสรุป เราสามารถกล่าวได้ว่าการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมวางด้านบนที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร และค่า

ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลางจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด และเป็นที่ยืนยันว่ากลไกหลักในการบำบัดไม่ได้เกิดจากกลไกการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation) หรือกลไกการทำให้ลอย (Electro-flotation) แต่เป็นกลไกการรวมอนุภาคน้ำมันทางไฟฟ้า (Electrostatic Coalescence phenomena) ซึ่งเป็นข้อดีที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้ต่อไปในการเดินระบบแบบต่อเนื่องสำหรับการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสียต่อไป โดยตารางที่ 4-11 แสดงขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ที่ถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ร่วมกับอุปกรณ์วัดขนาดอนุภาคน้ำมัน State micrometer โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนและด้านล่างเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง

ตารางที่ 4-11 ขนาดอนุภาคน้ำมันกรณีวางขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง

	ขั้วไฟฟ้า	ที่ 1 โวลต์	ที่ 5 โวลต์	ที่ 20 โวลต์	$D_{mean}(\mu m)$	$D_{32}(\mu m)$
วาง ล่าง	Al					
	ชั้นน้ำมัน(ซม.)	0.2	1.3	2	17.43	17.93
	Fe					
	ชั้นน้ำมัน(ซม.)	0.2	1	1.2	16.51	17.03
วาง บน	Al					
	ชั้นน้ำมัน(ซม.)	0.3	2	3.8	17.75	18.32
	Fe					
	ชั้นน้ำมัน(ซม.)	0.3	1.5	2.5	16.85	17.39

จากตารางที่ 4-11 พบว่าความสูงของชั้นน้ำมันเพิ่มตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยขนาดอนุภาคน้ำมันจากการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนจะมีขนาดใหญ่กว่าการวางขั้วไฟฟ้าด้านล่าง เนื่องจากการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนนั้นเพิ่มโอกาสให้กับอนุภาคน้ำมันให้รวมตัวได้สองครั้งคือ เมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนผ่านชั้นตัวกลางจะมีการรวมตัวกันครั้งแรกจากความไม่ชอบน้ำของตัวกลางและเมื่อผ่านสนามไฟฟ้าด้านบนอนุภาคน้ำมันก็จะถูกรวมตัวกันอีกครั้งหนึ่งซึ่งเท่ากับว่าเป็นการเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มากยิ่งขึ้น โดยที่ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมจะให้ค่าขนาดของอนุภาคน้ำมันที่มากกว่าขั้วไฟฟ้าเหล็กเนื่องจากอิออนที่สลายตัวออกมาจากขั้วไฟฟ้า Al^{3+} มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่า Fe^{3+} ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการบำบัดในรูปที่ 4-18 ด้วยโดยสีเหลืองหรือน้ำตาลเข้มที่ปรากฏในกรณีการประยุกต์ใช้ขั้วเหล็กนั้นกล่าวได้ว่าอาจเป็นผลเนื่องมาจากการสลายตัวของขั้วเหล็ก ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุดจึงควรเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ (Electrostatic Coalescer) ดังตารางที่ 4-12 เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4-12 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์

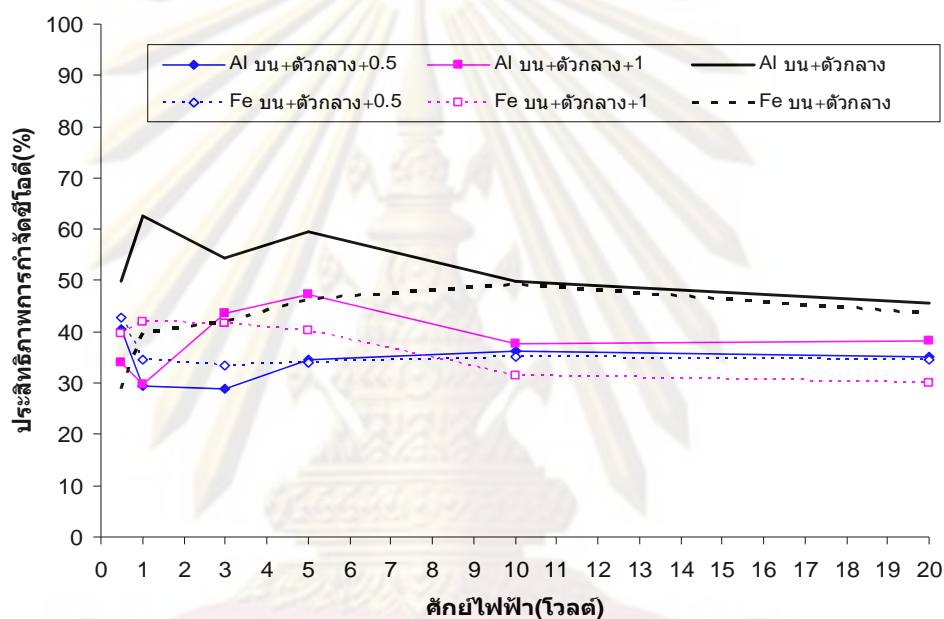
ชนิดขั้วไฟฟ้า	อะลูมิเนียม
ระยะห่างขั้วไฟฟ้า	3 เซนติเมตร
ตำแหน่งวางขั้วไฟฟ้า	วางด้านบน
ศักย์ไฟฟ้า	1 - 5 โวลต์
อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	แบบมีตัวกลาง

โดยสรุปแล้วเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุด ควรเลือกใช้ขั้วอะลูมิเนียมไว้ด้านบนที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ ในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ อย่างไรก็ตามจากข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียบนเบื่อน้ำมันสูงสุดประมาณร้อยละ 60 ดังนั้นในส่วนต่อไปจะเป็นการเสนอแนะแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดรวมถึงการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสีย โดยที่สภาวะการทำงานที่เหมาะสมทั้งในส่วน of ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กข้างต้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อในการทดลองต่อไป

4.5 การปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

4.5.1 ศึกษาการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ในส่วนนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิโมล/ลิตร เมื่อวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและขั้วไฟฟ้าเหล็กไว้ด้านบนที่ระยะ 3 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ และใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0.5, 1, 3, 5, 10 และ 20 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4-20



รูปที่ 4-20 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันขั้วไฟฟ้าด้านบนและเติมอิเล็กโทรไลต์

จากรูปที่ 4-20 พบว่าการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองความเข้มข้นนั้น ไม่ทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมสูงขึ้นทั้งในส่วนของการใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กเมื่อเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ ในกรณีที่มีการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้นต่ำๆ นั้นพบว่าจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มากกว่า เนื่องจากการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นสูงซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามากเกินไป จนก่อให้เกิดความปั่นป่วนจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นที่มากจนเกินไป จนอาจส่งผลเสียต่อการรวมตัวระหว่างอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสียสภาพแล้ว รวมถึงการแยกอนุภาคดังกล่าวออกจากน้ำเสีย

นอกจากนี้ ยังพบว่าน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าซึ่งโดยทั่วไปจะลดลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั้น มีปริมาณการลดลงที่มากขึ้นในกรณีที่มีการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้า สังเกตจากปริมาณฟองก๊าซที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเทียบกับการทดลองอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 เปรียบเทียบผลของการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

	พารามิเตอร์	ศักย์ไฟฟ้า			
		1 โวลต์	5 โวลต์	10 โวลต์	20 โวลต์
Al ไม่เติม	Δm	0.0256 g	0.0667 g	0.1010 g	0.1897 g
	Φ	1.25 - 3.74			
	C (mg/L)	34.13	88.93	134.67	252.93
Al 0.5mmol/L	Δm	0.0418 g	0.1530 g	0.2414 g	0.3850 g
	Φ	2.16 - 3.81			
	C (mg/L)	55.73	204.00	321.87	513.33
Fe ไม่เติม	Δm	0.0171 g	0.0362 g	0.0469 g	0.2988 g
	Φ	0.08 - 1.23			
	C (mg/L)	22.80	46.27	62.53	398.40
Fe 0.5mmol/L	Δm	0.0293 g	0.0446 g	0.0738 g	1.2268 g
	Φ	0.15 - 1.27			
	C (mg/L)	39.07	48.13	98.40	1635.73

จากตารางที่ 4-13 พบว่าการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นทำให้มีค่าน้ำหนักของขั้วไฟฟ้า (Δm) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Φ) และค่าปริมาณโลหะที่ละลายลงน้ำตามเวลา (C) มีค่าสูงขึ้นกว่าระบบบำบัดที่ไม่มีสารเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั้น ขั้วไฟฟ้าจะเกิดการสลายตัวออกมามากขึ้นจนทำให้น้ำหนักของขั้วไฟฟ้ามีค่าลดลง และทำให้ได้ปริมาณโลหะที่ละลายลงน้ำตามเวลา (C) มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเดินระบบบำบัด โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณขั้วโลหะที่ละลายลงสู่น้ำ สามารถอธิบายกรณีของขั้วอะลูมิเนียมและเหล็กที่ทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ด้วยกฎของฟาราเดย์ (Bensadok, 2008) ได้ดังสมการ 4-7 และ 4-8 ตามลำดับ

$$\Phi = \frac{nF \Delta m}{M Q} = \frac{nF \Delta m}{M I t} \quad (4-7)$$

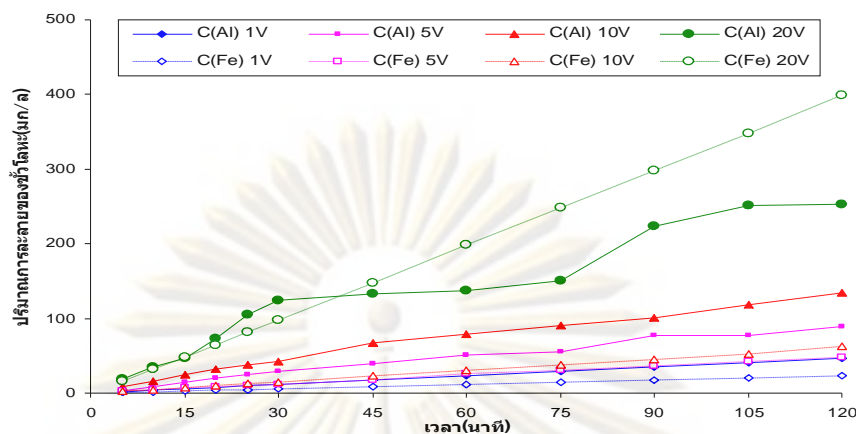
$$C(t) = \frac{M I t \Phi}{n F V} \times 1000 \quad (4-8)$$

โดยที่

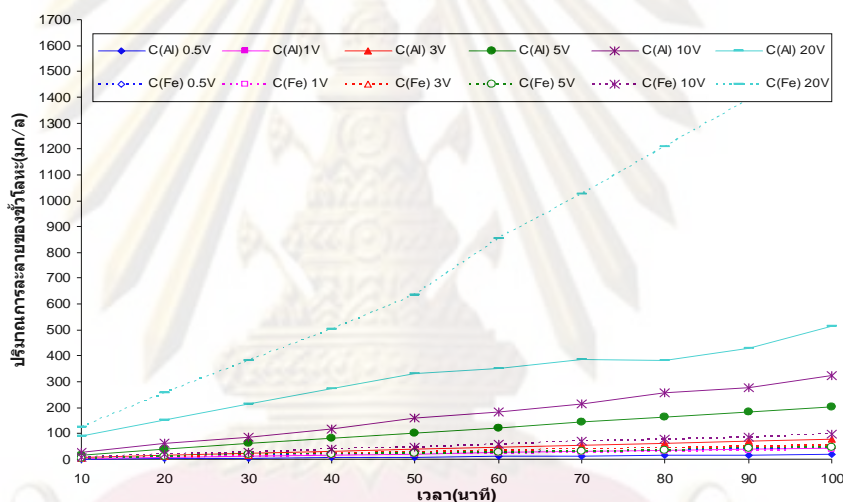
C(t)	ปริมาณโลหะที่ละลายลงน้ำตามเวลา, มิลลิกรัม/ลิตร
Φ	ค่าฟาราเดียม
F	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96487)
n	จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ (Al, Fe = 3)
M	มวลโมเลกุล, กรัม/โมล (Al = 26.98, Fe = 55.85)
Δm	น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ลดลงของขั้วแอโนด, กรัม
V	ปริมาตรน้ำตัวอย่าง, ลิตร
I	ค่ากระแสไฟฟ้า, แอมแปร์ (จากการทดลอง)
t	เวลา, วินาที

ดังนั้น เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง เช่น น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ลดลงของขั้วแอโนด (Δm) ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เป็นต้น ลงในสมการ (4-7) จะได้ค่าฟาราเดียมหรือค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็ก โดยในรูปที่ 4-21 และ 4-22 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณโลหะที่ละลายลงสู่เฟสน้ำเสียของระบบที่ไม่เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์และที่เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับ โดยพบว่า ปริมาณไอออนที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าจะละลายลงน้ำได้เพิ่มขึ้นเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นั่นคือน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้มีการหลุดออกของโลหะไอออน ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามามากขึ้นก็จะมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ขั้วไฟฟ้าจึงปล่อยไอออนออกมาตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงตามกฎข้อที่ 1 ของฟาราเดย์ที่ว่า ปริมาณสารใดสารหนึ่งที่แยกสลายออกมาจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลงไป (อภिरดี สุนทรภา, 2549)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-21 การสลายของขั้วไฟฟ้าเมื่อไม่เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4-22 การสลายของขั้วไฟฟ้าเมื่อเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 มิลลิโมล/ลิตร

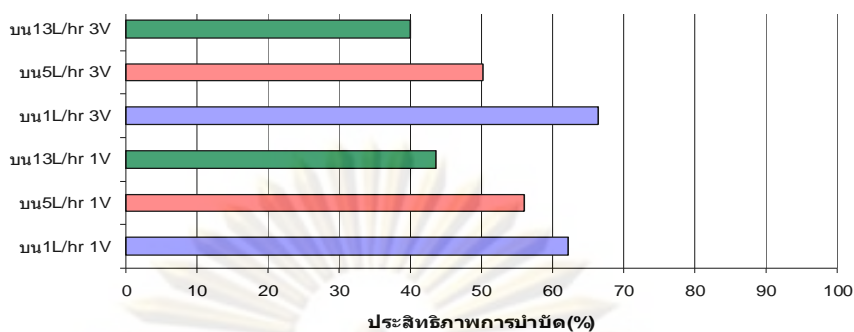
ปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดเกิดการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและเหล็กเป็น Al^{3+} และ Fe^{3+} ส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดนั้นเนื่องจากค่า E^0 ของ SO_4^{2-} มีค่ามากกว่า H_2O ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชัน คือ $\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{S}$ ซึ่งทำให้เกิดฟองก๊าซปนป่วนในระบบมาก นอกจากนี้การที่น้ำเสียหลังทำปฏิกิริยาเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็กมีสีเหลืองนั้นเนื่องจากตะกอนจากเหล็กนั้นมีสีเหลืองอ่อน รวมทั้งยังพบว่าความเข้มข้นของประจุ Al^{3+} จากขั้วอะลูมิเนียมสามารถละลายออกมาได้เร็วกว่าและมากกว่า Fe^{3+} ทั้งนี้ เนื่องจากขั้วอะลูมิเนียมมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่า แต่ในช่วงทำที่ศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ กลับพบว่าค่าการละลายของขั้วเหล็กมากกว่าขั้วอะลูมิเนียม ซึ่งอาจเนื่องมาจากระยะห่างของขั้วไฟฟ้าเหล็กที่วางไว้ใกล้กว่าการวางขั้วอะลูมิเนียมเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปสนามไฟฟ้า (E) จะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการละลายออกมาในปริมาณที่สูงขึ้น ทั้งนี้

เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Na_2SO_4) มีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้กับสารละลาย ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับขั้วไฟฟ้าจะเกิดเป็นตะกอนโลหะซัลเฟต รวมทั้งเมื่อเติมโซเดียมซัลเฟตลงไปในระบบนานๆ จะส่งผลให้ระบบแย่งทั้งนี้เนื่องจากมีการสะสมของเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยที่เมื่อมีการสะสมของเกลือซัลเฟตเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ นั้นจะส่งผลให้กลายเป็นฉนวนถาวร ซึ่งไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ต่อไป (สนธยา กริชนวรักษ์, 2552) โดยการวางขั้วไฟฟ้าเหล็กไว้ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร พร้อมทั้งใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงก็จะยิ่งเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นแม้ว่าน้ำจะใส แต่ก็เกิดฟองก๊าซและตะกอนจำนวนมาก นอกจากนี้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นนั้นยังก่อให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำจนตะกอนหลุดออกมาปนกับน้ำด้านล่างส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าต่ำ (30%) ดังนั้น จึงควรเดินระบบด้วยศักย์ไฟฟ้าต่ำ เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงรวมทั้งยังประหยัดพลังงานมากกว่าด้วย

จากผลการศึกษาทั้งหมดในช่วงต้น สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์จะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดเมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตร/ชั่วโมง และวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร โดยไม่มีความจำเป็นต้องทำการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อย่างไรก็ตาม ในอนาคตการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเดินระบบที่ความต่างศักย์ที่ต่ำมากๆ (ต่ำกว่า 1 โวลต์) นั้นอาจเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ควรศึกษาทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัด รวมถึงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่อาจลดลงอย่างชัดเจน โดยในส่วนต่อไปจะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการเวียนน้ำกลับของน้ำเสีย (Liquid effluent recirculation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งน้ำมันที่ถูกแยกออกมานั้น น่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ในอนาคต

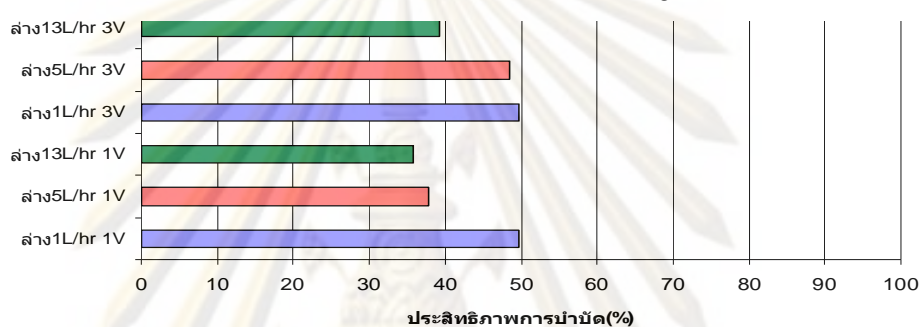
4.5.2 ศึกษาผลของการเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนนี้เป็นการเวียนกลับน้ำเสียโดยใช้ระยะเวลาในการเดินระบบสูงๆ ซึ่งจะประยุกต์ใช้สภาวะการทำงานที่ให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุดมาประยุกต์รวมกับการนำกลับน้ำเสีย 50% เพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียให้สูงขึ้นและเพิ่มความสูงของชั้นน้ำมันด้านบนด้วย ดังนั้นจึงทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องนาน 5 ชั่วโมง โดยเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมวางไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1 และ 3 โวลต์ ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 1, 5 และ 13 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อหาค่าอัตราการไหลและตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-23 และ 4-24 ตามลำดับ ทั้งนี้ วัตถุประสงค์เพื่อนำค่าอัตราการไหลและตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปใช้สำหรับการเดินระบบแบบเวียนน้ำเสียกลับ 50% ต่อไป



รูปที่ 4-23 ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนที่อัตราการไหลต่างๆ

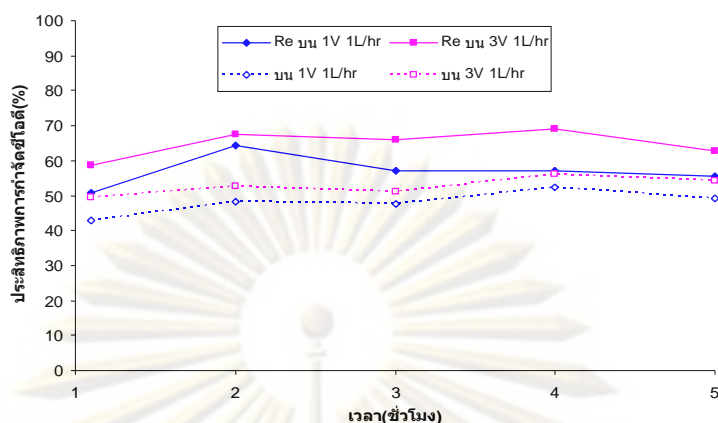
จากการเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่องที่ระยะ 5 ชั่วโมง



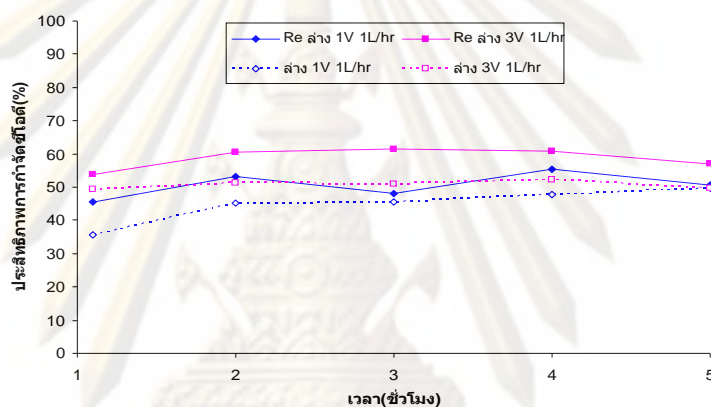
รูปที่ 4-24 ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างที่อัตราการไหลต่างๆ

จากการเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่องที่ระยะ 5 ชั่วโมง

จากการทดลองเมื่อทำการเดินระบบโดยใช้ระยะเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 1 และ 5 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในทุกกรณี คือ 1 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเวลากักน้ำ (Detention time) ที่สูงกว่าในกรณีอื่นๆ ข้างต้น ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นกรณีที่ดีที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้ต่อไปกล่าวคือ การวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนแบบมีตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและค่าศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียประมาณ 50-65% จากนั้น พบว่าเมื่อนำค่าอัตราการไหลและตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้นมาทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเมื่อเวียนน้ำกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ กลับเข้าสู่คอลัมน์โคอะเลสเซอร์ โดยใช้ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการนำน้ำเสียเข้าระบบ และวางขั้วไฟฟ้าทั้งด้านบนและด้านล่างในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4-25 และ 4-26 ตามลำดับ



รูปที่ 4-25 ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยวางชั้นไฟฟ้าไว้ด้านบน



รูปที่ 4-26 ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยวางชั้นไฟฟ้าไว้ด้านล่าง

จากการทดลองพบว่าการเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ค่อนข้างคงที่ (Stable treatment efficiency) และมีค่าเพิ่มขึ้นได้ในทุกกรณี (วางชั้นไฟฟ้าด้านบนและด้านล่าง) โดยอาจกล่าวได้ว่าเนื่องจากการหมุนเวียนอนุภาคน้ำมันกลับเข้าคอลัมน์จะช่วยเพิ่มระยะเวลาและโอกาสในการชนกันของอนุภาคน้ำมันมากขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาที่เวลาบำบัดสูงๆ (มากกว่า 3 ชั่วโมง) กล่าวได้ว่าจะสังเกตเห็นความแตกต่างที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบระหว่างค่าประสิทธิภาพการบำบัดจากการเวียนน้ำเสียและกระบวนการปกติ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันบริเวณชั้นไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4-27 ที่มากกว่าในกรณีของระบบบำบัดแบบปกติที่มีปริมาณน้ำมันเข้าสู่ระบบบำบัดมากกว่า ทำให้ส่งผลต่อการละลายของไอออน Al^{3+} จากชั้นไฟฟ้าที่อาจลดลงเมื่อเวลาบำบัดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4-27 ลักษณะขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังการทดลอง

ดังนั้นสามารถสรุปค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน รวมถึงสถานะโดยรวมของการทดลองเมื่อมีการเวียนน้ำเวียนกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังตารางที่ 4-14 ตารางที่ 4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดและความสูงชั้นน้ำมันกรณีเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์

	ตำแหน่ง ขั้วไฟฟ้า	ที่ 1 โวลต์		ที่ 3 โวลต์	
		ประสิทธิภาพ การบำบัด	ความสูง ชั้นน้ำมัน(cm)	ประสิทธิภาพ การบำบัด	ความสูง ชั้นน้ำมัน(cm)
ไม่เวียนน้ำเสีย	วางบน	50 – 60%	0.5	50 – 65%	2.4
	วางล่าง	45 – 50%	0.4	50%	1.5
เวียนน้ำเสีย 50%	วางบน	50 – 60%	0.6	60 - 70%	3.2
	วางล่าง	45 – 50%	0.5	55 – 60%	2.0

จากตาราง 4.14 ซึ่งสรุปประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันข้างต้นพบว่า ควรเลือกใช้ระบบที่มีการเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ ในการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่ใช้เวลานานๆ โดยใช้ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 1 ลิตร/ชั่วโมง มาประยุกต์ใช้กับการวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลางที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ เพื่อให้ได้ข้อดีทั้งในเรื่องของประสิทธิภาพการบำบัดคือ สามารถบำบัดที่ค่อนข้างคงที่ประมาณ 60 -70% รวมถึงส่งผลดีต่อการนำกลับมาใช้น้ำจากน้ำเสีย กล่าวคือมีความสูงของชั้นน้ำมัน 3.2 เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าที่ได้จากการเดินระบบบำบัดแบบปกติ (25 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ รวมถึงการเวียนน้ำเสียนั้นยังช่วยป้องกันปัญหาการลดลงของประสิทธิภาพบำบัดที่อาจเกิดขึ้นจากการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันบริเวณขั้วไฟฟ้า ซึ่งพบมากในทางปฏิบัติอีกด้วย

นอกจากนี้เมื่อนำกรณีที่ดีที่สุดของการบำบัดน้ำมันโดยไม่ทำการเวียนน้ำเสียกลับ คือ ใช้ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 1 ลิตร/ชั่วโมง ร่วมกับการวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนที่ ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลางที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ โดยทำการ วิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันและไขมัน (FAT OIL AND GREASE) ซึ่งจะนำน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจาก จุดเก็บ 3 จุด คือ น้ำเสียเข้า, น้ำเสียด้านบนที่เวลา 70 นาที และน้ำเสียออกที่เวลา 70 นาที จากนั้น สกัดน้ำมันด้วยเฮกเซนในกรวยแยก และนำสารละลายที่ได้ไปอิงในอ่างน้ำร้อนและอบที่ 103 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลต่างซึ่งจะเป็นน้ำมันที่ถูกสกัดออกมาและนำ ค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัม/ลิตร) เพื่อทำ mass balance ตารางที่ 4-15 ปริมาณน้ำมัน ณ จุดเก็บต่างๆ

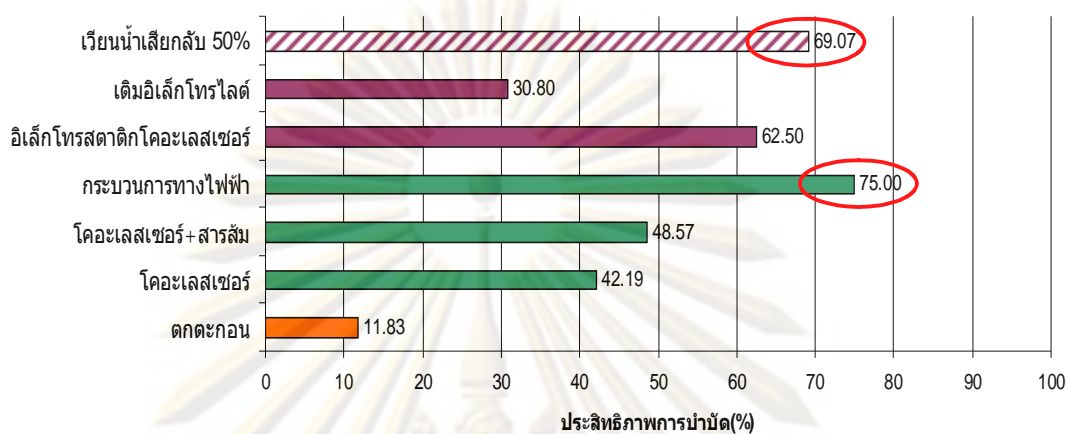
	นน.ก่อนอบ (กรัม)	นน.หลังอบ (กรัม)	ผลต่างน้ำหนัก (กรัม)	ปริมาณน้ำมัน (มก/ล)
น้ำเสียเข้า	29.7823	30.5176	0.7293	36,465
น้ำเสียด้านบนที่เวลา 70 นาที	29.0115	29.5185	0.5070	25,350
น้ำเสียออกที่เวลา 70 นาที	29.5736	29.7464	0.1728	8,640

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำเสียเข้า} &= \text{น้ำเสียสะสม} + \text{น้ำเสียออก} \\
 &= \text{น้ำเสียด้านบน} + \text{น้ำเสียออก} \\
 &= 25,350 + 8,640 \\
 &= 33,990 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}
 \end{aligned}$$

จากตารางที่ 4-15 เมื่อนำค่าปริมาณน้ำมันของน้ำเสียด้านบนรวมกับน้ำเสียออก พบว่า ค่าน้ำเสียเข้าที่ได้เท่ากับ 33,990 มิลลิกรัม/ลิตร แต่จากการทดลองจริงนั้นได้ค่าเท่ากับ 36,465 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงว่ามีปริมาณของน้ำมันหายไประหว่างการทดลอง ซึ่งอาจจะไปติดค้างอยู่ที่สาย ยาง หรือเครื่องวัดอัตราการไหลได้ จึงทำให้ปริมาณน้ำมันที่ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

และจากภาพรวมของผลการทดลองทั้งหมดในข้างต้น เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการ บำบัดที่ได้จากกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละการทดลองมาพิจารณาพบว่า การเดินระบบแบบทีละเท (Batch process) โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด แต่เมื่อทำ การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) พบว่าการเวียนน้ำเสียกลับ 50 เปอร์เซ็นต์ ใน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โคอะเลสเซอร์จะสามารถบำบัดได้มากที่สุดซึ่งเป็นการทดลองเหมาะสำหรับ

นำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงได้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-28 และผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-16



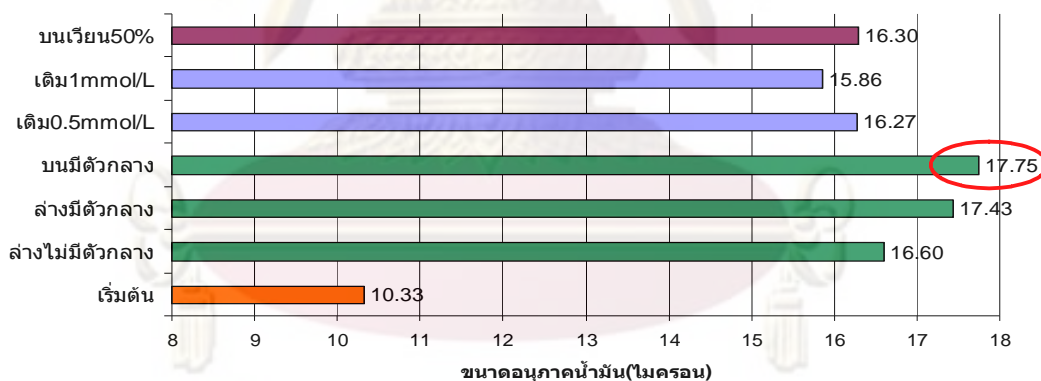
รูปที่ 4-28 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละการทดลอง

ตารางที่ 4-16 สรุปและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดจากกรณีที่ดีที่สุดของแต่ละการทดลอง

การทดลอง	ระบบ	%Eff	วิเคราะห์
ตกตะกอนแยกตามแรงโน้มถ่วง	-	11.83	ค่าต่ำที่สุดเพราะไม่มีการบำบัดปล่อยให้ น้ำมันแยกออกจากน้ำเสียเอง
อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	5 L/hr	42.19	น้ำมันรวมตัวหลังผ่านชั้นตัวกลาง
อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ + การเติมสารส้ม	5 L/hr 0.4 g/L	48.57	เติมสารเคมีสามารถบำบัดได้ดีขึ้น แต่อาจเกิดการอุดตันที่ชั้นตัวกลางได้ และสิ้นเปลืองเพราะต้องเติมตลอดเวลา
กระบวนการทางไฟฟ้า	Al 3cm 20 V	75.00	ใช้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าแทนการเติม สารเคมีในการบำบัด ได้ค่าที่ดีกว่าและ ควบคุมดูแลการเดินระบบได้ง่าย
อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์	5 L/hr Al 3cm 1V ขั้ววางบน	62.50	การรวมข้อดีของสองอุปกรณ์และเดิน ระบบแบบต่อเนื่องเพื่อประยุกต์ใช้จริง

การทดลอง	ระบบ	%Eff	วิเคราะห์
อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ + เติมอิเล็กโทรไลต์	5 L/hr Al 3cm 1V ขั้ววางบน 1mmol/L	30.80	อิเล็กโทรไลต์ช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น จึงเกิดความปั่นป่วนมากภายในระบบ ตะกอนหลุดออกมาปนเปื้อนกับน้ำเสีย
อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ + เวียนน้ำเสียกลับ 50%	1 L/hr Al 3cm 3V ขั้ววางบน	69.07	ได้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงขึ้นและ ชั้นน้ำมันหนาขึ้นด้วยจึงเป็นรูปแบบดีที่สุด สำหรับการนำไปใช้งานจริง

นอกจากนี้ เมื่อนำค่าขนาดอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ที่ได้จากการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) และใช้การวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร (ให้ผลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงที่สุด) พบว่าการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง จะให้ขนาดอนุภาคน้ำมันที่ใหญ่ที่สุด สามารถอธิบายผลได้ดังรูปที่ 4-29 และผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-17

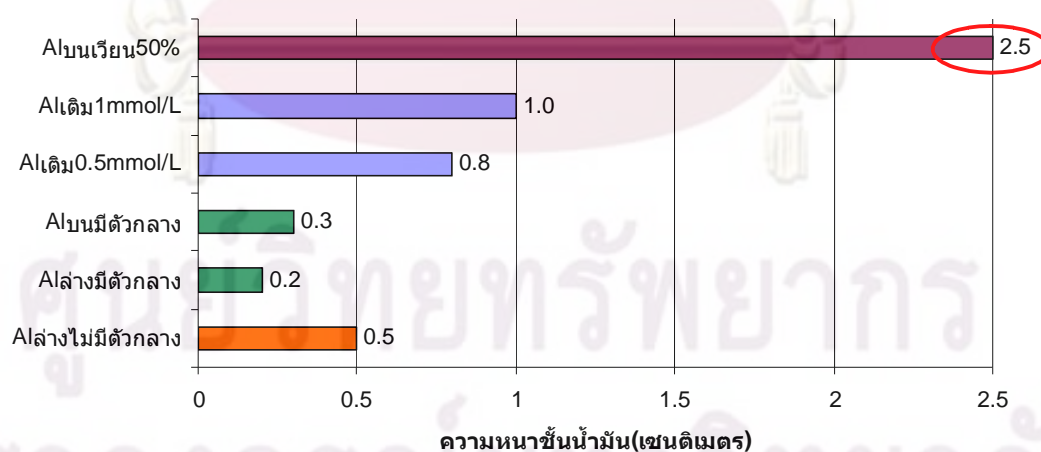


รูปที่ 4-29 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันของแต่ละการทดลอง
ตารางที่ 4-17 สรุปและวิเคราะห์ขนาดอนุภาคน้ำมันจากการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลอง	ตำแหน่งขั้ว	ขนาด (μm)	วิเคราะห์
เริ่มต้น	-	10.33	ค่าเริ่มต้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน
โคอะเลสเซอร์ ไม่มีตัวกลาง	วางล่าง	16.60	อนุภาคน้ำมันจะถูกทำลายเสถียรภาพ โดยอิออนจากขั้วไฟฟ้าทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

การทดลอง	ตำแหน่งขั้ว	ขนาด (μm)	วิเคราะห์
โคอะเลสเซอร์ มีตัวกลาง	วางล่าง	17.43	อนุภาคน้ำมันที่รวมตัวด้วยไฟฟ้าแล้วถูกทำให้ แตกออกด้วยตะกอนที่เกิดจากขั้วไฟฟ้า
	วางบน	17.75	อนุภาคน้ำมันรวมตัวสองครั้งและไม่เกิดการอุดตัน ตันของตัวกลางขนาดอนุภาคจึงใหญ่ที่สุด
เติมอิเล็กโทรไลต์	วางบน 0.5mmol/L	16.27	เกิดความปั่นป่วนภายในระบบ ทำให้อนุภาคน้ำมันแตกออก
	วางบน 1mmol/L	15.86	เกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ขนาดอนุภาคน้ำมันจึงเล็กกว่าที่ 0.5 mmol/L
เวียนน้ำเสีย 50%	วางบน	16.30	น้ำเสียผ่านเครื่องปั๊มอีกครั้ง เกิดการแตกออกของอนุภาคน้ำมัน

และเมื่อพิจารณาค่าความหนาชั้นน้ำมัน (Oil layer thickness) ที่เวลา 2 ชั่วโมง จากการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม วางไว้ด้านบนของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่มีตัวกลางที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร (ให้ผลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงที่สุด) พบว่าการเวียนกลับน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์จะให้ผลของความหนาชั้นน้ำมันมากที่สุด ดังแสดงรูปที่ 4-30 และผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-18



รูปที่ 4-30 เปรียบเทียบความหนาของน้ำมันของแต่ละการทดลอง

ตารางที่ 4-18 สรุปและวิเคราะห์ความหนาของน้ำมันจากการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลอง	ระบบ	ตำแหน่งหัว	ความหนา(cm)	วิเคราะห์
โคอะเลสเซอร์ ไม่มีตัวกลาง		วางล่าง	0.5	ไม่มีตัวกลางขวางทำให้น้ำมัน และตะกอนลอยขึ้นอย่างอิสระ
โคอะเลสเซอร์ มีตัวกลาง	1 V	วางล่าง	0.2	วางด้านบนไม่มีตัวกลางขวาง จึงให้ค่าความหนาที่มากกว่า
		วางบน	0.3	
เติมอิเล็กโทรไลต์	5 L/hr	วางบน	0.8	ถ้าเติมในปริมาณที่มากขึ้นจะ เร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของ หัวไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ความหนามีค่าเพิ่มขึ้น
		วางบน		
เวียนน้ำเสีย 50%	3 V 1 L/hr	วางบน	2.5	เป็นการเพิ่มโอกาสในการชน ของอนุภาคน้ำมันความหนา ด้านบนจึงมากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium lauryl sulphate (SDS) ที่ค่าความเข้มข้น 1 CMC (อิมัลชันน้ำมันคงตัว) ด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ซึ่งจะทำการศึกษาความสูงของชั้นตัวกลาง ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย ชนิดขั้วไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม รวมทั้งศึกษาผลจากการเวียนกลับของน้ำเสียเพื่อนำน้ำมันที่แยกออกมากลับไปใช้ใหม่สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

- จากการศึกษาลักษณะของตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาพบว่า เป็นตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำ (Oleophilic or Hydrophobic material) เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำเท่ากับ 87.88 องศา จึงเหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยความสูงที่ 3.5 เซนติเมตร และอัตราการไหลที่ 5 ลิตร/ชั่วโมง ให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดประมาณ 30-35%

- วิจัยหาสัดส่วนการประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคน้ำมันคงตัวที่แขวนลอยในน้ำเสีย พบว่าปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมคือ 1 กรัม/ลิตร โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 5-7 และให้ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 85% - 90% ทั้งนี้ เนื่องจากลักษณะของฟล็อกที่เกิดจากเพอร์ริคโคลไรด์ซึ่งมีการอัดตัวกันแน่นและมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดการอุดตันภายในชั้นตัวกลางได้มาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารส้ม (Alum) เป็นสารเคมีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ต่อไป

- จากการศึกษาการเติมสารเคมี (สารส้ม) ในบริเวณท่อน้ำเสียเข้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ พบว่าการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 0.4 กรัม/ลิตร (ความเข้มข้นต่ำ) ให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัด 50-70% ซึ่งสูงกว่าการเดินระบบด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ทั่วไป อย่างไรก็ตาม ความยุ่งยากในการเติมสารเคมี รวมถึงปัญหาการอุดตันที่อาจเกิดขึ้นภายในชั้นตัวกลางจัดเป็นข้อจำกัดในการเดินระบบดังกล่าวในทางปฏิบัติ ดังนั้นการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-coagulation) จึงมีความเป็นไปได้สำหรับจัดการกับข้อจำกัดดังกล่าว

- จากการศึกษาหาชนิดของขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยการเดินระบบแบบที่ละเทพพบว่า เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับค่าประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เป็นการยืนยันว่าขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าเหล็กและขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ตามลำดับ โดยที่เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุดควรเลือกใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กไว้ที่ระยะห่าง 3 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ สภาพการทำงานดังกล่าว และระยะเวลาที่สภาวะคงตัว (Steady state Time) 70 นาทีที่จะได้ถูกประยุกต์ใช้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ต่อไป

- จากการศึกษาการวางขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์หรือกระบวนการอิเล็กโทรสถิติกโคอะเลสเซอร์ (Electrostatic-coalescer process) ซึ่งนำข้อดีของการเติมสารเคมีที่สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและการใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อรวมอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยรวม โดยสามารถสรุปได้ว่า

- แบบไม่มีตัวกลาง โดยการวางขั้วไฟฟ้าบริเวณด้านล่าง (ถือว่าการทดลองโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าภายในระบบบำบัดอย่างเดียว) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าต่ำ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการใช้ค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าที่สูงเกินไป (5 ลิตร/ชั่วโมง) รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ไม่มีชิ้นทำให้เกิดกระบวนการฟลอคคูเลชันและโซนการตกตะกอนที่เหมาะสม
- แบบมีตัวกลาง การวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูง (60%) เมื่อเทียบกับการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่าง (35%) เนื่องจากการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนมีการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันสองครั้ง คือเมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนผ่านชั้นตัวกลางซึ่งเกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันครั้งแรกแล้วนั้น จะเกิดการชนและเกาะติดระหว่างตัวกลางร่วมกับอนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพจากกระบวนการทางไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งบริเวณด้านบน
- โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการวางขั้วไฟฟ้าด้านบนร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์นั้นสัมพันธ์กับการรวมอนุภาคน้ำมันทางไฟฟ้า (Electrostatic Coalescence phenomena) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้าในกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปนเปื้อนสูง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

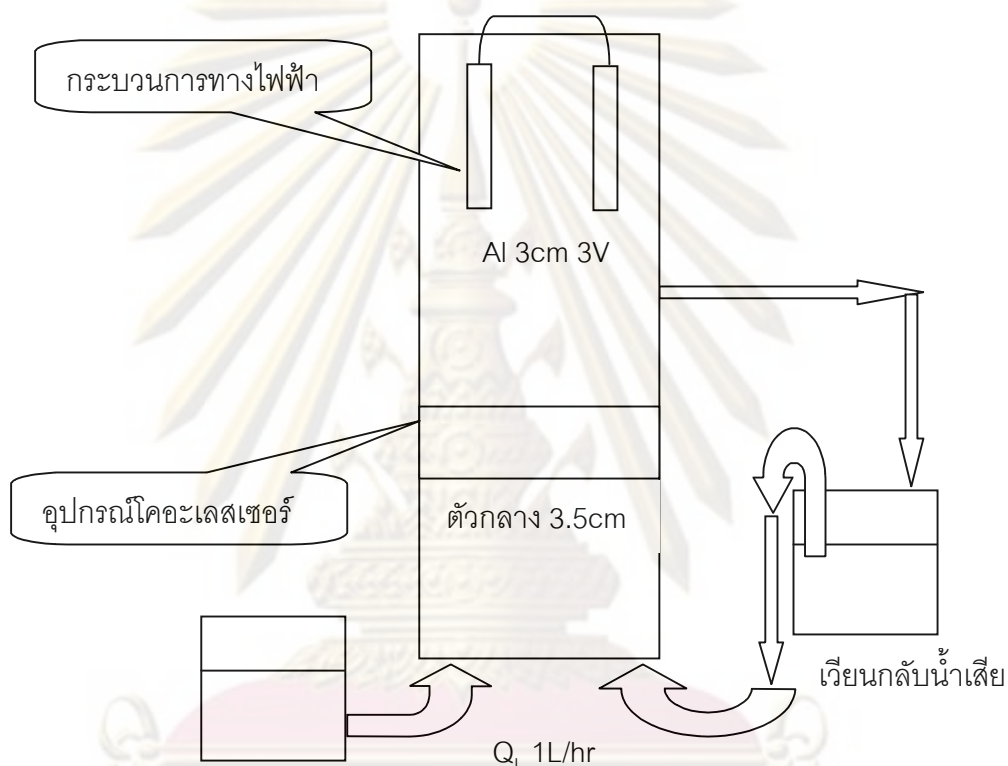
- การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่ส่งผลดีต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพบำบัด โดยพบว่า การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้นต่ำๆ (0.5 มิลลิโมล/ลิตร) นั้นจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่สูงกว่าการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นสูง ซึ่งก่อให้เกิดความปั่นป่วนจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นที่มากจนเกินไป จนอาจส่งผลเสียต่อการรวมตัวระหว่างอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสียสภาพแล้วได้

- จากการศึกษาการนำกลับน้ำเสีย 50% พบว่าสามารถให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นในระดับที่ค่อนข้างคงที่ (Stable treatment efficiency) เนื่องจากการหมุนเวียนอนุภาคน้ำมันกลับเข้าคอลัมน์จะช่วยเพิ่มระยะเวลาและเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคน้ำมันให้มากขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็น 60 -70% โดยสภาวะการทำงานที่เหมาะสมคือ การเดินระบบด้วยอัตราการไหลที่ 1 ลิตร/ชั่วโมง ร่วมกับการวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนแบบมีตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและค่าศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ นอกจากนี้ ยังส่งผลดีต่อการเพิ่มขึ้นของชั้นน้ำมันด้านบนซึ่งสัมพันธ์กับความเป็นไปได้ในการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสีย (Oil recovery from wastewater) ในอนาคต

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยสรุป จากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ พบว่าควรนำน้ำเสียเข้าสู่อุปกรณ์อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ที่ค่าอัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม วางไว้ด้านบนของอุปกรณ์ ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ (1-3 โวลต์) พร้อมทั้งวางตัวกลางเส้นใยดัดรูปหนา 3.5 เซนติเมตร ไว้ด้านล่างในส่วนของโคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง และควรเวียนกลับน้ำเสียเข้าสู่ระบบอีกครั้งเพื่อเพิ่มระยะเวลาการกักน้ำ ซึ่งดีต่อการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพในการบำบัด ขนาดอนุภาคน้ำมันที่ใหญ่ขึ้นรวมทั้งชั้นน้ำมันด้านบนมีความหนาเพิ่มขึ้นด้วย



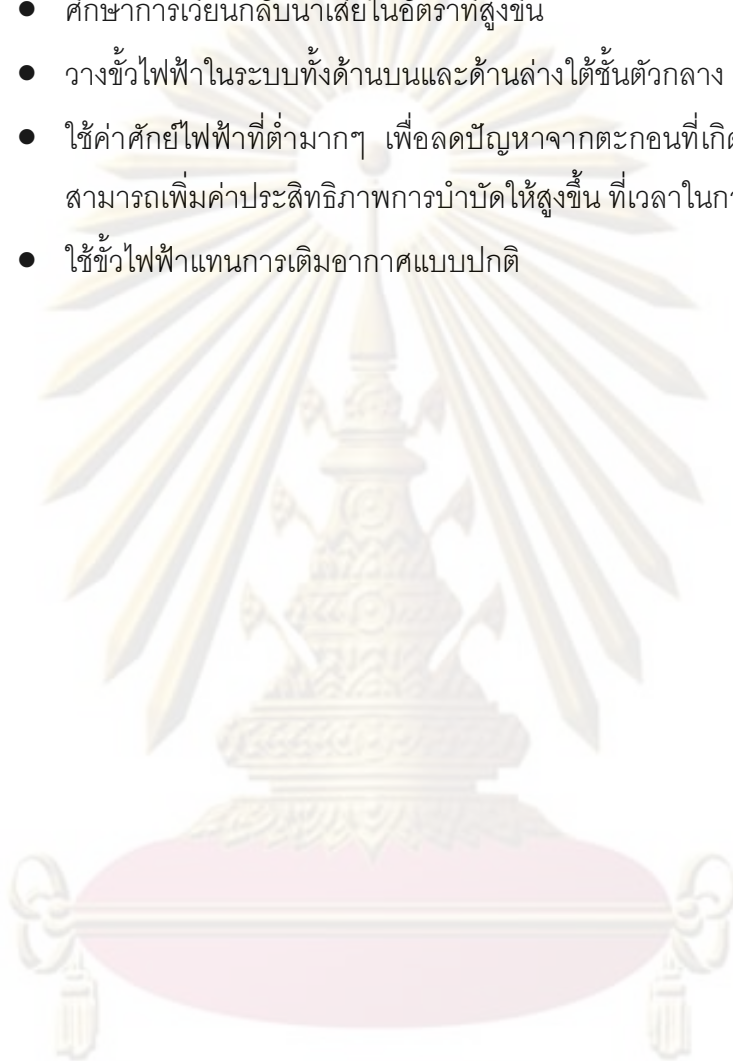
รูปที่ 5-1 รูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวประจุลบ

เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันรูปแบบเดิมที่ใช้อยู่เป็นการแยกบำบัดระหว่างการบำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์กับการบำบัดด้วยระบบการทางไฟฟ้า และเดินระบบแบบทีละเท ดังนั้นในการดำเนินงานเพื่อประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงนั้น ต้องการรูปแบบของการเดินระบบแบบต่อเนื่องเพื่อความสะดวกในการควบคุมดูแล และโดยที่ระบบการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์เป็นการนำระบบการทางไฟฟ้ามาใช้ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ซึ่งจะให้ผลของประสิทธิภาพการบำบัดที่มากกว่าการบำบัดแบบเดิม

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรมีการนำกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ไปประยุกต์ใช้ ดังนี้

- ใช้บำบัดกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่เกิดขึ้นจริง หรือน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมันเครื่อง น้ำมันตัด เป็นต้น
- ศึกษาการเวียนกลับน้ำเสียในอัตราที่สูงขึ้น
- วางขั้วไฟฟ้าในระบบทั้งด้านบนและด้านล่างได้ชั้นตัวกลาง
- ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำมากๆ เพื่อลดปัญหาจากตะกอนที่เกิดจากขั้วไฟฟ้า รวมทั้งสามารถเพิ่มค่าประสิทธิผลการบำบัดให้สูงขึ้น ที่เวลาในการเดินระบบน้อยๆ
- ใช้ขั้วไฟฟ้าแทนการเติมอากาศแบบปกติ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กชกร ก้องกังวาลย์. 2552. การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กัณฑมาศ สุทธิเรืองวงศ์. 2539. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทบวงมหาวิทยาลัย. 2528. คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี ตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัย. ในเคมีเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. อักษรเจริญทัศน์. กรุงเทพมหานคร.

ชวลีกร ชุกกลิ่น. 2547. การขจัดน้ำมันเสถียรในอิมัลชันของน้ำเสียโดยวิธีอินดิทซ์แอร์โพลเทชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประจักษ์ ศาสตรเวช. 2551. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิทซ์แอร์โพลเทชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปริเมษ เจริญพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

มันรัช ตันฑุลเวศม์ และ มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้อิทธิพลของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สนธยา กริชนวรักษ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552. ระบบการจัดการของเสียอันตราย Waste Track: แบบเตอริรียนต์ [ออนไลน์]. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย. แหล่งที่มา:
http://chemsafe.chula.ac.th/waste/index.php?option=com_content&task=view&id=60&Itemid=80 [2552, เมษายน 1].
- อภิรดี สุนทรภา. 2549. การนำกลับคืนจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

- Al-Shamrania, A.A., Jamesa, A. and Xiaob, H. 2002. Destabilisation of Oil-Water Emulsions and Separation by Dissolved Air Flotation. Water Research. 36: 1503-1512.
- Aurette, Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok : Chulalongkorn.
- Ayhan, I. and Mahmut, O. 2006. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. Journal of Hazardous Materials. B137: 1197-1205.
- Bensadok, K., Benammar, S., Lopicque, F. and Nezzal, G. 2008. Electrocoagulation of cutting oil emulsion using aluminium plate electrode. Journal of Hazardous Materials. 152: 423-430.
- Chen, X., Chen, G. and Yue, P.L. 1999. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. Separation and Purification Technology. 19: 65-76.

- Chen, X., Chen, G. and Yue, P.L. 2002. Novel electrode system for electroflotation of wastewater. Environmental science & technology . 36: 778-783.
- Friedrich, H. 1962. Ion Exchange. New York: McGraw-Hill.
- Hamza, H. A., Stanonik, D. J, and Kessick, M. A. 1996. Flocculation of lime-treated oil sands tailing. Fuel. 75: 280-284.
- Ichikawa, T. 2007. Electrical demulsification of oil-in-water emulsion. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 302: 581-586.
- 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.
- Kajitvichyankul, P., Hung, Y. and Wang, L. 2006. Oil water Separation. Handbook of Environmental Engineering. 4: 521-548
- Larue, O. and Vorobiev, E. 2003. Floc size estimation in iron induced electrocoagulation and coagulation using sedimentation data. Int J. Miner. Process 71: 1-15.
- Li, J. and Gu, Y. 2005. Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. Separation and Purification. 42: 1-13.
- Painmanakul, P., Loubiere, K., Hebrard, G., Peuchot, M. M. and Michel, R. M. 2005. Effect of surfactants on liquide-side mass transfer coefficients. Chemical Engineering Science. 60: 6480-6491.
- Painmanakul, P. and Hébrard, G. 2008. Effect of different contaminants on the α -factor: Local experimental method and modeling. Chemical Engineering Research and Design. 86: 1207-1215.

- 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 Appliquees of Toulouse.
- Rebelein, F. and Blass, E. 1990. Separation of micro-dispersions in fiber-beds. Filtration & Separation. 27: 360-363.
- Rosen, M.J. 1989. Surfatants ad Interfacial Phenomena. 2nd ed. New York : John Wiley&Son.
- Wanichkul, B. 2000. Comparison of ultrafiltration and distillation processes for treatment of cutting oil emulsion. Doctoral dissertation. Department of Environment The Institut National des Sciences Appliquees of Toulouse.
- Water Quality Division Aquifer Protection Program. 1996. BADCT Guidance document for Pretreatment with oil/water separators draft. Arizona: Arizona Department of Environmental Quality.
- Yang, C. 2007. Electrochemical coagulation for oily water demulsification. Separation and Purification Technology. 54: 388-395.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 ผลการศึกษาค้นหาความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาและค่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยเดินระบบแบบทีละเท

ตารางที่ ก-1.1 ตารางผลการศึกษาค้นหาความสูงของชั้นตัวกลางที่เหมาะสมในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

เวลา (นาที)	3.5 เซนติเมตร		7.0 เซนติเมตร		10.5 เซนติเมตร		การแยกตามแรงโน้มถ่วง	
	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด
5	9,203	33.60	10,116	27.01	11,294	18.51	13,491	2.66
10	9,308	32.84	10,116	27.01	11,503	17.00	13,348	3.69
15	9,308	32.84	9,920	28.42	11,381	17.88	12,993	6.25
20	9,203	33.60	10,116	27.01	11,051	20.26	12,777	7.81
30	9,057	34.65	9,531	31.23	11,000	20.63	12,559	9.38
45	8,993	35.11	9,531	31.23	11,261	18.75	12,551	9.44
60	8,993	35.11	9,308	32.84	11,261	18.75	12,352	10.88
90	8,576	38.12	9,057	34.65	10,842	21.77	12,253	11.59
120	8,490	38.88	9,057	34.65	10,780	22.22	12,220	11.83

ตารางที่ ก-1.2 ตารางผลการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียต่อค่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาสูง 3.5 เซนติเมตร
ในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

เวลา (นาที)	2.5 ลิตรต่อชั่วโมง		5.0 ลิตรต่อชั่วโมง		8.0 ลิตรต่อชั่วโมง		12.0 ลิตรต่อชั่วโมง	
	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด
5	11,261	18.75	10,178	26.56	11,477	17.19	12,343	10.94
10	11,051	20.26	10,178	26.56	11,693	15.63	12,127	12.50
15	10,827	21.88	9,744	29.69	11,261	18.75	11,911	14.06
20	10,611	23.44	9,312	32.81	11,051	20.26	11,477	17.19
30	9,961	28.13	8,662	37.50	10,395	25.00	11,261	18.75
45	9,528	31.25	8,446	39.06	9,744	29.69	11,051	20.26
60	9,744	29.69	8,012	42.19	9,312	32.81	10,395	25.00
90	9,312	32.81	8,228	40.63	9,094	34.38	9,744	29.69
120	9,528	31.25	8,012	42.19	9,094	34.38	9,961	28.13

ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษหาปริมาณสารเคมีและค่าพีเอชที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทสต์
 และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อนำสารเคมีที่เหมาะสมเติมลงในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์
 ตารางที่ ก-2.1 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเติมสารส้มที่ค่าพีเอชต่างๆ

pH	0.4 กรัมต่อลิตร		0.8 กรัมต่อลิตร		1.0 กรัมต่อลิตร		1.2 กรัมต่อลิตร	
	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด
3	8,758	36.81	2,218	83.99	1,851	86.64	1,435	89.64
4	6,320	54.40	2,133	84.61	1,495	89.21	928	93.30
5	5,875	57.61	1,999	85.57	1,560	88.74	913	93.41
6	4,744	65.77	1,944	85.97	1,433	89.66	913	93.41
7	5,962	56.98	1,704	87.70	1,384	90.01	795	94.26
8	6,485	53.21	1,999	85.87	1,767	87.25	1,348	90.27
9	7,670	44.66	2,429	82.47	1,789	87.09	1,011	92.70
10	8,778	36.66	3,153	77.25	2,540	81.67	1,150	91.70
11	9,516	31.74	7,158	48.35	4,526	67.34	1,789	87.09
12	10,227	26.21	7,926	42.81	7,122	48.61	8,863	36.05

ตารางที่ ก-2.2 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ

pH	0.4 กรัมต่อลิตร		0.8 กรัมต่อลิตร		1.0 กรัมต่อลิตร		1.2 กรัมต่อลิตร	
	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด
3	2,607	81.19	372	97.31	587	95.76	827	94.03
4	2,855	79.40	1,365	90.15	1,000	92.78	744	94.63
5	1,944	85.97	151	98.91	372	97.31	496	96.42
6	2,399	82.69	620	95.52	490	96.46	413	97.02
7	4,591	66.87	1,365	90.15	762	94.50	413	97.02
8	6,205	55.23	1,323	90.45	620	95.52	494	96.43
9	6,702	51.64	1,489	89.25	939	93.22	620	95.52
10	6,702	51.64	1,489	89.25	1,175	91.52	1,000	92.78
11	9,503	31.43	1,790	87.08	1,499	89.18	1,175	91.52
12	10,421	24.81	7,428	46.40	4,278	69.13	1,514	89.07

ตารางที่ ก-2.3 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยกระบวนการเติมสารเคมี บริเวณท่อน้ำเสียเข้าของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ปริมาณสารส้มที่เติม (กรัมต่อลิตร)	วิธีจาร์เทสต์ (ที่พีเอช 7)		อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	
	COD น้ำออก	% การบำบัด	COD น้ำออก	% การบำบัด
0.4	5,962	56.98	7,128	48.57
0.6	4,115	70.31	-	-
0.8	1,704	87.70	-	-
1.0	1,384	90.01	3,944	71.54
1.2	795	94.26	-	-

ภาคผนวก ก-3 ผลการศึกษากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเพื่อชนิดของขั้วไฟฟ้า ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ โดยเดินระบบแบบทีละเท
 ตารางที่ ก-3.1 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่ศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ ของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด และระยะห่างขั้วไฟฟ้า 3 ระยะ

เวลา (นาที)	1 เซนติเมตร						3 เซนติเมตร						5 เซนติเมตร					
	Al		Fe		Gr		Al		Fe		Gr		Al		Fe		Gr	
	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
5	11,261	18.75	11,261	18.75	12,127	12.50	10,395	25.00	12,127	12.50	11,261	18.75	11,911	14.06	13,426	3.13	11,261	18.75
10	7,796	43.75	10,827	21.88	11,261	18.75	9,528	31.25	11,607	16.25	9,312	32.81	10,971	20.84	12,343	10.94	11,607	16.25
15	8,661	37.51	11,693	15.63	11,261	18.75	9,094	34.38	11,391	17.81	9,744	29.69	10,827	21.88	12,343	10.94	10,971	20.84
20	8,661	37.51	11,261	18.75	10,971	20.84	8,228	40.63	11,173	19.38	10,611	23.44	10,395	25.00	11,693	15.63	11,607	16.25
25	9,528	31.25	10,395	25.00	10,827	21.88	7,796	43.75	11,693	15.63	10,395	25.00	9,961	28.13	11,911	14.06	10,971	20.84
30	10,395	25.00	10,741	22.50	10,395	25.00	6,911	50.13	8,748	36.88	10,178	26.56	9,744	29.69	12,559	9.38	10,827	21.88
45	10,395	25.00	9,094	34.38	9,094	34.38	7,708	44.38	9,182	33.75	9,961	28.13	9,961	28.13	12,777	7.81	10,395	25.00
60	10,827	21.88	9,094	34.38	8,228	40.63	8,228	40.63	9,528	31.25	10,611	23.44	9,961	28.13	12,343	10.94	8,952	35.41
75	9,961	28.13	9,528	31.25	8,228	40.63	8,228	40.63	10,178	26.56	10,611	23.44	9,312	32.81	11,911	14.06	9,961	28.13
90	9,961	28.13	10,395	25.00	8,228	40.63	8,662	37.50	10,611	23.44	12,343	10.94	9,528	31.25	11,045	20.31	10,684	22.91
105	8,228	40.63	8,662	37.50	8,662	37.50	8,228	40.63	10,741	22.50	11,693	15.63	9,094	34.38	9,744	29.69	10,827	21.88
120	7,796	43.75	7,362	46.88	9,094	34.38	7,796	43.75	9,728	29.81	10,185	26.51	8,446	39.06	9,312	32.81	10,684	22.91

ตารางที่ ก-3.2 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่ศักยภาพไฟฟ้า 5 โวลต์ ของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด และระยะห่างขั้วไฟฟ้า 3 ระยะ

เวลา (นาที)	1 เซนติเมตร						3 เซนติเมตร						5 เซนติเมตร					
	Al		Fe		Gr		Al		Fe		Gr		Al		Fe		Gr	
	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
5	12,993	6.25	10,395	25.00	11,261	18.75	11,911	14.06	11,693	15.63	9,961	28.13	12,127	12.50	12,993	6.25	11,261	18.75
10	9,528	31.25	8,660	37.50	8,952	35.41	9,744	29.69	11,693	15.63	9,094	34.38	10,827	21.88	12,993	6.25	11,261	18.75
15	9,528	31.25	8,660	37.50	10,984	20.75	9,961	28.13	11,693	15.63	9,182	33.75	9,961	28.13	12,127	12.50	11,550	16.66
20	8,228	40.63	8,660	37.50	10,971	20.84	8,446	39.06	10,827	21.88	9,961	28.13	9,961	28.13	11,693	15.63	12,127	12.50
25	7,796	43.75	8,660	37.50	11,550	16.66	8,660	37.50	11,693	15.63	10,827	21.88	8,446	39.06	11,477	17.19	11,261	18.75
30	7,882	43.13	8,228	40.63	10,971	20.84	9,528	31.25	11,693	15.63	10,971	20.84	8,662	37.50	10,480	24.38	11,261	18.75
45	7,015	49.38	8,228	40.63	11,837	14.59	9,094	34.38	11,693	15.63	11,550	16.66	8,228	40.63	11,261	18.75	10,971	20.84
60	5,283	61.88	7,796	43.75	10,684	22.91	6,930	50.00	8,660	37.50	8,660	37.50	8,228	40.63	11,477	17.19	11,550	16.66
75	5,717	58.75	6,063	56.25	9,528	31.25	7,146	48.44	8,660	37.50	9,528	31.25	6,930	50.00	11,911	14.06	10,971	20.84
90	4,417	68.13	5,629	59.38	9,818	29.16	4,547	67.19	6,930	50.00	8,228	40.63	7,146	48.44	11,693	15.63	9,528	31.25
105	3,984	71.25	5,196	62.51	10,105	27.09	4,763	65.63	8,228	40.63	8,228	40.63	6,496	53.13	10,381	25.10	9,094	34.38
120	3,550	74.38	5,196	62.51	9,528	31.25	3,465	75.00	8,662	37.50	10,827	21.88	6,279	54.69	10,178	26.56	8,660	37.50

ตารางที่ ก-3-3 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่ศักยภาพไฟฟ้า 10 โวลต์ ของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด และระยะห่างขั้วไฟฟ้า 3 ระยะ

เวลา (นาที)	1 เซนติเมตร						3 เซนติเมตร						5 เซนติเมตร					
	Al		Fe		Gr		Al		Fe		Gr		Al		Fe		Gr	
	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
5	12,127	12.50	12,870	7.14	9,305	32.86	11,261	18.75	9,961	28.13	13,265	4.29	13,209	4.69	12,474	10.00	11,261	18.75
10	9,961	28.13	12,474	10.00	8,712	37.14	9,961	28.13	9,528	31.25	12,870	7.14	11,045	20.31	12,275	11.43	9,614	30.63
15	9,961	28.13	12,672	8.57	8,117	41.43	10,395	25.00	9,961	28.13	12,672	8.57	10,827	21.88	10,889	21.43	9,528	31.25
20	9,961	28.13	12,672	8.57	8,514	38.57	9,756	29.61	10,395	25.00	12,672	8.57	9,305	32.86	10,691	22.86	9,528	31.25
25	9,094	34.38	12,077	12.86	7,326	47.14	7,796	43.75	10,395	25.00	12,177	12.14	8,966	35.31	10,691	22.86	9,528	31.25
30	8,228	40.63	12,672	8.57	8,117	41.43	7,362	46.88	10,395	25.00	11,979	13.57	7,882	43.13	10,296	25.71	9,961	28.13
45	7,796	43.75	10,889	21.43	6,930	50.00	6,889	54.29	9,094	34.38	11,781	15.00	8,514	38.57	10,098	27.14	9,528	31.25
60	6,930	50.00	10,098	27.14	6,138	55.71	4,763	65.63	8,575	38.13	11,484	17.14	8,966	35.31	9,702	30.00	10,395	25.00
75	6,469	53.13	10,691	22.86	5,940	57.14	4,547	67.19	7,796	43.75	11,261	18.75	7,319	47.19	9,900	28.57	9,528	31.25
90	7,362	46.88	9,305	32.86	6,889	54.29	4,763	65.63	9,094	34.38	10,989	20.71	6,887	50.31	9,503	31.43	9,528	31.25
105	8,228	40.63	10,691	22.86	6,731	51.43	4,331	68.75	8,228	40.63	10,791	22.14	7,326	47.14	9,094	34.38	10,395	25.00
120	6,063	56.25	9,503	31.43	5,940	57.14	3,031	78.13	6,930	50.00	9,503	31.43	7,623	45.00	8,514	38.57	8,660	37.50

ตารางที่ ก-3.4 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่ศักยภาพไฟฟ้า 20 โวลต์ ของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด และระยะห่างขั้วไฟฟ้า 3 ระยะ

เวลา (นาที)	1 เซนติเมตร						3 เซนติเมตร						5 เซนติเมตร					
	Al		Fe		Gr		Al		Fe		Gr		Al		Fe		Gr	
	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
5	12,993	6.25	10,989	20.71	11,261	18.75	10,827	21.88	12,770	7.86	12,559	9.38	11,261	18.75	11,088	20.00	13,426	3.13
10	9,961	28.13	9,661	30.29	10,493	24.29	9,961	28.13	12,077	12.86	12,127	12.50	9,961	28.13	9,702	30.00	12,993	6.25
15	9,961	28.13	8,910	35.71	7,049	49.14	7,580	45.31	12,474	10.00	11,261	18.75	9,094	34.38	8,117	41.43	12,127	12.50
20	10,411	24.88	8,810	36.43	5,959	57.00	5,535	60.06	11,682	15.71	10,989	20.71	8,228	40.63	8,712	37.14	12,559	9.38
25	10,568	23.75	8,660	37.50	4,949	64.29	5,101	63.19	10,989	20.71	9,961	28.13	7,781	43.86	8,514	38.57	12,559	9.38
30	10,395	25.00	7,781	43.86	6,930	50.00	5,136	62.94	9,900	28.57	10,395	25.00	6,496	53.13	8,236	40.57	11,261	18.75
45	10,395	25.00	7,167	48.29	7,167	48.29	3,900	71.88	9,305	32.86	10,827	21.88	6,808	50.88	8,296	40.14	11,573	16.50
60	9,094	34.38	6,633	52.14	8,098	41.57	3,803	72.56	9,094	34.38	9,961	28.13	6,279	54.69	8,228	40.63	12,005	13.38
75	8,660	37.50	5,959	57.00	8,435	39.14	3,664	73.56	9,384	32.29	8,660	37.50	6,149	55.63	7,9199	42.86	11,850	14.50
90	8,228	40.63	5,607	59.54	9,528	31.25	3,880	72.00	8,989	35.14	9,094	34.38	5,933	57.19	7,524	45.71	11,261	18.75
105	8,228	40.63	5,385	61.14	8,514	38.57	3,897	71.88	8,228	40.63	9,094	34.38	5,717	58.75	7,326	47.14	9,528	31.25
120	7,362	46.88	4,828	65.16	10,684	22.91	3,465	75.00	7,543	45.57	9,961	28.13	5,283	61.88	6,138	55.71	9,094	34.38

ภาคผนวก ก-4 ผลการศึกษาค่าพีเอชหลังทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ จากการเดินระบบแบบที่ละเทในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ตารางที่ ก-4.1 ตารางผลการศึกษาค่าพีเอชหลังทำปฏิกิริยาที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ของขั้วไฟฟ้าทั้งสามชนิด ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร

เวลา (นาที)	1 โวลต์			5 โวลต์			10 โวลต์			20 โวลต์		
	Al	Fe	Gr	Al	Fe	Gr	Al	Fe	Gr	Al	Fe	Gr
5	7.3	7.3	7.2	8.3	7.9	6.6	9.3	8.1	7.3	10.3	8.1	7.5
10	7.5	7.4	7.4	8.6	7.9	6.6	9.5	8.1	7.6	10.4	8.3	6.6
15	7.7	7.4	7.3	8.9	8.2	6.7	9.5	8.1	7.5	10.7	8.2	6.2
20	7.8	7.5	7.3	8.9	8.2	6.8	9.6	8.1	7.2	10.8	8.3	6.0
25	7.8	7.5	7.1	9.0	8.2	6.8	9.7	8.2	6.7	11.0	8.6	5.9
30	7.7	7.5	7.0	9.2	8.3	6.8	9.8	8.0	6.1	11.0	8.7	5.8
45	7.9	7.5	7.3	9.7	8.0	6.9	10.3	7.9	6.1	11.7	9.0	5.6
60	8.0	7.4	7.2	10.0	8.1	6.9	10.4	8.0	5.7	11.8	9.2	5.6
75	8.2	7.4	7.0	9.9	8.2	6.8	10.3	8.2	5.5	12.3	9.4	6.0
90	8.2	7.4	6.7	9.9	8.1	6.8	10.5	8.4	5.2	12.2	9.8	6.6
105	8.4	7.3	6.4	10.0	8.2	6.7	10.7	8.7	5.1	11.9	10.3	6.7
120	8.4	7.2	6.4	10.0	8.0	6.7	10.7	8.9	5.1	11.7	10.6	6.8

ภาคผนวก ก-5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 70 นาที ของขี้ไฟฟ้าอะลูมิเนียมและขี้ไฟฟ้าเหล็กที่ระยะห่าง 3 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยวางไว้ด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลางและไม่มีตัวกลาง ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ และเดินระบบแบบต่อเนื่อง ตารางที่ ก-5.1 ตารางผลการศึกษาค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 70 นาที ของแต่ละกรณี

ขี้ไฟฟ้า		0.5 โวลต์		1 โวลต์		3 โวลต์		5 โวลต์		10 โวลต์		20 โวลต์	
		COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
วางล่าง ไม่มีตัวกลาง	Al	-	-	10,365	25.21	-	-	11,642	16.00	10,395	25.00	7,623	45.00
	Fe	-	-	12,378	10.69	-	-	12,343	10.94	8,878	35.94	9,094	34.38
วางล่าง มีตัวกลาง	Al	-	-	9,173	33.81	-	-	9,294	32.94	8,731	37.00	8,194	40.88
	Fe	-	-	9,424	32.00	-	-	10,810	22.00	8,870	36.00	10,256	26.00
วางบน มีตัวกลาง	Al	6,930	50.00	5,197	62.50	6,322	54.38	5,629	59.38	6,930	50.00	7,519	45.75
	Fe	9,840	29.00	8,316	40.00	8,038	42.00	7,415	46.50	7,015	49.38	7,796	43.75

ภาคผนวก ก-6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ 70 นาที ของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและขั้วไฟฟ้าเหล็ก

ที่ระยะห่าง 3 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยวางไว้ด้านบนของโคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ และเดินระบบแบบต่อเนื่อง
 ตารางที่ ก-6.1 ตารางผลการศึกษาค่าประสิทธิภาพการบำบัดกรณีเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ขั้วไฟฟ้า		0.5 โวลต์		1 โวลต์		3 โวลต์		5 โวลต์		10 โวลต์		20 โวลต์	
		COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
Al	0.5 มิลลิโมลต่อลิตร	8,261	40.39	9,632	30.50	9,850	28.93	9,056	34.66	8,817	36.38	8,975	35.24
	1 มิลลิโมลต่อลิตร	9,147	34.00	9,591	30.80	7,817	43.60	7,318	47.20	8,648	37.60	8,565	38.20
Fe	0.5 มิลลิโมลต่อลิตร	7,943	42.69	9,056	34.66	9,214	33.52	9,135	34.09	8,975	35.24	9,056	34.66
	1 มิลลิโมลต่อลิตร	8,381	39.53	8,049	41.92	8,076	41.73	8,296	40.14	9,498	31.47	9,715	29.90

ภาคผนวก ก-7 ผลการศึกษาอัตราการไหลและตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมวางไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างของโคอะเลสเซอร์ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อนำค่าไปใช้สำหรับการเดินระบบแบบเวียนน้ำเสียกลับ 50% ตารางที่ ก-7.1 ตารางผลการศึกษาค่าอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัด เมื่อกวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบน ที่ศักย์ไฟฟ้า 1 และ 3 โวลต์

อัตราการไหล	ศักย์ไฟฟ้า	70 นาที		2 ชั่วโมง		3 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		5 ชั่วโมง	
		COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
1 ลิตรต่อชั่วโมง	1 โวลต์	6,512	53.01	5,794	58.19	5,866	57.67	5,652	59.22	5,240	62.19
	3 โวลต์	5,616	59.48	5,186	62.58	5,409	60.97	4,972	64.12	4,666	66.33
5 ลิตรต่อชั่วโมง	1 โวลต์	6,153	55.60	6,943	49.90	7,805	43.68	7,733	44.20	6,094	56.03
	3 โวลต์	5,580	59.74	5,434	60.79	4,634	66.56	6,266	54.97	6,892	50.27
13 ลิตรต่อชั่วโมง	1 โวลต์	7,302	47.31	5,434	46.79	8,164	41.09	7,805	43.68	7,733	44.20
	3 โวลต์	7,367	46.84	7,440	46.32	7,586	45.26	8,716	40.00	7,148	48.42

ตารางที่ ก-7.2 ตารางผลการศึกษาค่าอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัด เมื่อบางชั่วโมงไฟฟ้าไว้ด้านล่าง ที่ศักย์ไฟฟ้า 1 และ 3 โวลต์

อัตราการไหล	ศักย์ไฟฟ้า	70 นาที		2 ชั่วโมง		3 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		5 ชั่วโมง	
		COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
1 ลิตรต่อชั่วโมง	1 โวลต์	8,905	35.75	7,611	45.08	7,539	45.60	7,252	47.67	7,003	49.74
	3 โวลต์	7,038	49.22	6,749	51.30	6,806	50.89	6,607	52.33	7,003	49.74
5 ลิตรต่อชั่วโมง	1 โวลต์	8,115	41.45	7,970	42.49	8,187	40.93	7,970	42.49	8,618	37.82
	3 โวลต์	7,501	45.88	7,358	46.91	7,215	47.94	7,358	46.91	8,429	39.18
13 ลิตรต่อชั่วโมง	1 โวลต์	8,546	38.34	8,259	40.41	8,401	39.38	8,474	38.86	8,905	35.75
	3 โวลต์	7,580	45.31	7,435	46.35	7,507	45.83	7,146	48.44	7,146	48.44

ภาคผนวก ก-8 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเวียนกลับน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมวางไว้ทั้งด้านบน ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 1 และ 3 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และประยุกต์ใช้ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสม คือ 1 ลิตรต่อชั่วโมง ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ ก-8.1 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดกรณีเวียนกลับน้ำเสีย 50 เปอร์เซ็นต์

ตำแหน่ง ขั้วไฟฟ้า	ศักย์ไฟฟ้า	70 นาที		2 ชั่วโมง		3 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		5 ชั่วโมง	
		COD	%	COD	%	COD	%	COD	%	COD	%
วางบน	1 โวลต์	6,821	50.78	4,954	64.25	5,961	56.99	5,699	56.99	6,176	55.44
	3 โวลต์	5,715	58.76	4,500	67.53	4,715	65.98	4,286	69.07	5,143	62.89
วางล่าง	1 โวลต์	7,550	45.52	6,479	53.25	7,215	47.94	6,194	55.31	6,845	50.61
	3 โวลต์	6,379	53.97	5,467	60.55	5,337	61.49	5,426	60.85	5,940	57.14


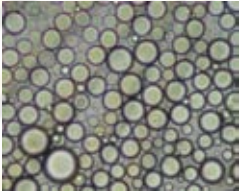

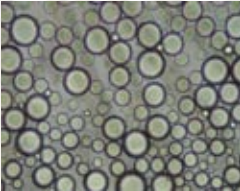

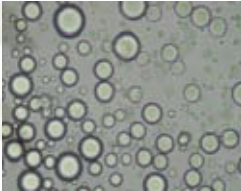

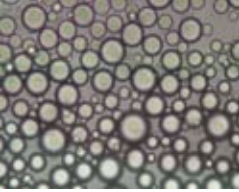

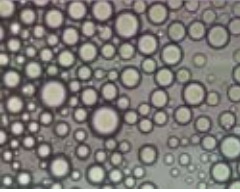

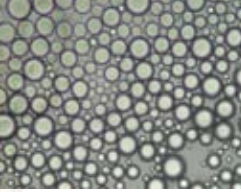


ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข


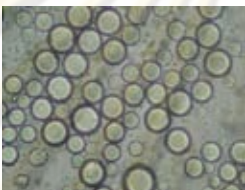
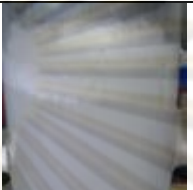
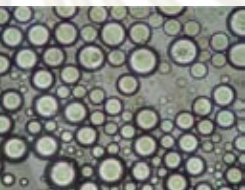

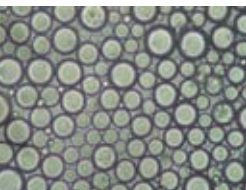

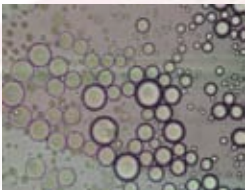

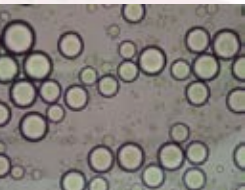

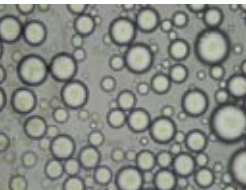
ภาคผนวก ข-1 รูปแสดงความหนาน้ำมันและขนาดอนุภาคน้ำมัน กรณีวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่าง แบบไม่มีตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

	1 โวลต์	5 โวลต์	20 โวลต์
Al 3cm วางล่าง ไม่มี ตัวกลาง 5L/hr	 0.5 cm 	 2.3 cm 	 3.6 cm 
$D_{\text{mean}} = 16.60 \mu\text{m}$			
Fe 1cm วางล่าง ไม่มี ตัวกลาง 5L/hr	 0.4 cm 	 2.2 cm 	 3.5 cm 
$D_{\text{mean}} = 16.38 \mu\text{m}$			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)


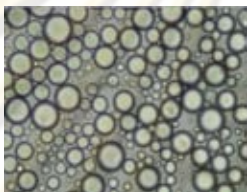

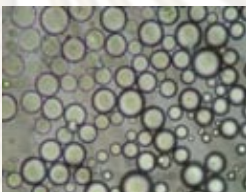

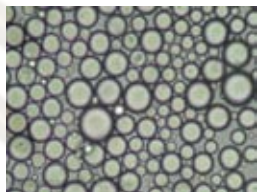

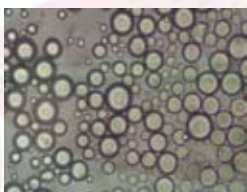

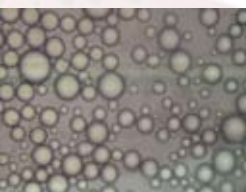

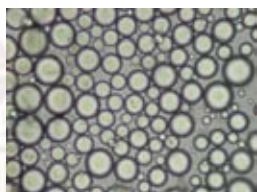
ภาคผนวก ข-2 รูปแสดงความหนาน้ำมันและขนาดอนุภาคน้ำมัน กรณีวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่าง แบบมีตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

	1 โวลต์	5 โวลต์	20 โวลต์
Al 3cm วางล่าง ตัวกลาง 5L/hr	 0.3 cm 	 1.3 cm 	 2 cm 
$D_{\text{mean}} = 17.43 \mu\text{m}$			
Fe 1cm วางล่าง ตัวกลาง 5L/hr	 0.3 cm 	 1 cm 	 1.2 cm 
$D_{\text{mean}} = 16.51 \mu\text{m}$			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)




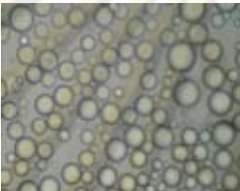
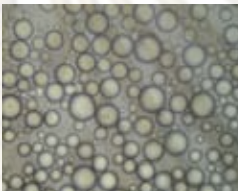
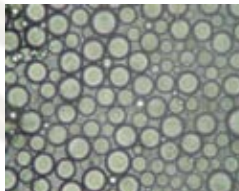



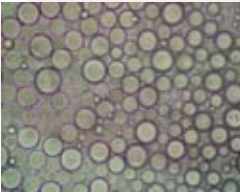
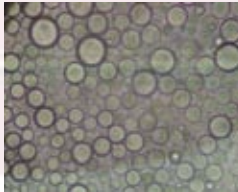
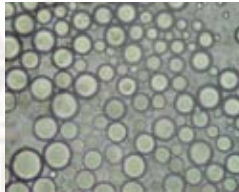
ภาคผนวก ข-3 รูปแสดงความหนาน้ำมันและขนาดอนุภาคน้ำมัน กรณีวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนแบบ มีตัวกลางในอุปรกรณ์โคอะเลสเซอร์

	1 โวลต์	5 โวลต์	20 โวลต์
Al 3cm วางบน ตัวกลาง 5L/hr	 0.2 cm 	 2 cm 	 3.8 cm 
$D_{\text{mean}} = 17.75 \mu\text{m}$			
Fe 1cm วางบน ตัวกลาง 5L/hr	 0.2 cm 	 1.5 cm 	 2.5 cm 
$D_{\text{mean}} = 16.85 \mu\text{m}$			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




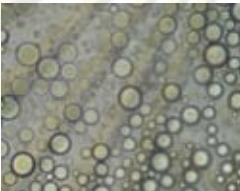
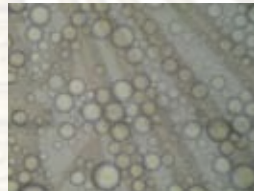
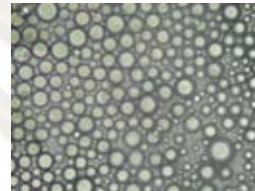



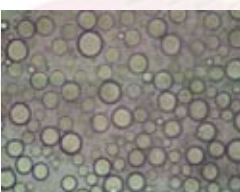
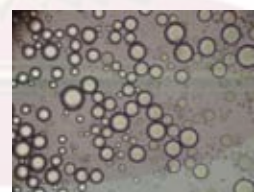
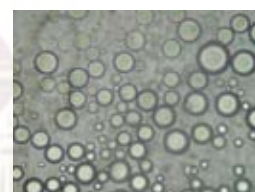
ภาคผนวก ข (ต่อ)

ภาคผนวก ข-4 รูปแสดงความหนาแน่นและขนาดอนุภาคน้ำมัน กรณีวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนแบบ มีตัวกลางในอุปกรณ์โคอเลสเซอร์ และเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร

	1 โวลต์	5 โวลต์	20 โวลต์
Al 3cm วางบน ตัวกลาง 5L/hr 0.5mmol/L	 0.8 cm	 2.6	 ∞
			
	$D_{\text{mean}} = 16.27 \mu\text{m}$		
Fe 1cm วางบน ตัวกลาง 5L/hr 0.5mmol/L	 0.8 cm	 2.2	 ∞
			
	$D_{\text{mean}} = 16.13 \mu\text{m}$		

ภาคผนวก ข (ต่อ)


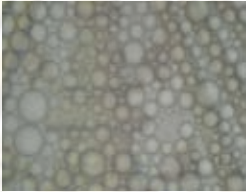

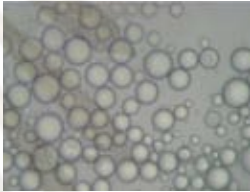

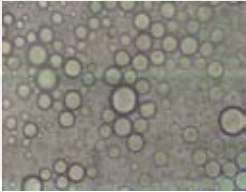

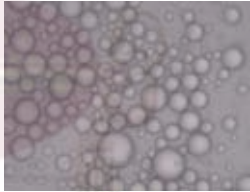
ภาคผนวก ข-5 รูปแสดงความหนาแน่นและขนาดอนุภาคน้ำมัน กรณีวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนแบบ มีตัวกลางในอุปกรณ์โคอเลสเซอร์ และเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 1 มิลลิโมลต่อลิตร

	1 โวลต์	5 โวลต์	20 โวลต์
Al 3cm วางบน ตัวกลาง 5L/hr 1mmol/L	 1 cm	 3.1 cm	 ∞
			
	$D_{\text{mean}} = 15.86 \mu\text{m}$		
Fe 1cm วางบน ตัวกลาง 5L/hr 1mmol/L	 1 cm	 2.8 cm	 ∞
			
	$D_{\text{mean}} = 15.62 \mu\text{m}$		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ภาคผนวก ข-6 รูปแสดงความหนาน้ำมันและขนาดอนุภาคน้ำมัน กรณีวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนแบบ มีตัวกลางในอุปกรณ์โคเอสเซอร์ และเวียนน้ำเสียกลับที่ 50 เปอร์เซ็นต์

	1 โวลต์	3 โวลต์
Al 3cm วางบน 1L/hr เวียน 50%	 0.6 cm 	 3.2 cm 
	$D_{\text{mean}} = 16.30 \mu\text{m}$	
Al 3cm วางล่าง 1L/hr เวียน 50%	 0.5 cm 	 2 cm 
	$D_{\text{mean}} = 16.06 \mu\text{m}$	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ค-1 การประชุมวิชาการระดับชาติ

การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วย กระบวนการอิเล็กโทรสถิติกโคอะเลสเซอร์ Treatment and Separation of oily wastewater by Electrostatic Coalescer process

สุศศิริ จิตสุภวัฒน์¹ กชกร ก้องกังวาลย์¹ ณัฐวิญญู ชาวเลิศพรศิยา² และ พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล³*

Sutsiri Titasupawat¹ Kotchakorn Kongkangwam¹ Nattawin Chawaloephonsiya² and Pisut Painmanakul³

¹นิสิตบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

²นิสิตบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

³อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

*โทรศัพท์: (66) 02-2186671, โทรสาร: (66) 02-2186666, E-mail: pisut.p@chula.ac.th และ pisut114@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ จากการศึกษาด้วยการเดินระบบแบบที่ละเทพบว่าการเลือกใช้ขั้วอลูมิเนียมที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าการใช้ขั้วเหล็กและขั้วแกรไฟต์ที่ระยะห่างต่างๆ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการตกตะกอนและลอยตะกอนทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันในด้านความสามารถในการละลายของไอออนประจุบวกเพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมัน ความว่องไวในการทำปฏิกิริยารวมถึงข้อจำกัดการทำให้ลอยตัวด้วยฟองก๊าซ ทั้งนี้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 5 ลิตร/ชั่วโมงนั้น พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดกว่า 2 เท่า (จาก 35 เป็น 70 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเดินระบบที่ค่าความต่างศักย์ต่ำๆ ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า ซึ่งควรประยุกต์ใช้ในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสีย

คำสำคัญ : น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน; โคอะเลสเซอร์; กระบวนการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า; ขั้วไฟฟ้า; อนุภาคน้ำมัน

Abstract

The objective of this research was to study the treatment of palm oily-wastewater containing with surfactant by Electrostatic coalescer process. In batch process, the result has shown that the highest treatment efficiencies can be obtained with 3 cm aluminum electrode: the difference of electro-coagulation/flotation process in term of flotation mechanism, electrode dissolution and related destabilization reactivity can be possibly responsible for these results. By applying the suitable electrode system with coalescer at 5 L/hr as continuous liquid flow rate, the treatment efficiencies can be enhanced for 2 times, especially at lowest voltage applied. This corresponds with electrostatic coalescence mechanism for applying, in future, to augment the treatment efficiency and also the oil recovery from wastewater.

Keywords : Oily wastewater; Coalescer; Electrostatic coalescence process; Electrode; Oil droplet

บทนำ

น้ำมันจัดเป็นสารปนเปื้อนชนิดหนึ่งที่มีมากพบในน้ำเสีย ทั้งในน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันมีอยู่หลายรูปแบบ คือ น้ำมันที่อยู่ในรูปฟิล์มลอยอยู่บนผิวน้ำ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว และน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้ แต่ที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดคือ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว จะมีเสถียรภาพและยากต่อการบำบัดมากที่สุด โดยทั่วไปน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการตกตะกอน การทำให้ลอย การใช้โคอะเลสเซอร์ อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน การดูดซับ กระบวนการกรองและการกลั่นหรือการเพิ่มอุณหภูมิ เป็นต้น [1] สำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จัดเป็นแนวทางการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวต่ำ (Less-stabilized oily emulsion) โดยอนุภาคน้ำมันจะไหลผ่านชั้นตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำ เพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและรวมตัวของอนุภาค ทำให้อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มสูงขึ้นของความเร็วในการแยกอนุภาคน้ำมันจากเฟสน้ำตามกฎของสโตว์ (Stoke's law) ถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ และบำรุงรักษาง่าย แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องการบำบัดหรือการแยกอนุภาคน้ำมันซึ่งมีเสถียรภาพ (10 ไมครอน) และการเดินระบบด้วยอัตราการไหลสูงๆ [2]

กระบวนการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า (Electrostatic coalescence process) เป็นการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้าในกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปนเปื้อนสูง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันที่เคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าวถูกทำลายเสถียรภาพ ดังนั้นอนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้กันจึงสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและเคลื่อนตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ระหว่างเดินระบบข้างต้นยังอาจเกิดกระบวนการตกตะกอนและลอยตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-Coagulation/Flotation) ได้อีกด้วย [3] โดยทั่วไป เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์หรือการสลายตัวขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งขึ้นกับชนิดของขั้วไฟฟ้า (แอโนดและแคโทด) ที่เลือกใช้ ดังสรุปในตารางที่ 1

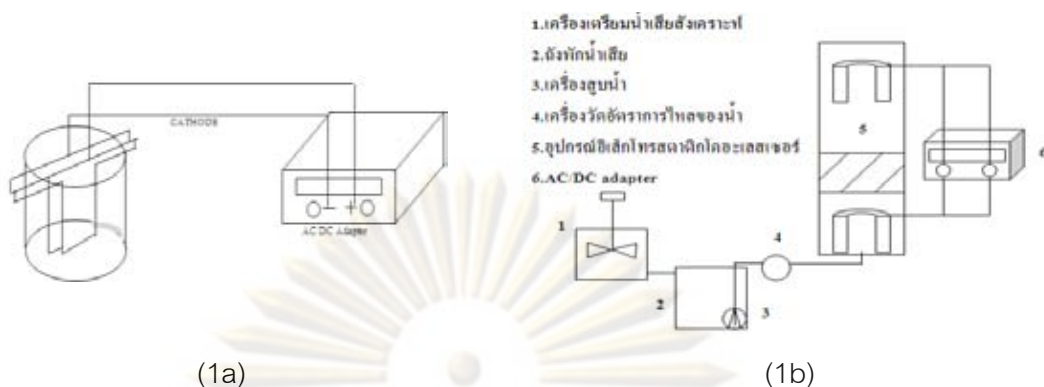
ตารางที่ 1 ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้า	Al	Fe	Gr
แอโนด	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^-$	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
Oxidation			
แคโทด	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
Reduction			
Redox reaction	$2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{Al}^{3+} + 6\text{OH}^-$	$2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{Fe}^{2+} + 6\text{OH}^-$	$4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{OH}^-$

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าส่วนใหญ่จะแยกศึกษาระหว่างอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์กับกระบวนการทางไฟฟ้า [4] ซึ่งทั้งสองวิธีนี้สามารถเพิ่มอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงนับว่าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด รวมถึงการนำกลับอนุภาคน้ำมันจากน้ำเสียที่มีความคงตัวสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งหมายที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดและแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อเข้าใจถึงกลไกการทำงาน ปัจจัยสำคัญ และแนวทางการออกแบบที่เหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษานี้ทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความคงตัวสูงจากน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Sodium Dodecyl Sulfate, SDS) ที่ความเข้มข้น 1 CMC [5] ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลองคือ ขั้วอะลูมิเนียม ขั้วเหล็ก และขั้วแกรไฟต์ โดยภาพรวมชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ถึง 4 ดังแสดงในรูปที่ 1a และ 1b ตามลำดับโดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1 แผนผังแสดงการต่ออุปกรณ์

1. ศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าในด้านชนิดขั้วไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้า และการสลายขั้วไฟฟ้า โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ใช้น้ำตัวอย่าง 0.75 ลิตร และระยะเวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที (รูปที่ 1a)
2. ศึกษาการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพด้วยวิธีจาร์เทสต์ (กวนเร็ว 100 รอบต่อนาที นาน 1 นาที และกวนช้า 30 รอบต่อนาที นาน 40 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที) [5] โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์
3. ศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลน้ำเสียและการเติมสารเคมีสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยใช้ตัวกลางแบบเส้นใยพลาสติกเนื่องจากมีค่าความไม่ชอบน้ำสูง [6] และมีการเติมสารเคมีทำลายเสถียรภาพ (สารส้ม)
4. ศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดและตำแหน่งขั้วไฟฟ้า รวมไปถึงค่าความต่างศักย์ในการเดินระบบบำบัด (รูปที่ 1b)

ในงานวิจัยนี้ พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าซีโอดี (COD) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด [7] โดยน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดีเริ่มต้น (COD₀) เท่ากับ 13,860 มิลลิกรัม/ลิตร และขนาดอนุภาคน้ำมันซึ่งวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Nikon Coolpix) และอุปกรณ์วัด Particle size analyzer (Malvern Master 2000) [8] เป็นต้น รวมถึงอ่านค่ากระแสไฟฟ้าและค่าพีเอชที่ระยะเวลาต่างๆ ทั้งนี้ ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

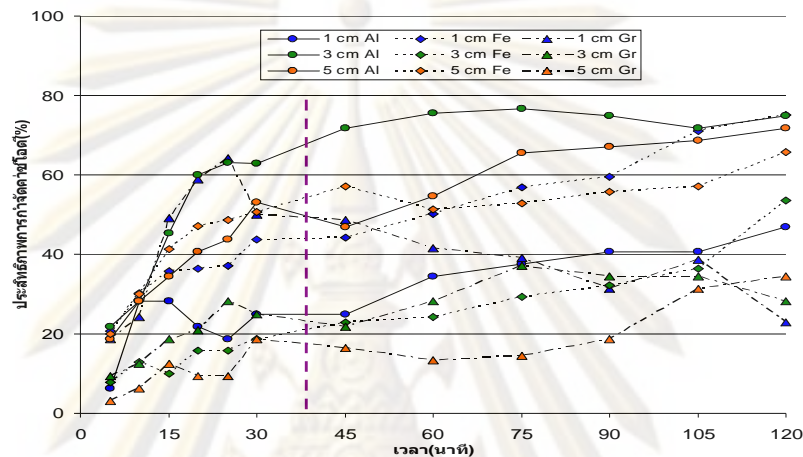
$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัด (\%)} = \frac{\text{COD}_0 - \text{COD}}{\text{COD}_0} \times 100 \% \quad (1)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การศึกษากระบวนการทางไฟฟ้า

รูปที่ 2 แสดงผลของประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการเดินระบบแบบที่ละเทที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ด้วยการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิดที่มีระยะห่างที่แตกต่างกัน (1, 3 และ 5 เซนติเมตร)

พบว่าสามารถพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (Reactive phase) จะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มตามเวลาอย่างรวดเร็วเนื่องจากในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยามีความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันสูงประกอบกับฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยดักจับให้อนุภาคน้ำมันสามารถลอยขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นจะเกิดส่วนคงที่ (Steady phase) เมื่อระยะเวลาการบำบัดมากกว่าโดยเฉลี่ยประมาณ 30 นาที ซึ่งจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากการลดลงของจำนวนอนุภาคน้ำมันซึ่งทำให้ปริมาณการสลายตัวของขี้ไฟฟ้าไม่มีผลต่อการบำบัดซีโอดี [3]



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัด

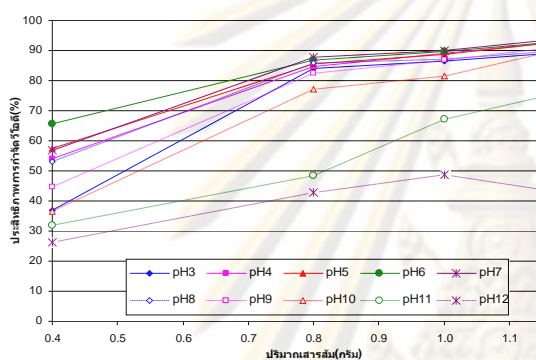
เมื่อพิจารณาผลกระทบจากชนิดของขี้ไฟฟ้าจะพบว่า การใช้อะลูมิเนียมเป็นขี้ไฟฟ้าซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาก่อนข้างสูงเมื่ออยู่ในน้ำ [9] โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสขึ้นทำให้ขี้ไฟฟ้าอะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายน้ำในรูปไอออน Al^{3+} ส่วนที่ขี้ไฟฟ้าแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเกิดผลึกไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมที่ไม่ละลายน้ำที่สัมพันธ์กับกลไกการสร้างผลึกเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาจับ (Sweep Coagulation) เพื่อให้เกิดเป็นฟlocsขนาดใหญ่และสามารถถูกกำจัดโดยกระบวนการทำให้ลอยตัว (Flotation process) ด้วยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขี้ไฟฟ้าแคโทด ซึ่งทำให้สามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้มากที่สุดโดยมีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 60-70% ในขณะที่การใช้เหล็กเป็นขี้ไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาที่ขี้ไฟฟ้าแอโนดและแคโทดคล้ายกับการใช้ขี้ไฟฟ้าอะลูมิเนียม แต่พบว่าสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้น้อยกว่าซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความว่องไวในการทำปฏิกิริยาซึ่งแปรผกผันกับมวลโมเลกุล (มวลโมเลกุล: Al = 26.98 และ Fe = 55.85 กรัมต่อโมล) โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดระหว่าง 50-60% ส่วนการใช้แกรไฟต์เป็นขี้ไฟฟ้าพบว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสที่ขี้ไฟฟ้าแอโนดจะไม่เกิดการแตกตัวเนื่องจากมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้น้อยจึงไม่มีไอออนของโลหะช่วยในการรวมตะกอนแต่จะเกิดฟองก๊าซออกซิเจนทดแทนและขี้ไฟฟ้าแคโทดจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งฟองก๊าซทั้งสองชนิดจะช่วยในกระบวนการลอยตะกอนทาง

ไฟฟ้า (Electro-Flotation) ดังนั้น การเลือกใช้ขั้วแกรไฟต์จึงสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้น้อยที่สุด (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 20 - 40%)

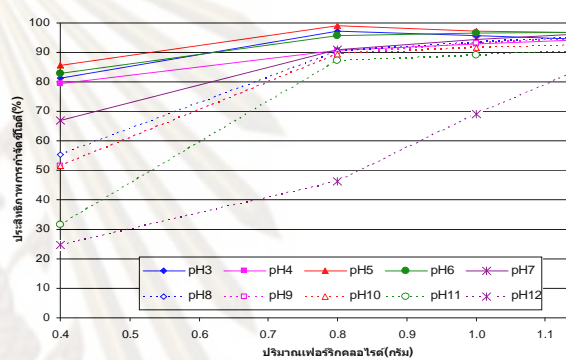
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างในการวางขั้วไฟฟ้าต่อค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ (สนามไฟฟ้า = ศักย์ไฟฟ้า/ระยะห่างระหว่างขั้ว) จะพบว่าเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลง [3] และจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพในการบำบัด โดยพบว่า การวางขั้วไฟฟ้าที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร จะเกิดฟองก๊าซจำนวนมากจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area) สูงทำให้สามารถดักจับอนุภาคน้ำมันได้มากขึ้น [7] เห็นได้จากค่าประสิทธิภาพการบำบัดกรณีที่ใช้ขั้วแกรไฟต์ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่เหลือ อย่างไรก็ตาม พบว่าขั้วแกรไฟต์มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะคือเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สำหรับการใช้อะลูมิเนียมพบว่า มีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าขั้วแกรไฟต์ โดยเฉพาะที่เวลาการบำบัดสูงๆ เมื่อทดลองที่ระยะห่าง 3 และ 5 เซนติเมตร ทั้งๆ ที่ระยะห่างดังกล่าวมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่าและมีเพียงก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดเท่านั้น ทั้งนี้ กล่าวได้ว่าผลลัพธ์ดังกล่าวน่าจะเป็นผลมาจากการละลาย Al^{3+} ที่ช่วยในการทำลายเสถียรภาพ การรวมตะกอน และถูกแยกออกด้วยการทำให้ลอยตัว (ดังที่กล่าวถึงข้างต้น) โดยที่สภาพความปั่นป่วน (Turbulent condition) ภายในเฟสน้ำเสียจากจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ค่าสนามไฟฟ้าสูงๆ นั้น (ระยะห่าง 1 เซนติเมตร) ส่งผลเสียต่อเกาะติดระหว่างอนุภาคน้ำมันและฟองก๊าซ ในขณะที่สนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำเกินไป (ระยะห่าง 5 เซนติเมตร) ก็ไม่เหมาะสมในด้านการกวนผสมหรือสร้างสัมผัสอย่างทั่วถึงภายในระบบ ดังนั้น ระยะห่าง 3 เซนติเมตร จึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในกรณีของขั้วอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตาม ในกรณีของขั้วเหล็กซึ่งไอออน Fe^{3+} มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า Al^{3+} นั้น อาจมีข้อจำกัดในด้านการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของประจุ Fe^{3+} ดังนั้น ระยะห่าง 1 เซนติเมตรจึงให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด เนื่องจากระบบได้ข้อดีทั้งจากการมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงและความเข้มข้นของไอออน Fe^{3+} ในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันที่มีความคงตัวในปริมาณที่เหมาะสม โดยสรุป เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุด จากงานวิจัยนี้พบว่า ควรเลือกใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กไว้ที่ระยะห่าง 3 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยที่ค่าดังกล่าวจะนำมาใช้เพื่อทำการทดลองต่อไปเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าศักย์ไฟฟ้าของระบบต่อไป ส่วนขั้วแกรไฟต์เนื่องจากเป็นกระบวนการลอยตะกอนทางไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมกับการจัดการอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่และมีความหนาแน่นสูง รวมถึงไม่เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพ ดังนั้นจึงไม่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป

2. การศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าเทียบกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์ด้วยวิธีจาร์เทสต์

ในส่วนนี้ วิธีจาร์เทสต์จะถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคน้ำมันคงตัวที่แขวนลอยในน้ำเสีย โดยประกอบด้วยสองกลไกหลักคือ ส่วนแรกจะเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยการเติมสารเคมีลงในถังกวนเร็วซึ่งจะช่วยในการกระจายตัวของสารเคมีและการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมัน ส่วนที่สองจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงโดยการกวนช้า ซึ่งตะกอนจะรวมกันเป็นฟล็อกและตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบกระบวนการทางไฟฟ้ากับกระบวนการทางเคมีทั่วไป โดยรูปที่ 3 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงพีเอช 3 - 12 และปริมาณสารเคมี (สารส้มและเพอร์ริคโคลไรด์) 0.4 - 1.2 กรัม/ลิตร



(3a)



(3b)

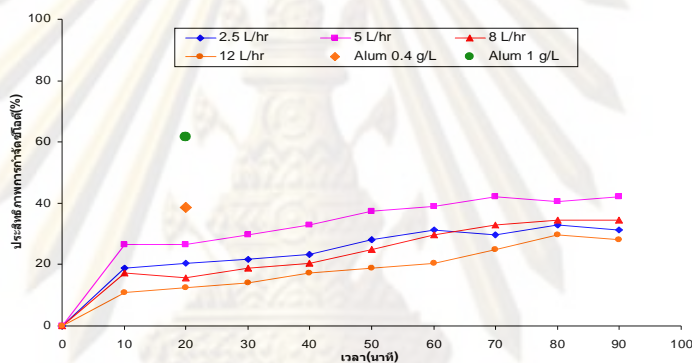
รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชและปริมาณสารเคมีต่างๆ

จากการทดลองพบว่าปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมคือ 1 กรัม/ลิตร โดยที่สารส้มจะทำงานได้ดีในช่วงพีเอชเริ่มต้น 6 - 7 (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 85%) ส่วนเพอร์ริคโคลไรด์จะทำงานได้ดีในช่วงพีเอชเริ่มต้น 5 - 6 (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 90%) ดังแสดงในรูปที่ 3a และ 3b ตามลำดับ ทั้งนี้การเติมเพอร์ริคโคลไรด์จะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าเนื่องจากฟล็อกที่เกิดจากสารส้ม (เป็นปุยสีขาว) มีความชอบน้ำมากกว่าฟล็อกที่เกิดจากเพอร์ริคโคลไรด์ (อัดตัวกันแน่นและมีขนาดใหญ่) [10] นอกจากนี้ กล่าวได้ว่าการบำบัดทางเคมีด้วยวิธีจาร์เทสต์ซึ่งมีการเติมสารเคมีลงน้ำเสียโดยตรงที่ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมจึงให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูง (90%) กว่าบำบัดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า (80%) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยอาจมีสาเหตุจากการเพิ่มสูงขึ้นของค่าพีเอชของเฟสน้ำเสีย รวมถึงการละลายของไอออนจากขั้วไฟฟ้าที่อาจมีค่าต่ำกว่า 1 กรัม/ลิตรเมื่อประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้า

3. การศึกษาการประยุกต์ใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีความคงตัวสูง

โดยทั่วไป วัสดุที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์นั้น ควรเลือกวัสดุที่ชอบน้ำมันหรือมีความไม่ชอบน้ำ (Oleophilic or Hydrophobic material) ซึ่งชอบที่จะให้น้ำมันเกาะมากกว่าน้ำ และเกิดการยึดเกาะของน้ำมันที่ผิวของตัวกลางมีค่าสูงจึงสามารถรวมตัว

กันได้ดีก่อนที่จะหลุดออกจากชั้นตัวกลาง โดยในการทดลองนี้เลือกใช้เส้นใยกรองน้ำตุ้ปลาที่ทำจากโพลีเอสเตอร์ (Polyester base) มีค่ามุมสัมผัสระหว่างตัวกลางกับเม็दन้ำมัน 87.88 องศา [6] และจากการทดลองพบว่า ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเดินระบบคือ 5 ลิตร/ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 25-40% ทั้งนี้ ค่าอัตราการไหลที่ได้สัมพันธ์กับความเร็วในการไหลผ่านตัวกลางที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ กล่าวคืออยู่ในช่วง 0.83 – 2.18 มิลลิเมตรต่อวินาที [11] เนื่องจากที่อัตราการไหลดังกล่าวส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการชนและการเกาะติดระหว่างตัวกลางและอนุภาคน้ำมันที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราการไหลมีค่าที่ต่ำเกินไปจะทำให้อนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่แบบบราวเนียนและเกิดการชนกันเองน้อยลง ในขณะที่ถ้าอัตราการไหลสูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนภายในตัวกลางซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคน้ำมันจึงเกิดการแตกตัวและหลุดออกจากตัวกลางได้ง่าย โดยที่สภาพการทำงานทั้งสองกล่าวได้ว่าส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ [11]



รูปที่ 4 อัตราการไหลของน้ำเสียและการเติมสารส้ม

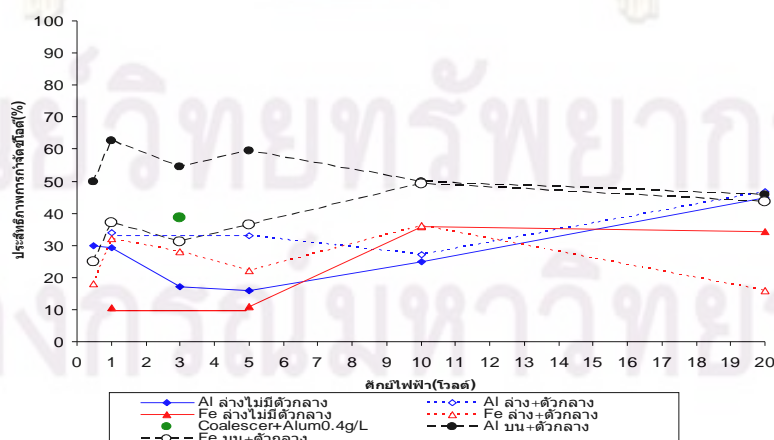
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการเดินระบบร่วมกับการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 0.4 และ 1 กรัม/ลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากโคแอกกูแลนชันที่มีผลต่อการทำลายเสถียรภาพในกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ (Charge neutralization) และกลไกการห่อหุ้มคอลลอยด์ (Sweep coagulation) ของอนุภาคน้ำมัน [5] โดยการเติมสารส้มในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ 0.4 กรัม/ลิตร (ความเข้มข้นต่ำ) มีผลทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันโดยมีสารส้มเป็นตัวเชื่อมทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยสูผิวน้ำอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและส่วนที่เหลือจะลอยขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะที่การเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร (ความเข้มข้นสูง) อนุภาคน้ำมันจะจับตัวกับสารส้มเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่และติดค้างอยู่ที่ตัวกลางซึ่งทำให้เกิดกลไกการกรอง (Filtration mechanism) รวมถึงปัญหาการอุดตันภายในชั้นตัวกลาง (Media clogging) ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของการเติมสารส้มในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์คือ 0.4 กรัม/ลิตร เนื่องจากทำให้เกิดตะกอนขึ้นที่ตัวกลางในปริมาณต่ำ รวมถึงไม่เกิดผลเสียจากการกรองที่ทำให้มีการรวมของอนุภาคน้ำมันลดลงและเกิดการอุดตันขึ้นที่ตัวกลางได้ [6] ทั้งนี้ จากการทดลองข้างต้นทำให้ทราบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าแล้วจะเกิดการละลายลงน้ำ ซึ่งสามารถ

เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวสูง ในขณะที่การใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ส่งผลดีทำให้อนุภาคน้ำมันที่ไหลผ่านชั้นตัวกลางเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ รวมถึงการเติมสารส้มเพื่อเป็นสารโคแอกกูแลนทนั้น ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้น ในส่วนต่อไปจะเป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้า (วางขั้วไฟฟ้าด้านล่าง) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เพื่อลดความยุ่งยากในการเติมสารเคมีในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ซึ่งน่าจะส่งผลดีต่อค่าการบำบัดและการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวสูงในอนาคต

4. การศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ในส่วนนี้ การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าจะทำการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (แอโนดและแคโทด) ซึ่งจะเป็นเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นและส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าวถูกทำลายเสถียรภาพ โดยในขั้นตอนงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำที่สุด (ค่าศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์) [12] สำหรับเดินระบบบำบัดเพื่อศึกษาจลนศาสตร์และวิเคราะห์หาระยะเวลาที่สภาวะคงตัว (Steady state Time) สำหรับนำไปใช้วิเคราะห์ผลกับความต่างศักย์อื่นๆ ในการหาค่าซีโอดีและนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพที่สภาวะคงตัว โดยจากการทดลองพบว่า เวลาที่เหมาะสมคือ 70 นาทีซึ่งค่าดังกล่าวจะนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ผลในกรณีอื่นๆ ต่อไป

รูปที่ 5 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในกรณีที่เกิดระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) การวางขั้วไฟฟ้าไว้บริเวณด้านล่าง (ไม่มีตัวกลาง) 2) การวางขั้วไฟฟ้าด้านล่างร่วมกับตัวกลางโคอะเลสเซอร์ และ 3) การวางขั้วไฟฟ้าด้านบนร่วมกับตัวกลางโคอะเลสเซอร์ โดยประยุกต์ใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ รวมถึงเปรียบเทียบผลที่ได้กับกระบวนการเติมสารโคแอกกูแลนท (สารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร) ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกรณีวางขั้วไฟฟ้าด้านล่างแบบมีตัวกลางกับไม่มีตัวกลาง

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการวางขั้วไฟฟ้าด้านบนร่วมกับตัวกลางโคอะเลสเซอร์พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดกว่า 2 เท่า (60%) เมื่อเลือกใช้ขั้วอะลูมิเนียมและเดินระบบที่ ค่าความต่างศักย์ต่ำๆ โดยกล่าวได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้สัมพันธ์กับกลไกการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า (Electrostatic coalescence process) ซึ่งเป็นการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้ากำลังต่ำซึ่งจะให้ประจุลบของกระแสอิเล็กตรอน จำนวนน้อยกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปนเปื้อนสูง (โดยทั่วไปพบที่บริเวณด้านบนของ คอลัมน์โคอะเลสเซอร์) เพื่อให้ประจุลบของสารลดแรงตึงที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคน้ำมันจะ เกิดการเคลื่อนที่เข้าไปรวมตัวกัน ซึ่งทำให้เกิดบริเวณพื้นผิวที่มีความเข้มข้นของประจุที่ลดลง และเป็นการเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น[3] ทั้งนี้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่เกิดขึ้นกับกรณีของขั้วเหล็กซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าเนื่องมาจาก ระยะห่างที่เลือกใช้ 1 เซนติเมตร

สรุป

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับการใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ พบว่า ควรเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมวางที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้าต่ำในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง โดยที่การวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนจะให้ค่า ประสิทธิภาพการบำบัดสูงและมีวงน้ำมันลอยอยู่ด้านบน

ในอนาคตควรมีการนำชนิดขั้วไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าที่ดีที่สุดมาประยุกต์ใช้ใน กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์เพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน โดยจะศึกษาในกรณี ของการเวียนน้ำกลับน้ำเสียเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด ซึ่งคาดว่าประสิทธิภาพในการบำบัด และน้ำมันที่ถูกแยกออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น รวมทั้งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2552 ขอขอบพระคุณ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษาและ ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wanichkul B. 2000. Comparison of ultrafiltration and distillation processes for treatment of cutting oil emulsion. Doctoral dissertation. Department of Environment The Institut National des Sciences Appliquees of Toulouse.
- [2] Aurelle Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok : Chulalongkorn.
- [3] 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.
- [4] Bensadok K., Benammar S., Lapique F. and Nezzal G. 2008. Electrocoagulation of cutting oil emulsion using aluminium plate electrode. *Journal of Hazardous Materials*. 152: 423-430.
- [5] ประจักษ์ ศาสตรเวช. 2551. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิวิจอร์โฟลเทชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] กชกร ก้องกังวาลย์. 2552. การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] Painmanakul P. and Hébrard G. 2008. Effect of different contaminants on the β -factor: Local experimental method and modeling. *Chemical Engineering Research and Design*. 86: 1207-1215.
- [8] Chooklin C. 2004. Removal of stabilized oil in wastewater emulsion by induced air flotation. Chulalongkorn University., Bangkok.
- [9] วรชวรณ เทียงวรรณกานต์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใส่กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] Al-Shamrania A.A., Jamesa A. and Xiaob H. 2002. Destabilisation of Oil-Water Emulsions and Separation by Dissolved Air Flotation. *Water Research*. 36: 1503-1512.
- [11] Li J. and Gu Y. 2005. Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. *Separation and Purification*. 42: 1-13.
- [12] Ichikawa T. 2007. Electrical demulsification of oil-in-water emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 302: 581-586.

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ภาคผนวก ค-2 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Treatment of oily wastewater by Modified Induced Air Flotation process (MIAF)

Sutsiri Titasupawat, Prajak Sastaravet, Kotchakorn Kongkangwarn
and Pisut Painmanakul*

Department of environmental engineering, Faculty of engineer, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

Abstract

The objective of this work is to study the treatment of oily wastewater containing 1 CMC anionic surfactant (oil in water emulsion with surfactant). The Modified Induced Air Flotation process (MIAF) which is the combined process between the IAF process and the coagulation process were applied and compared with the conventional Induced Air Flotation process (IAF). The results obtained in this study can provide a better understanding of the oily wastewater treatment mechanism in terms of the bubble hydrodynamic parameters and also the chemical dosages in order to achieve good quality flotation process.

The study has shown that the removal efficiency, considered in terms of COD, was related to the alum concentration, pH value, gas flow rate and bubble hydrodynamic parameters (bubble size, bubble rising velocity and its formation frequency). Furthermore, the calculated interfacial areas have been proved to be a very important parameter that affects the overall oil treatment efficiency. Apart from enhance the interaction between air bubbles and oil particles, the increased interfacial area can also provide the enough energy in chemical mixing for the MIAF process.

Keywords: Oily wastewater, Surfactant; Modified Induced Air Flotation; Coagulation;
Interfacial area

1. Introduction

Oily wastewater generated by various industries and afterward discharged into the natural environment can create a major environmental problem throughout the world. This wastewater occurs most frequently in a form of oil-in-water emulsion with surfactants. Under these conditions, the oil phase may go into emulsion spontaneously giving a very stable emulsion called stabilized emulsion: it is therefore difficult to treat by the sedimentation, biological and filtration processes (gravity separation) [1].

Flotation is one of the well-known methods for treating the oily wastewater by using the air bubbles in order to reduce the density of the oil droplets and increase the efficiency of the separation process [2]. In general, the Flotation process can be divided into two types: Dissolved Air Flotation (DAF) and Induced Air Flotation (IAF). For the commonly applied process (DAF), the bubbles (30–100 μm in diameter) are formed by a reduction in pressure of water pre-saturated with air at pressures higher than atmospheric. Moreover, for the IAF process, the bubbles (700–1500 μm in diameter) can be mechanically formed by a combination of a high-speed mechanical agitator or an air injection system. Due to the disadvantages of the DAF process (investment cost, complex operations, equipment size), the IAF process has been chosen as the interesting point in this study.

Normally, the IAF process has been found to be very effective when the feed is correctly conditioned with respect to pH control and chemical addition. Moreover, the use of larger bubbles generated by this IAF process can provide the much more compact flotation systems, provided proper surface chemistry of the particles or flocs to be floated and also the energy for mixing between fine pollutant and added chemical substances. From the study of [3-6], the essential factor of IAF process, like 1) bubble size, 2) solid phase presence in water, 3) the viscosity of water phase, 4) the equipment or reactor used in operation, 5) type of destabilization agents, and 6) the type and quantity of chemical coagulants or flocculants, have been taken in account. In addition, [7] have found that the treatment efficiency has been altered by the bubble contact time and thus the bubble size generated. However, understanding the removal efficiency of the IAF process in terms of collision and contact phenomena between air bubble and oil

droplets has been proved to be very difficult due to the complexity of bubble movement in the flotation process.

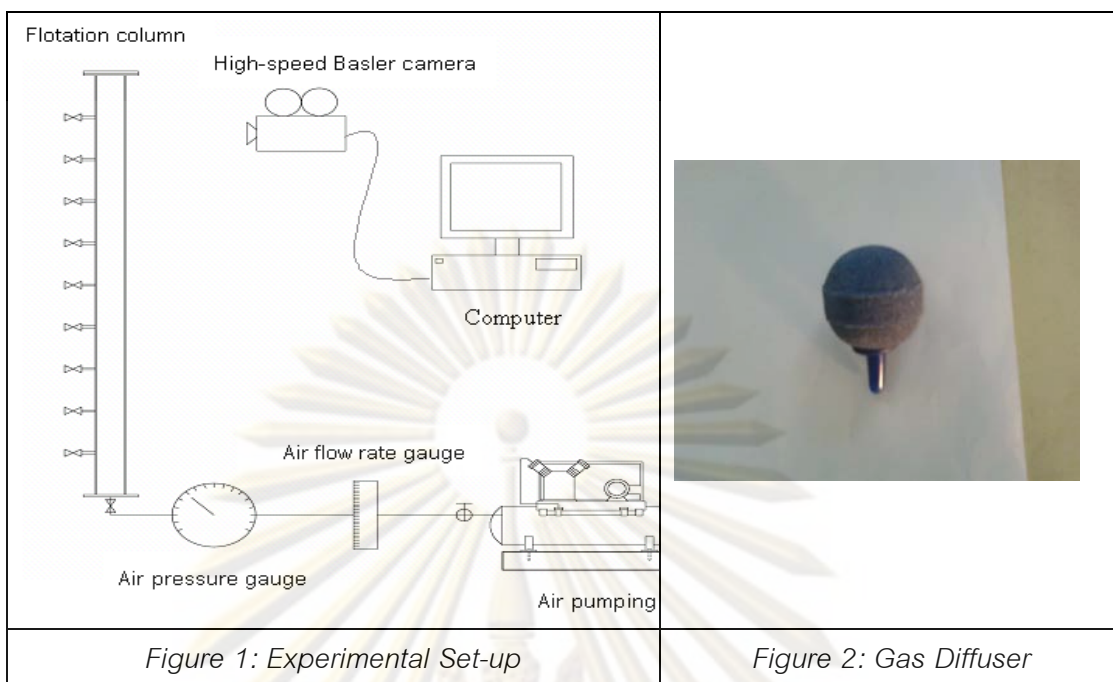
Based on the literature reviews about oily wastewater treated by the IAF process, it can be noted that the efficiencies of this process have been depended on various parameters. However, it can be expressed that there are two main important factors: 1) how to create the collision between air bubble and oil droplets and 2) possibility of attachment and detachment between these two phases. Therefore, the bubble hydrodynamic parameters (bubble size, bubble formation frequency and their rising velocity and thus interfacial area), that corresponds to the collision and attachment/detachment of bubble and oil droplet, are interesting to be considered in order to understand the obtained treatment efficiency.

To fill this gap, the object of this work is to study the treatment emulsion with surfactants by using the IAF process, together with the coagulation process called Modified Induced Air Flotation (MIAF). The local method for determining the bubble hydrodynamic parameters will be applied. Moreover, this study can be probably applied to consider the relation of the interfacial area obtained with generated bubbles and also their mixing ability onto the obtained treatment efficiency.

2. Materials and Methods

2.1 Experimental Set-up

Figure 1 presents the floatation process used in this study consisting of: 1) air compressor, 2) gas flow meter (New Flow 0.2-2 L/min), 3) manometer (Nuova Fima 0-1 Bar), 4) gas diffuser (figure2), 5) sampling point, 6) flotation column with 0.05 m. in diameter and 2 m in height (loading with oily wastewater 3 liters per batch), 7) effluent point, 8) high-speed camera (Basler camera with 100 images per second), and 9) set of computer for acquiring and analyzing the bubble hydrodynamic parameters (Pylon Store and Bubble Measuring Program).



2.2 Chemicals and Wastewater Preparation

The chemical agents used in this experiment were as following: Alum as coagulant and the COD analysis reagent (APHA, AWWA and WEF, 1998) [8]. Due to the pH adjustment, Sodium Hydroxide 0.01 N (Ajax Finechem Australiz) and Sulfuric Acid 0.5 N (Vol.Chem.VSA) have been used. In addition, Synthetic oily wastewater has been prepared from the solution of tap water with palm oil (Morakot Public Company LTD.) at concentration 10,000 mg/L and anionic surfactant (Sodium Lauryl Sulphate of Carlo Erba Co., Ltd) at concentration 0.001 mole/L (1 CMC). For this experiment, Synthetic oily wastewater has been mixed at 300 rpm for 5 minutes [1].

2.3 Parameter Determination Method

Oily wastewater removal efficiency

In this work, the amount of oily wastewater was analyzed by the values of COD in a function of time. Noticeably, the Chemical oxygen demand (COD) measurements were carried out by using the dichromate reflux method. The removal efficiency (%Eff) can be calculated by;

$$\% \text{Eff} = \frac{\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}}}{\text{COD}_{\text{in}}} \quad (1)$$

Bubble hydrodynamic parameters and interfacial area [10]

The bubble generation diameters were photographed with a Basler camera (100 images/s). Then, the images were visualized and analyzed on the acquisition computer through the associated vision software. Note that, in order to get statistically significant distribution, the average bubble diameter (d_B) presented in this study is deduced from the measurement of 150–200 bubbles. Moreover, the bubble formation frequency (i.e. the number of bubbles formed at the membrane orifice per unit time) is determined as [9]:

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} \quad (2)$$

where V_B is the average detached bubble volume and Q_G is the gas flow rate measured using the soap film meter. Thanks to the image treatment system, the terminal rising bubble velocities, U_B , can be estimated as the distance covered by the bubble between two frames.

$$U_B = \frac{\Delta D}{T_{\text{frame}}} \quad (3)$$

where ΔD is the bubble spatial displacement between $t = 0$ and $t = T_{\text{frame}} = 1/100$ s. As in [3], the interfacial area is a function of the bubble formation frequency, the terminal bubble rising velocity and the generated bubble diameter. It can be expressed as [9]:

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{\text{TOTAL}}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{S_B}{V_{\text{TOTAL}}} \quad (4)$$

Velocity Gradient (G) [10]

In this study, the Velocity Gradient (G) has been calculated in order to analyze the turbulence or mixing phenomena in the IAF and MIAF processes and also to compare those obtained with the jar test. The value of G can be calculated by following equation:

$$G = \left(\frac{P}{\mu_L \cdot V_L} \right)^{0.5} \quad (5)$$

Where, μ_L is the water sampling viscosity, V_L is the water volume in system and P is the energy use in mixing process [9].

3 Results and Discussion

3.1 Induced Air Flotation Process (IAF)

Figure 3 presents the removal efficiency of emulsion with anionic surfactant by using the IAF process as a function of time, for different gas flow rates.

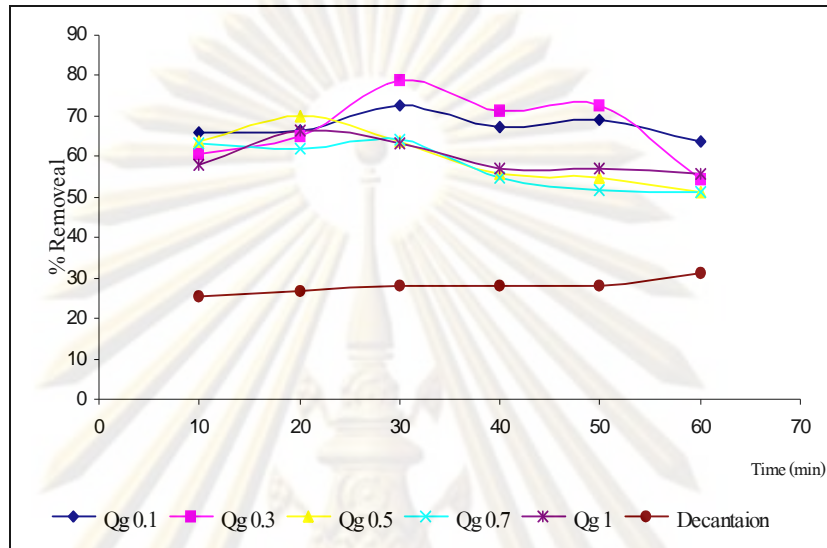


Figure 3: Removal Efficiency in Function of Time for Different Gas Flow Rates

As shown in Figure 3, it can be found that the removal efficiency obtained with the IAF processes (60-80%) are greater than those obtained with the decantation process (about 28%). These results confirm that the generated bubbles interact with the oil droplets and act like “rising parachutes” for oil droplets. Moreover, the maximum efficiencies (80%) are investigated at 0.3 L/min for gas flow rate and at 30 minutes for operation times, and then the efficiencies have been started decreasing with time. In this study, whatever the gas flow rate, three zones can be found on the variation of the removal efficiency with operating time.

1. Free surface zone: In this zone, the oil droplets have the available free surfaces for interacting with the generated bubbles. Moreover, the removal efficiencies are about 60-70% for whatever the gas flow rate. Therefore, it can be noted that there is a little effect of gas flow rate and also the aeration time in this zone.
2. Attachment zone: In this second zone, the highest efficiencies can be observed. The removal efficiencies obtained depend on the gas flow rates used in this experiment. The largest and smallest removal efficiencies are obtained with the

gas flow rates at 0.3 L/min and 0.7 L/min, respectively: turbulent nature (energy) of bubble generation phenomena is probably responsible for reducing the contact time between oil droplets and bubbles and thus the removal efficiency. Therefore, it can be expressed that the coalesced mechanism becomes the important factor, in this zone, in order to remove the oil droplets to the surface of water.

3. Breaking zone: In this last zone, the removal efficiencies obtained experimentally start to be decreased due to the breaking phenomena, at the surface of water, of the oil/bubble aggregates formed in the attachment zone. Moreover, it can be found that beginning point of this zone depends on the gas flow rate used in this experiment: the smallest beginning point is obtained with the highest gas flow rate. Therefore, it is not necessary, in practice, to operate the IAF process with the very high gas flow rate and also for long aeration time.

3.2 Optimum Dosage and pH for Using Alum as Coagulants (jar test experiments)

In this part, the jar test apparatus with six stirrers was used. The effect of coagulant dosage (Alum) was analyzed by varying the weight dosage of coagulant with 100 rpm for 1 minute rapid mixing time, then 30 rpm for 20 minutes slow mixing time and 1 hour for sedimentation time at different pH values. Figure 4 shows the variation of the removal efficiency of emulsion with anionic surfactant with the alum concentration for the different pH values tested by Jar test experiments.

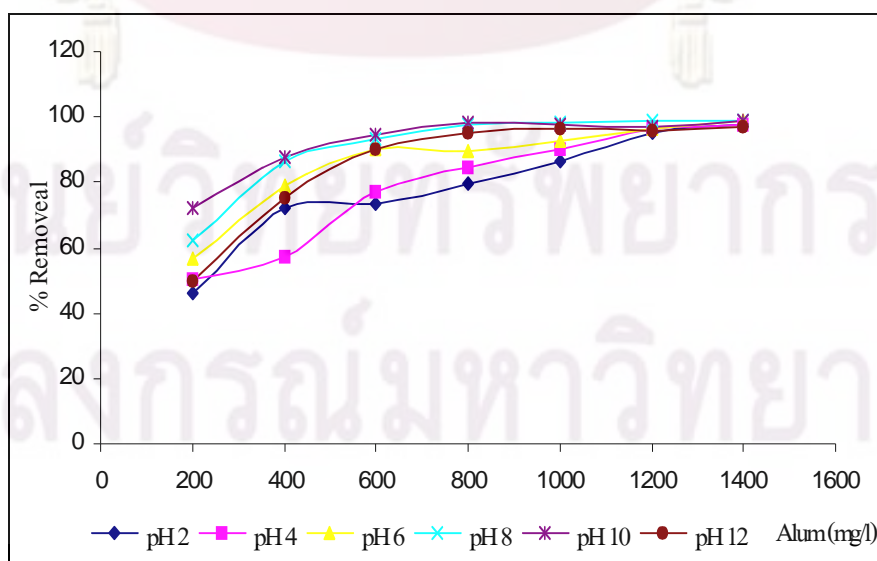


Figure 4: Removal Efficiency versus Alum Concentration for Different pH Values

As shown in Figure 4, it can be found that the removal efficiencies increase with the alum concentrations. The optimum pH resulting in the highest removal efficiency was observed between the values of 8–10. Moreover, at an optimum pH value of 8, the optimum dosage for alum to cause a removal efficiency of 99% in COD values of the oily wastewater with anionic surfactant was 1400 mg/l. These high concentrations of alum required in this experiment can be explained based on the destabilized mechanism (sweep floc coagulation) and also the charge density: alum has a quiet low charge density compared to the other coagulants (chitosan) [10-11].

By comparing the performance of the IAF process (Figure 3) and the jar test experiments (Figure 4), it can be noted that the removal efficiencies obtained jar test experiments (chemical treatment process) are greater than those obtained with the IAF process. However, the disadvantage of the chemical process is that long operation times (rapid/slow mixing and sedimentation) are needed, in addition, with the optimum dosage and pH value.

3.3 Modified Induced Air Flotation (MIAF process)

Since the IAF and chemical treatment processes were the effective method for treating the oily wastewater with anionic surfactant, their combined influence (MIAF) was studied in subsequent the results obtained with the IAF process and with the jar test experiments. The optimum gas flow rate and pH values for using alum were 3 L/min and 8, respectively.

Figure 5 presents the removal efficiency of oily wastewater with anionic surfactant by using the MIAF process as a function of time for different alum concentrations. Furthermore, the results obtained will be also compared with those obtained with the IAF and the jar test experiments.

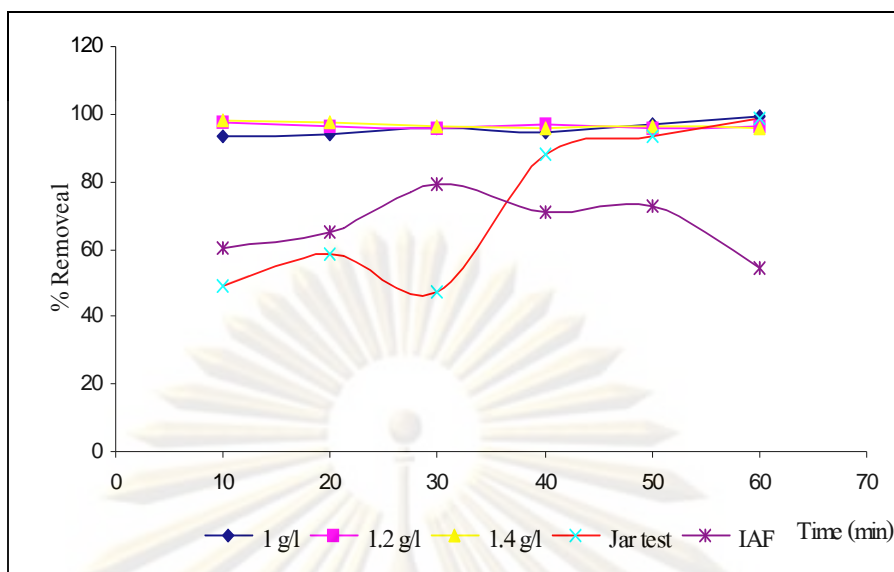


Figure 5: Removal Efficiency in Function of Time for Different Alum Concentrations and Compared with Those Obtained with IAF and Jar Test Experiments.

As shown in Figure 5, the removal efficiencies obtained with the MIAF process are greater than those obtained with the IAF process. These results can be explained that sizes of oil droplets increase due to the sweep floc coagulation from the presence of alum concentrations and thus accelerate the separation in flotation process. Besides, it can be found that there is small effect of alum concentration (1000-1400 mg/L) on the removal efficiencies: minimum and maximum values are equal to 93.26% and 99.08%, respectively. Therefore, fewer amounts of coagulants obtained with the jar test experiments can be possibly applied in order to achieve the same removal efficiencies. In addition, the operation time for the MIAF process (10 minutes) is also shorter than that for the chemical treatment process (40 minutes). In order to compare the turbulence or mixing condition, the average velocity gradient (G) values of the MIAF and Jar test experiments are 175 and 160 s^{-1} , respectively. Therefore, it can be noted that bubble generated by gas diffuser can be used, not only in oil droplets separation to the surface of water, but also in chemical mixing in the MIAF process.

In conclusion, the advantages of MIAF process are: 1) shorten operation time, 2) economize the chemical cost, 3) save the mixing energy, and 4) reduce the equipment size. Additionally, it is obvious that the results observed in our small bubble column volume have to be validated into a tall bubble column and at higher gas flow rates-with different types of coagulants and also oily wastewater.

3.4 Bubble Hydrodynamic Parameters and Interfacial Area

In this part, the bubble hydrodynamic parameters (bubble size, bubble formation frequency and their rising velocity and thus interfacial area) will be studied in order to provide the better understanding of the variation of obtained removal efficiency from the IAF process. Figure 6 shows the relation between the detached bubble diameter (D_B) and the gas flow rate for the different alum concentration used in these experiments.

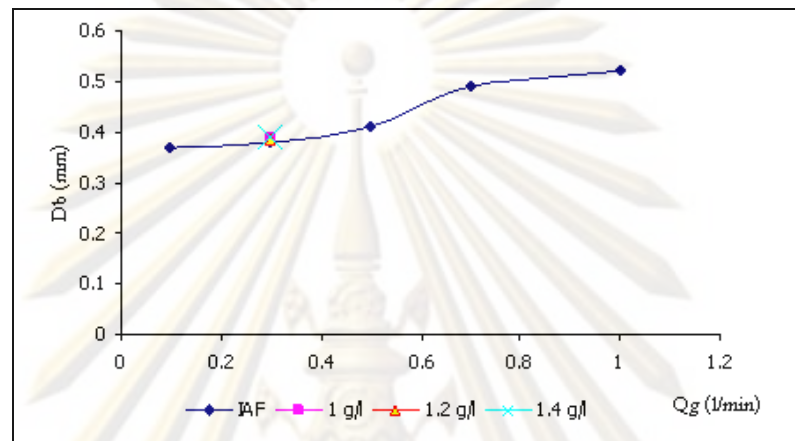


Figure 6: Bubble Size versus Gas Flow Rate for Different Alum Concentrations

As shown in Figure 6, the bubble diameters vary between 3.6 and 5.2 mm while gas flow rates can change between 0.1 and 1 ml/s. Moreover, the bubble sizes are roughly constant at low gas flow rate and then increase at high gas flow rate applied in the IAF process. As proposed by [12], the differences in terms of bubble diameters are directly linked to surface tension values and to their consequences on the balance between the surface tension and the buoyancy forces during the bubble growth and detachment from the diffuser orifice. However, at higher gas flow rate, the bubble diameter is no longer controlled by the forced balance at detachment, but rather by the power dissipated in the liquid, conditioning the bubble break up and coalescence phenomena. In addition, it can be noticed that the bubble sizes obtained in the liquid phase contaminated with different alum concentrations (MIAF) are closed to those obtained in tap water (IAF). These results mean that the presence of alum, even in the large quantities, can have little effects on the bubble size generated in the flotation process.

Over this bubble diameter range, the terminal rising bubble velocities (obtained experimentally) are nearly constant. They vary between 15 and 25 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ and are within

the range of the U_B values of Grace and Wairegi (1986) [13] corresponding to the pure systems. By using the experimental results of the bubble diameter (d_B) and the bubble rising velocity (U_B), the bubble formation frequencies (f_B) related to the gas flow rates can be calculated (Eq. 2). Then, the local interfacial area (a) can be determined. Figure 7 presents the relation between the interfacial area (a) and the gas flow rate for the different alum concentration used in these experiments.

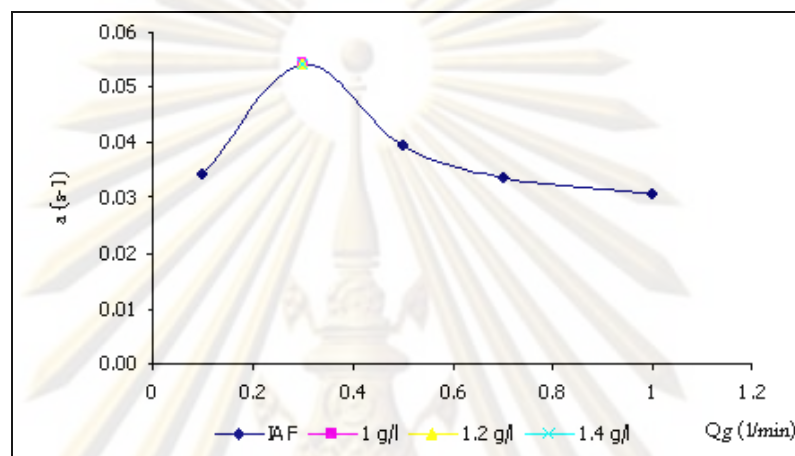


Figure 7: Interfacial Area versus Gas Flow Rate for Different Alum Concentrations

As shown in Figure 7, the interfacial areas vary between 0.032 and 0.055 m^{-1} while gas flow rates can alter between 0.1 and 1 ml/s. The small effect of alum concentrations on the interfacial areas has been again observed as shown previously in the results obtained with the variation of bubble sizes: the values of (a) are directly linked to the bubble diameter, bubble rising velocity and their formation frequency. In this study, the maximum of the a values can be found at the gas flow rate equal to 0.3 L/min which corresponds to the highest removal efficiency as shown in Figure 3. It can be thus expressed that the variation of the (a) values relates to the interacting opportunity between oil droplets and bubbles. Therefore, the bubble hydrodynamic condition and the interfacial area prove to be the important parameters to consider for attaining the good performance in the treatment of oily wastewater by the flotation process. However, at the same a value (0.055 m^{-1}), the removal efficiencies obtained with the IAF and MIAF processes are equal to 80% and 99%, respectively. As a result, not only the interfacial area controls the overall removal efficiency, but also the chemical dosages applied in the MIAF process can affect the associated performance.

In conclusion, the proper bubble hydrodynamic condition and chemical dosages are necessary to determine a good performance in terms of treatment efficiency and economic management of the Modified Induced Air Flotation (MIAF) process.

4. Conclusion

The objective of this work is to study the treatment of oil in water emulsion with anionic surfactant at concentration equal to 1 CMC. For this purpose, the Induced Air Flotation process (IAF) and Modified Induced Air Flotation process (MIAF) which is the combined process between the IAF process and coagulation process were applied. In this study, the following results have been obtained:

- The removal efficiency obtained with the IAF processes (60-80%) are greater than those obtained with the decantation process (about 28%): these confirm that the generated bubbles interact with the oil droplets and act like “rising parachutes” for oil droplets;
- Due to the variation of oily wastewater removal efficiency with time, three zones (free surface zone, attachment zone and breaking zone) can be defined;
- In jar test experiments, the removal efficiencies increase the alum concentrations. At an optimum pH value of 8, the optimal dosage for alum to cause a removal efficiency of 99% in COD values of the oily wastewater with anionic surfactant was 1400 mg/l;
- For the MIAF process, the removal efficiencies obtained are greater than those obtained with the IAF process. These results relate to the increased sizes of oil droplets due to the sweep coagulation form added alum and thus accelerate the separation in the flotation process;
- The bubble generated by gas diffuser can be used, not only in oil droplets separation to the surface of water, but also in chemical mixing in the MIAF process. Therefore, the advantages of MIAF process can be expressed as 1) shorten operation time, 2) economize the chemical cost, 3) save the mixing energy, and 4) reduce the equipment size;

- The bubble sizes obtained in liquid phase contaminated with different alum concentrations (MIAF) are closed to those obtained in tap water (IAF). Moreover, there is small effect of these contaminants on the bubble rising velocities and their formation frequencies, along with the calculated interfacial area;
- The interfacial area has been proved to be the important parameters to consider for attaining the good performance in the treatment of oily wastewater by the flotation process;
- The proper bubble hydrodynamic condition and also the chemical dosages are necessary to closely control in order to achieve a good performance in terms of treatment efficiency and economic management of the Modified Induced Air Flotation (MIAF) process.

In the future, it is interesting to study the effect of another type of surfactants presence in oily wastewater. It is essential to continue studying with different types of chemical substances and gas diffusers in order to extend the operating condition ranges. Moreover, it is obvious that the results observed in our small bubble column volume have to be validated into a tall bubble column and at higher gas flow rates with different types of coagulants.

Acknowledgement

This work was supported by a research grant from the Thailand Research Fund.

References

- [1] Aurelle, Y. 1985. Treatments of oil-containing wastewater. Chulalongkorn University., Bangkok
- [2] Jameson, G. J. Hydrophobicity and floc density in induced-air flotation for water treatment, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 151 (1999) 269–281
- [3] Da Rosa, J.J. and Rubio, J. The FF (flocculation–flotation) process. Minerals Engineering 18 (2005): 701–707.

- [4] Deng, S.D., Yu, G., Jiang, Z.P., Zhang, Z.H. and Ting.Y.P. Destabilization of oil droplets in produced water from ASP flooding. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 252 (2005): 113–119.
- [5] Meysami, B. and Kasaeian, A.B. Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation. *Bioresource Technology* 96 (2005): 303–307.
- [6] Rubio, J., Souza, M.L. and Smith, R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Mineral Engineering* 15 (2002): 139-155
- [7] Moosai, R. and Dawe, R.A. Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup. *Separation and Purification Technology*, Volume 33, Issue 3, 1 November 2003, Pages 303-314
- [8] Washington, DC : American Public Health Association .Standard methods for the examination of water and wastewater . prepared and published jointly by APH, 1998.
- [9] Painmanakul P., Loubire K., Hbrard G. and Buffire P. Study of different membrane spargers used in waste water treatment: characterization and performance. *Chemical Engineering and processing* (2004),1347-1359
- [10] Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater engineering treatment and reuse*. Singapore: McGraw-Hill, 2004
- [11] Ahmad, A.L., Sumathi S. and Hameed B.H. Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. *Chemical Engineering Journal* 118 (2006) 99–105
- [12] Painmanakul, P., Loubière, K., Hébrard, G., Mietton-Peuchot, M. and Roustan, M. Effects of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Science* 60 (2005), 6480–6491.
- [13] Grace, J.R. and Waire, T. Properties and Characteristics of drops and bubble, *Encyclopedia of Fluid Mechanic*, Cheremisnoff. Gulf Pub lishing Corporation, Huston, TX, 1986 Chapter 3, pp. 43-57

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์ เกิดวันที่ 4 พฤษภาคม 2528 สำเร็จการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2550 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย