

การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมัน
ออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว



นางสาวกชกร ก้องกังวาลย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF COALESCER FOR SEPARATION OF
OIL FROM WATER WITH SURFACTANT

Miss Kotchakorn Kongkangworn



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมัน
ออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว

โดย

นางสาวกชกร ก้องกังวาลย์

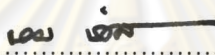
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

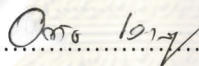
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

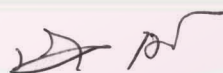
อาจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีณย์ เตชะเสน)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. บวรศักดิ์ วาณิชยกุล)

นางสาวกชกร ก้องกังวาลย์ : การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว. (IMPROVEMENT OF COALESCER FOR SEPARATION OF OIL FROM WATER WITH SURFACTANT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 184 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำบัติน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ โดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ชนิดเส้นใย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกการทำงาน ประสิทธิภาพและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ และความเป็นไปได้ในการนำเอาวัสดุราคาถูกและหาได้ง่ายมาใช้แทนตัวกลางที่มีการใช้งานทั่วไปในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ รวมถึงการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการวางตัวกลางแบบชั้นตอน การเติมสารเคมีและการประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิวิชแอโรเฟลเทชัน (IAF) จากการทดลองพบว่าตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลามีความเหมาะสมมากกว่าเส้นใยสแตนเลสเนื่องจากมีความไม่ชอบน้ำมากกว่า โดยมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 87.88 องศา นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของชั้นตัวกลางและอัตราการไหลของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุดได้จากการใช้เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง (ความเร็วการไหล 0.91 มิลลิเมตรต่อวินาที) เท่ากับ 44.37% จากการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ด้วยการเดินระบบแบบทีละเท พบว่าการเติมสารเคมีให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี 62.2% ส่วนการวางตัวกลางแบบชั้นตอน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี 52.46% และการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี 44.59 % โดยที่การเดินระบบแบบต่อเนื่องพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากการเดินระบบแบบทีละเทประมาณ 30% เนื่องจากมีระยะเวลาสำหรับการสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันน้อยกว่า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าถังปฏิกรณ์อีกครั้งเพื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสดังกล่าว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการหมุนเวียนน้ำ 50% สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้เล็กน้อย (10%) โดยที่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบำบัดหรือกักน้ำของระบบเป็นหลัก

ภาควิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต กชกร ก้องกังวาลย์

ภาควิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา : 2552.....

4970528521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : COALESCER / OILY WASTEWATER WITH SURFACTANT

Kotchakorn Kongkangworn : Improvement of Coalescer for Separation of Oil from Water with Surfactant. Thesis Advisor : Pisut Painmanakul Ph.D., 184 pp.

This research was to study the treatment of synthetic oily wastewater, 5,000 mg/l palm oil, and anionic surfactant (Sodium Dodecyl Sulphate, SDS) by fibrous bed coalescer, and the possibility of using the cheaper and more available material as coalescing bed. The concept of multi stage bed configuration, chemical addition, and induce air flotation (IAF) were applied in order to improve the conventional coalescer efficiency. The results showed that the plastic (aquarium) fiber, having contact angle of 87.88 degree, was more hydrophobic than stainless steel fiber. Bed height and wastewater flow rate were found to effect the overall efficiency of conventional coalescer. The highest COD removal efficiency (44.37%) was obtained by using 3.5 cm of bed height and 5 LPH flow rate. Combining various improving methods with the conventional coalescer in batch operation showed that the highest removal efficiencies obtained with chemical addition, multi stage bed configuration, and IAF processes were 62.2%, 52.46%, and 44.59%, respectively. The optimal operating condition based on various methods was applied to the continuous operation. The treatment efficiencies were decreased about 30% compared to batch operations because of lesser oil droplet interaction time. The recirculation of wastewater into reactor was found to increase the efficiencies by 10%. In conclusion, the operating or detention time is the most important parameter for controlling the treatment efficiencies in coalescer process.

Department : Environmental Engineering...

Student's Signature Kotchakorn K.

Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature Pisut P.

Academic Year : 2009.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน และดร. บวรศักดิ์ วาณิชกุล ที่กรุณาใช้เวลาตรวจสอบเล่ม
วิทยานิพนธ์และร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัย จนสำเร็จ
การศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ชาย ผู้กรุณาให้ทุนการศึกษา
ตลอดจนกำลังใจมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้
เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งานห้องปฏิบัติการและเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ พี่ม้อ พี่โรจน์ และพี่เอิร์ท สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำ
ดีๆ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่มี
ให้กันอยู่เสมอ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

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 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	4
2.2 กฎของสโตก (Stoke's law).....	10
2.3 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย.....	11
2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant).....	13
2.5 อุปกรณ์โคalesceเลอร์ (Coalescer).....	16
2.6 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกคูเลชัน (Flocculation).....	29
2.7 กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศ (Air Flotation).....	41
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	51
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	51
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	55
3.3 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	72

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	73
4.1 การเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์.....	73
4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลาง.....	77
4.3 การศึกษาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่ใช้ทั่วไป.....	81
4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	89
4.5 การเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	114
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	124
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	124
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	127
รายการอ้างอิง.....	129
ภาคผนวก.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	184

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ค่าการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส....	4
2-2	การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย.....	11
2-3	ผลกระทบของลักษณะสมบัติของอิมัลชัน.....	27
2-4	ผลกระทบของลักษณะสมบัติของเส้นใยตัวกลาง.....	28
2-5	ผลกระทบของเงื่อนไขการดำเนินการ.....	29
3-1	ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์ม บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ จำกัด มหาชน.....	54
3-2	ลักษณะสมบัติของ Sodium lauryl sulphate.....	54
3-3	ตัวแปรในการศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม.....	56
3-4	ตัวแปรในการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์.....	57
3-5	ตัวแปรในการหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง.....	61
3-6	ตัวแปรในการหาค่ามอดูลัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ.....	62
3-7	ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง.....	63
3-8	ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย.....	64
3-9	ตัวแปรในการศึกษาวิธีการวางตัวกลางแบบชั้นตอน.....	66
3-10	ตัวแปรในการศึกษาความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมโดยวิธีจาร์เทสต์.....	67
3-11	ตัวแปรในการศึกษาตำแหน่งของการเติมสารเคมีที่เหมาะสม.....	68
3-12	ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพของ อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	70
3-13	ตัวแปรในการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิวิชแอริโพลเทชัน.....	71
3-14	ตัวแปรในการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	72
3-15	สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	72
4-1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์.....	75
4-2	ลักษณะสมบัติของตัวกลางที่ทำการศึกษา.....	77
4-3	ตัวแปรจากการทดลองหยดน้ำผสม SDS ที่ความเข้มข้นต่างๆ บนเส้นใยกรอง น้ำตู้ปลา.....	77
4-4	ตัวแปรจากการทดลองหยดน้ำผสม SDS ที่ความเข้มข้นต่างๆ บนเส้นใย สแตนเลส.....	78
4-5	ตัวแปรจากผลการทดลองหาค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและตัวกลางทั้ง 2 ชนิด.	80

ตารางที่		หน้า
4-6	ตัวแปรจากผลการทดลองหาค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและตัวกลางทั้ง 2 ชนิด.....	80
4-7	ผลการคำนวณค่า G.T ของการเติมสารเคมีที่ตำแหน่งต่างๆ.....	98
4-8	ตารางสรุปขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังไหลผ่านตัวกลางและหลังตั้งให้ตกตะกอน 90 นาที.....	110
4-9	ตารางสรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของโคอะเลสเซอร์ที่ดีที่สุดของการประยุกต์แต่ละแบบ (อัตราการไหลน้ำเสีย 5 ลิตร/ชั่วโมง) และการตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 90 นาที.....	113
4-10	ค่า $\alpha \eta_T$ ของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการประยุกต์แต่ละแบบ.....	116



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	การผลักดันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารถแรงตึงผิว.....	6
2-2	ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำกับความเข้มข้น ของสารถแรงตึงผิว.....	7
2-3	การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารถแรงตึงผิวร่วม.....	8
2-4	การลอยตัวของหยดของเหลว A บนของเหลว B.....	8
2-5	โครงสร้างโมเลกุลของสารถแรงตึงผิว.....	14
2-6	แรงระหว่างโมเลกุลของสารถแรงตึงผิว.....	14
2-7	การทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	16
2-8	แบบจำลองการเคลื่อนย้ายของอนุภาคน้ำมันขณะเกิดการรวมตัวกันใน โคอะเลสเซอร์.....	18
2-9	แสดงค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองการเคลื่อนย้ายแต่ละแบบตามขนาดของ อนุภาคน้ำมัน.....	20
2-10	แสดงลักษณะการไหลของน้ำเสียอิมัลชันผ่านตัวกลาง.....	21
2-11	ลักษณะการทำงานของโคอะเลสเซอร์ที่มีตัวกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p และสูง H.....	22
2-12	การเปลี่ยนแปลงค่าyieldของโคอะเลสเซอร์ในฟังก์ชันของ $\alpha \eta_T$	23
2-13	เฟสต่างๆ ของการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันบนตัวกลาง.....	24
2-14	การแยกตัวของอนุภาคน้ำมันเมื่อผิวหยदन้ำมันหลุดออกจากตัวกลางมีลักษณะ ต่างกัน.....	25
2-15	การแยกตัวของอนุภาคน้ำมันในลักษณะเป็นสาย.....	26
2-16	โมเดลที่ใช้ในการอธิบาย Electric Double Layer Theory.....	30
2-17	ผลของการเติมอิออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับหยदन้ำมัน.....	31
2-18	การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของหยด น้ำมันด้วยกลไกแบบต่างๆ.....	32
2-19	ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มและค่าพีเอช.....	36
2-20	กลไกในการสร้างโคแอกกูแลชันด้วยสารส้ม.....	36
2-21	ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูแลชันด้วยสารส้ม.....	37

ภาพที่		หน้า
2-22	ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์ และเพอร์ริสคลอไรด์.....	39
2-23	การชนและเกาะติดของฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมัน.....	43
2-24	ลักษณะของอนุภาครวมของฟองอากาศและน้ำมัน.....	44
2-25	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	46
2-26	ตัวกลางแบบวงแหวนที่ใช้ในการศึกษา.....	48
2-27	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง.....	48
3-1	ถึงปฏิกิริยาสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	51
3-2	แผนผังแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง.....	52
3-3	ตัวกลางแบบเส้นใยที่ใช้ในการศึกษา.....	52
3-4	หัวเติมอากาศแบบหัวทรายที่ใช้ในการทดลอง.....	53
3-5	แผนผังแสดงการหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม.....	56
3-6	แผนผังแสดงการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์.....	57
3-7	แรงตึงผิวระหว่างน้ำ น้ำมัน และตัวกลาง.....	58
3-8	แรงตึงผิวระหว่างน้ำมัน ตัวกลาง และอากาศ.....	58
3-9	แรงตึงผิวระหว่างน้ำ ตัวกลาง และอากาศ.....	59
3-10	ตัวอย่างการหาค่า γ_{CG} ด้วยวิธีของ Zisman.....	59
3-11	แผนผังแสดงการหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง.....	60
3-12	แผนผังแสดงการหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ.....	61
3-13	แผนผังแสดงการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง.....	63
3-14	แผนผังแสดงการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย.....	64
3-15	แผนผังแสดงการศึกษาวิธีการวางตัวกลางแบบขั้นตอน.....	65
3-16	แผนผังแสดงการศึกษาความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมโดยวิธีจาร์เทสต์.....	67
3-17	แผนผังการศึกษาตำแหน่งของการเติมสารเคมีที่เหมาะสม.....	68
3-18	แผนผังการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพของ อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์.....	69
3-19	แผนผังการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิวิจแอริโพลเทชัน.....	70
3-20	แผนผังการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	71
4-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำเสียและค่าความเข้มข้นของ SDS.....	73

ภาพที่		หน้า
4-2	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์.....	75
4-3	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์.....	76
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับค่า $\cos \theta$ ของเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา.....	78
4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับค่า $\cos \theta$ ของเส้นใยสแตนเลส.....	79
4-6	รูปถ่ายหยดน้ำบนตัวกลางทั้ง 2 ชนิด.....	80
4-7	ผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี.....	82
4-8	ผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี.....	82
4-9	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม.....	84
4-10	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม..	84
4-11	กราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันของน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง.....	85
4-12	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางและตกตะกอน 90 นาที เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง.....	86
4-13	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่เวลาต่างๆ ของโคอะเลสเซอร์	87
4-14	ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี.....	87
4-15	การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี ณ เวลาเริ่มต้น ที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ.....	88
4-16	ผลกระทบของการวางตัวกลางแบบชั้นตอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี.	90
4-17	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีของการวางตัวกลางแบบติดกันกับการวางตัวกลางแบบชั้นตอน.....	91
4-18	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางที่วางแบบชั้นตอน 2 ชั้น.....	91
4-19	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางที่วางแบบชั้นตอน 2 ชั้น.....	92
4-20	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันหลังผ่านตัวกลางแบบชั้นตอน 2 ชั้น เปรียบเทียบกับน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางหนา 3.5 ซม. 1 ชั้น และน้ำเสียก่อนไหลผ่านตัวกลาง.....	92
4-21	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางแบบชั้นตอนและตกตะกอน 90 นาที เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง	93

ภาพที่	หน้า
4-22	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่เวลาต่างๆ ของโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบชั้นตอน 2 ชั้น..... 94
4-23	ผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีโดยวิธีจาร์เทสต์..... 95
4-24	ผลกระทบของตำแหน่งเติมสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของโคอะเลสเซอร์..... 96
4-25	ตัวอย่างตะกอนน้ำมันที่ติดในชั้นตัวกลางและตกตะกอนบนตัวกลาง..... 99
4-26	ผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์..... 100
4-27	รูปถ่ายหยดน้ำมันที่ความเข้มข้นสารส้มต่างๆ..... 101
4-28	ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เปรียบเทียบกับวิธีจาร์เทสต์..... 102
4-29	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร..... 103
4-30	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่เติมสารส้ม เปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบธรรมดา และโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบชั้นตอน..... 104
4-31	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์แบบเติมสารส้มและตกตะกอน 90 นาที เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง..... 105
4-32	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม..... 105
4-33	ผลกระทบของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของโคอะเลสเซอร์ที่มีกระบอกใช้กระบวนการ IAF 106
4-34	ขนาดของฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ กัน..... 107
4-35	รูปถ่ายฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ..... 108
4-36	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางและเติมอากาศ 0.025 ลิตร/นาที นาน 90 นาที เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง..... 109
4-37	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่เวลาต่างๆ ของโคอะเลสเซอร์ที่ประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF 110
4-38	เปอร์เซ็นต์ปริมาตรสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆ ในน้ำหลังผ่านตัวกลาง. 112

ภาพที่		หน้า
4-39	เปอร์เซ็นต์ปริมาตรสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆ ในน้ำหลังผ่านการตั้งตกตะกอน 90 นาที.....	112
4-40	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จากการประยุกต์แต่ละแบบ.....	113
4-41	ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	114
4-42	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่เวลาต่างๆ ของโคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	117
4-43	เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำของโคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง ณ เวลา 360 นาที.....	118
4-44	เปอร์เซ็นต์ปริมาตรสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆ ในน้ำของโคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง ณ เวลา 360 นาที.....	110
4-45	แผนผังการเดินระบบแบบต่อเนื่องร่วมกับการหมุนเวียนน้ำ 50%.....	120
4-46	ผลการศึกษาระบบการหมุนเวียนน้ำ 50% กลับเข้าคอลัมน์โคอะเลสเซอร์.....	120
4-47	ผลการศึกษาระบบการหมุนเวียนน้ำ 50% เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำ.....	121
4-48	แผนผังเปรียบเทียบการเดินระบบแต่ละแบบ.....	122
5-1	คอลัมน์โคอะเลสเซอร์ที่นำเสนอเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด.....	128

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน น้ำเสียเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุมชนเมืองที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการเพิ่มขึ้นของปริมาณและความเป็นพิษของน้ำเสีย ทั้งนี้ น้ำเสียจากแหล่งกำเนิดต่างกันก็จะประกอบด้วยองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้ความเป็นพิษของน้ำเสียนั้นแตกต่างกันด้วย

“น้ำมัน” ก็เป็นหนึ่งในสารมลพิษที่มักพบปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งพบได้ทั้งในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม และชุมชน โดยจะมีที่มาจากแหล่งต่างๆ เช่น น้ำมันในน้ำเสียจากครัวหรือร้านอาหาร, น้ำมันหล่อลื่นในเครื่องจักร, น้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากกระบวนการต่างๆ ของอุตสาหกรรมปิโตรเลียม, น้ำมันที่ใช้เป็นสารหล่อเย็น เป็นต้น ซึ่งน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจะแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ คือ 1) น้ำมันที่อยู่ในรูปฟิล์มลอยอยู่บนผิวน้ำ 2) น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว 3) น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว และ 4) น้ำมันที่ละลายน้ำ โดยการปนเปื้อนของน้ำมันทั้ง 4 รูปแบบนี้ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว เป็นน้ำมันที่มีเสถียรภาพมากที่สุด จึงทำให้การแยกออกจากน้ำเสียทำได้ยากที่สุดด้วย

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันนี้ มักจะทำการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการทางกายภาพ และใช้เป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะส่งน้ำเสียไปดำเนินการบำบัดทางชีวภาพต่อไป เนื่องจากการบำบัดด้วยวิธีการทางกายภาพนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ใช้เวลาน้อย และมีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ อีกทั้งน้ำมันที่แยกออกมาได้ยังสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกด้วย

โดยทั่วไปน้ำเสียที่พบมักจะถูกปนเปื้อนด้วยสารลดแรงตึงผิวเสมอ เนื่องจากมีการใช้สารลดแรงตึงผิวในการทำมาสะอาด ดังนั้น น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันจึงมักจะพบอยู่รูปของอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการแยกอิมัลชันนี้ออกจากน้ำเสีย อุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียที่ได้รับความนิยมมากชนิดหนึ่ง ก็คือ “อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์” เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแยกอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวได้ในเวลาไม่นานมากและเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงนักเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ แต่เนื่องจากอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันไม่สูงมากเท่าที่ควร ดังนั้น

งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป ในการแยกน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียในรูปของอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดโดยการนำเอาวิธีการวางตัวกลางแบบขั้นตอน (Multi stage bed configuration) การเติมสารเคมี (Chemical addition) และกระบวนการอินดิทซ์แอร์โฟลเทชัน (Induce Air Flotation) เข้ามาประยุกต์ใช้ รวมไปถึง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาทฤษฎีการตกตะกอนและการคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด มาใช้ในการหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกับการลดลงของพื้นที่ได้กราฟการกระจายของขนาดอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัด รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอดีที่เวลาการบำบัดต่างๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

1.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุราคาถูกและหาได้ง่าย มาใช้แทนตัวกลางที่มีการใช้งานทั่วไปในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

1.2.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยการนำเอาวิธีการวางตัวกลางแบบขั้นตอน (Multi stage bed configuration) การเติมสารเคมี (Chemical addition) และกระบวนการอินดิทซ์แอร์โฟลเทชัน (Induce Air Flotation) เข้ามาประยุกต์ใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ใช้ถังปฏิกริยาแบบที่ละเท (Batch reactor) และแบบต่อเนื่อง (Continuous flow reactor) ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 1 ม.

1.3.3 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปของอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว ที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ได้แก่ Sodium lauryl sulphate (SLS หรือ SDS) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ

1.3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

- ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ 0.58-28.84 กรัม/ลิตร

- ชนิดของตัวกลาง ได้แก่ เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาและฝอยขัดหม้อสแตนเลส
- ความสูงของชั้นตัวกลาง ได้แก่ 3.5-14.0 ซม.
- อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย ได้แก่ 2.5-18.0 ลิตร/ชั่วโมง
- วิธีการวางตัวกลาง คือ วางตัวกลางแบบชั้นตอนเปรียบเทียบกับแบบธรรมดา
- ชนิดของสารเคมี ได้แก่ สารส้ม
- ตำแหน่งเติมสารเคมี ได้แก่ ในถังน้ำเสีย ในท่อน้ำเสียเข้าระบบ ได้ตัวกลาง 1 ซม. และกลางตัวกลาง
- ความเข้มข้นของสารเคมี ได้แก่ 0.2-1.0 กรัม/ลิตร
- อัตราการเติมอากาศ ได้แก่ 0.025-0.3 ลิตร/นาที่

1.3.5 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์

- ค่าความขุ่น
- ค่ามุลัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันและตัวกลาง
- ค่าซีไอดี
- การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน
- ขนาดของฟองอากาศ
- อัตราการเติมอากาศ
- อัตราการไหลของน้ำเสีย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบกลไกการทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ รวมทั้งปัญหาต่างๆ ในการใช้งานอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

1.4.2 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

1.4.3 นำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ รวมทั้งสามารถนำวัสดุที่มีราคาถูกลงและหาได้ง่ายมาใช้แทนอุปกรณ์ราคาแพงได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

2.1.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ

โดยทั่วไปมักเชื่อกันว่าน้ำมันไม่ละลายน้ำหรือไม่รวมตัวกับน้ำ แต่ความเป็นจริงแล้วความสามารถในการละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติประจำตัวของน้ำมัน โดยความสามารถในการละลายน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าโพลาไรตี (Polarity) ของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังนั้นโมเลกุลที่ไม่อิมตัวจะละลายน้ำได้ดี โดยเฉพาะสารประกอบ cyclic compounds เช่น เบนซีนละลายน้ำได้ถึง 1740 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ความสามารถในการละลายน้ำจะลดลงเมื่อน้ำมันมีโมเลกุลมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ น้ำมันที่ระเหยได้ง่าย (ซึ่งมักจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) จึงละลายน้ำได้ดี ตารางที่ 2-1 แสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2-1 ค่าการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Straight chain hydrocarbons C ₈		Straight chain hydrocarbons C ₆		Cyclic hydrocarbons C ₆	
n-octane	0.66 mg/l	n-hexane	9.5 mg/l	cyclohexane	55 mg/l
octene-1	2.7 mg/l	hexene-1	50 mg/l	cyclohexene	213 mg/l
octyne-1	24 mg/l	hexyne-1	360 mg/l	benzene	1740 mg/l

ปัญหาของน้ำมันที่ละลายน้ำ คือจะมีลักษณะใสและละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำ รวมถึงเป็นพิษ เพราะน้ำมันที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกอะโรมาติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

2.1.2 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำให้เกิดความปั่นป่วน (turbulence) เช่น เครื่องสูบน้ำ วาล์ว ไบพาส ข้อต่อต่างๆ ฯลฯ จะทำให้เกิดการกระจายตัวของน้ำมันกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยขนาดของหยดน้ำมันจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ทำให้เกิดการปั่นป่วนและแรง

ตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (Interfacial tension oil/water) โดยพลังงานที่ใช้จะสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } W_A &= \text{พลังงานกลที่ใช้ (ergs/cm}^3\text{)} \\ A_{OW} &= \text{พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำ (cm}^2\text{/cm}^3\text{)} \\ \gamma_{OW} &= \text{แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (ergs/cm}^2\text{ หรือ dyne/cm)} \end{aligned}$$

ดังนั้น พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำจึงมีค่าเท่ากับ

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

นั่นคือ น้ำมันที่มีแรงตึงผิวต่ำจะกระจายในน้ำได้ง่ายและเกิดเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็ก

ถ้าให้ V แทนปริมาตรของน้ำมันที่กระจายในน้ำ 1 ซม.³ และ d_E แทนเส้นผ่านศูนย์กลางของอิมัลชันที่เกิดขึ้น จะได้ว่า พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำจะมีค่าเท่ากับผลคูณของพื้นที่ผิวของหยดน้ำมันกับจำนวนของหยดน้ำมันในน้ำ 1 ซม.³

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ จำนวนของหยดน้ำมันต่อลบ.ซม.} &= \frac{V}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_E}{2}\right)^3} = \frac{6V}{\pi d_E^3} \end{aligned}$$

$$\text{พื้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน} = 4\pi\left(\frac{d_E}{2}\right)^2 = \pi d_E^2$$

$$\text{พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำ (} A_{OW} \text{)} = \frac{6V}{\pi d_E^3} \cdot \pi d_E^2 = \frac{6V}{d_E}$$

$$A_{OW} = \frac{6V}{d_E} = \frac{W_A}{\gamma_{OW}}$$

$$\text{ดังนั้น } d_E = \frac{6V \gamma_{OW}}{W_A} \quad (2-3)$$

จากสมการที่ (2-3) จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำจะแปรผันตรงกับแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ และแปรผกผันกับพลังงานกลที่ใช้ ดังนั้น น้ำมันที่มีแรงตึงผิวต่ำและถูกปั่นกวนด้วยพลังงานกลสูงจะเกิดเป็นอิมัลชันที่มีขนาดเล็ก

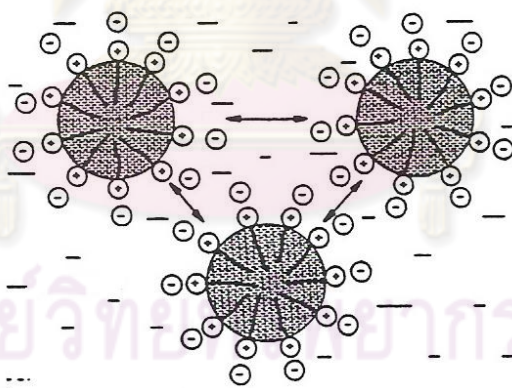
น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

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

แต่เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น เมื่อหยุดการปั่นกววน หยดน้ำมันเหล่านี้จะพยายามรวมตัวกันและกลับมาแยกชั้นเช่นเดิม เนื่องจากการปรับสภาพเข้าสู่จุดสมดุลโดยการลดพื้นที่ผิวที่สัมผัสกันให้น้อยที่สุด

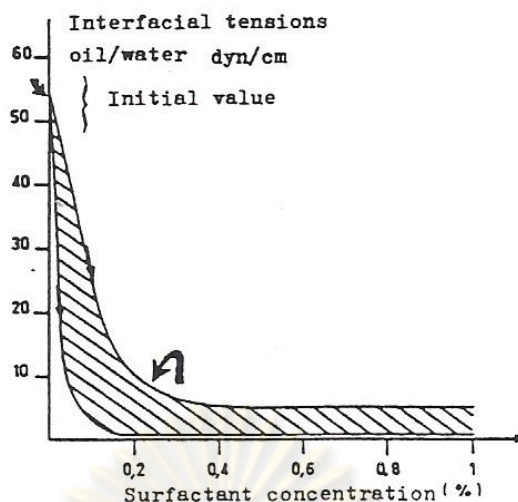
2.1.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

โดยทั่วไปน้ำเสียจากชุมชนหรือแม้กระทั่งอุตสาหกรรม มักจะพบว่ามีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวอยู่เสมอ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ โมเลกุลที่ชอบน้ำมันและโมเลกุลที่ชอบน้ำ จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 การผลัดกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

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

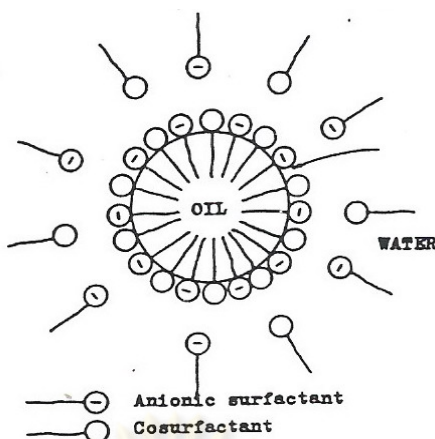


รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ
กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

อนุภาคน้ำมันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กมาก (ดังสมการที่ 2-3) ซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ดังนั้นความเร็วในการลอยขึ้นจึงมีค่าต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (brownian movement) และเนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน (electrokinetic หรือ zeta potential) จึงทำให้ไม่เกิดการชนและการรวมตัวกันในระหว่างการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า บางครั้งน้ำเสียมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวร่วม (cosurfactant) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว คือจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมจะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และจะไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว (ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว) ดังแสดงในรูปที่ 2-3 อิมัลชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวร่วมจะมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กมาก โดยจะมีขนาดประมาณ 100-600 อังสตรอม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

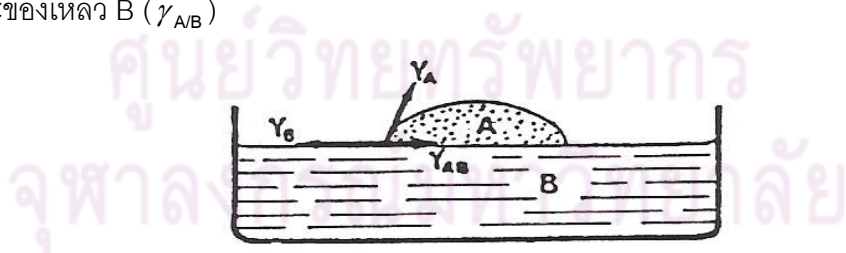


รูปที่ 2-3 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle, 1985)

2.1.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ

น้ำมันส่วนใหญ่มักจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงมักจะลอยอยู่บนผิวน้ำในลักษณะของฟิล์มบางๆ ซึ่งจะไปขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสง ปัญหาของน้ำมันในลักษณะนี้ก็คือสามารถปนเปื้อนได้เป็นพื้นที่กว้าง ถึงแม้จะมีน้ำมันปริมาณน้อยก็ตาม เพราะจะมีการแพร่กระจายออกไปในลักษณะของแผ่นฟิล์มโมเลกุลเดี่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะแพร่กระจายได้เป็นพื้นที่กว้างมาก ซึ่งการปนเปื้อนในลักษณะนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า คือจะสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งลอยอยู่บนผิวน้ำ

จากรูปที่ 2-4 ถ้าหยดของเหลว A ลอยอยู่บนพื้นผิวของของเหลว B (ซึ่งไม่รวมตัวกับของเหลว A) หยดของเหลว A อาจกระจายออกไปหรือยังคงรูปร่างหยดของเหลวอยู่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวของของเหลว A (γ_A) แรงตึงผิวของของเหลว B (γ_B) และแรงตึงผิวระหว่างของเหลว A และของเหลว B (γ_{AB})



รูปที่ 2-4 การลอยตัวของหยดของเหลว A บนของเหลว B (Aurelle, 1985)

จากสมการของ Young ที่สภาวะสมดุล และรูปที่ 2-4 จะได้

$$\gamma_B = \gamma_{AB} + \gamma_A \cos \theta \quad (2-4)$$

ถ้าของเหลว A กระจายบนของเหลว B จะได้ว่ามุมที่จุดเชื่อมต่อ $\theta = 0^\circ$ ดังนั้นการกระจายของของเหลว A จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\gamma_B \geq \gamma_{A/B} + \gamma_A$$

แรงตึงผิวระหว่างของเหลว A และของเหลว B ($\gamma_{A/B}$) สามารถหาได้จากสมการ

$$\gamma_{A/B} = \gamma_A + \gamma_B - Wadh_{A/B}$$

หรือ

$$Wadh_{A/B} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{A/B} \quad (2-5)$$

เมื่อ $Wadh_{A/B}$ คือ งานแอดฮีชัน (adhesion work) ระหว่าง A กับ B ซึ่งก็คืองานที่ต้องใช้ในการดูดติดโมเลกุลของสาร A กับ B

แทนค่าของ γ_B จากสมการที่ (2-4) ลงในสมการที่ (2-5) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Wadh_{A/B} &= \gamma_A + \gamma_{A/B} + \gamma_A \cos \theta - \gamma_{A/B} \\ &= \gamma_A (1 + \cos \theta) \end{aligned} \quad (2-6)$$

งานโคฮีชัน (cohesion work) หรืองานที่ต้องใช้ในการดูดติดโมเลกุลของของเหลว A ให้โมเลกุลนั้นเกาะอยู่ด้วยกัน สามารถหาได้จากสมการของ Harkin (Harkin's equation)

$$Wc_{(A)} = 2 \gamma_A$$

จากสมการที่ (2-6) ถ้าของเหลว A กระจายบนของเหลว B ($\theta = 0^\circ$) จะได้ว่า

$$Wadh_{A/B} \geq 2 \gamma_A$$

นั่นคือ

$$Wadh_{A/B} \geq Wc_{(A)}$$

ผลต่างระหว่างงานแอดฮีชันและงานโคฮีชัน จะเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย

ตัว (Spreading coefficient : ϕ)

$$\phi = Wadh_{A/B} - Wc_{(A)}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \phi = \gamma_B - \gamma_A - \gamma_{A/B} \quad (2-7)$$

ถ้า ϕ มีค่าเป็นศูนย์หรือมีค่าเป็นบวก ของเหลว A จะกระจายบนของเหลว B ซึ่งโดยทั่วไปในกรณีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

$$B \text{ คือ น้ำ } \quad \gamma_B = 72.8 \text{ dyn/cm}$$

$$A \text{ คือ น้ำมัน } \quad \gamma_A = 20 \text{ ถึง } 30 \text{ dyn/cm (ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมัน)}$$

$$\gamma_{A/B} < 40 \text{ dyn/cm (กรณีของน้ำมันส่วนใหญ่)}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \phi = 72.8 - (20 \text{ ถึง } 30) - (<40)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ϕ มีค่าเป็นบวก ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงกระจายเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ

2.2 กฎของสโตก (Stoke's law)

กระบวนการแยกสารออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของสารที่ต้องการแยกนั้น จะพบว่า ความเร็วในการตกตะกอนหรือความเร็วในการลอยขึ้นของอนุภาคทรงกลม ที่มีค่า Reynolds number น้อยกว่า 1 จะเป็นไปตามกฎของสโตก ซึ่งแสดงดังสมการ

$$W = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_d^2}{18\mu_c} \quad (2-8)$$

เมื่อ W = ความเร็วในการตกตะกอนหรือการลอยขึ้นของเฟสกระจาย (Dispersed phase)

$\Delta\rho$ = ผลต่างของความหนาแน่นของเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase)

d_d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟสกระจาย

μ_c = ความหนืดพลศาสตร์ของเฟสต่อเนื่อง

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ในกรณีของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เฟสกระจายก็คือน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องซึ่งก็คือน้ำนั่นเอง จากสมการที่ (2-1) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเร็วในการลอยขึ้นของอนุภาคน้ำมันสามารถทำได้ 4 วิธี คือ 1) การเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมัน 2) การเพิ่มผลต่างของความหนาแน่น 3) การเพิ่มค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ 4) การลดค่าความหนืดพลศาสตร์ของเฟสต่อเนื่อง ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ต่อมาอีกมากมาย

2.3 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

การแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย มีหลายกระบวนการที่สามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเลือกเทคนิคที่จะใช้ในการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพการผสมกันของน้ำมันและน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาคุณลักษณะของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนที่จะตัดสินใจเลือกกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป

หลักการพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบกระบวนการแยกน้ำมันกับน้ำเสียมีดังนี้

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

กระบวนการในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2-2 ซึ่งกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity separation) และการแยกโดยใช้อากาศลอยตัว (Air flotation)

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

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravity separation	API, CPI, TPS, PPI	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันอิสระและน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้ - ใช้งานง่าย และประหยัด 	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดอนุภาคน้ำมันที่เล็กกว่า 20 ไมครอนหรือน้ำมันที่ละลายน้ำไม่ได้ - มีข้อจำกัดในการกำจัดอิมัลชัน - ต้องใช้ความเร็วการไหลต่ำ - ต้องการถังแยกขนาดใหญ่

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

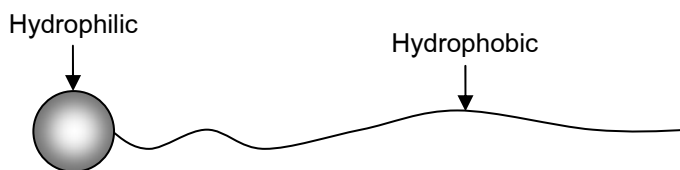
กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Air Flotation	DAF, IAF	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและไขมันที่ลอยตัวได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีช่วย - รองรับสภาวะ shock load ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น ถ้าใช้สารเคมีช่วยสร้างตะกอน
Chemical flocculation	ใช้ร่วมกับ gravity separation และ air flotation	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น
Filtration	Sand, anthracite, multimedia, crushed graphite	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันอิสระ ไขมันที่ลอยตัว และไขมันที่แพร่กระจายในน้ำได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องทำการล้างย้อนซึ่งต้องบำบัดน้ำล้างย้อนต่อไป
Coalescence	Fibrous membrane	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการบำบัดขั้นต้น - เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย - ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale

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

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Membrane processes	Reverse osmosis, ultrafiltration, hyper filtration	- สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้	- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่ายและอายุการใช้งานจำกัด - ต้องมีการบำบัดขั้นต้น - อัตราการบำบัดต่ำ - ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale
Biological processes	Activated sludge	- สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ	- ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มก./ล.
Carbon adsorption	GAC และ PAC	- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำ	- ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มก./ล. - ค่าใช้จ่ายสูง - ต้องมีการฟื้นฟูหรือเปลี่ยนคาร์บอน - ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale

2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิว หรือ Surfactant เป็นคำย่อของ Surface active agent เป็นสารมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ผิวระหว่างเฟส ทำให้แรงตึงผิว (Surface tension) ลดลง สารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นส่วนหัวของโมเลกุล และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นส่วนหางของโมเลกุล ซึ่งจะเป็นอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ไฮโดรคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำที่มีไขมันหรือน้ำมัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำโดยส่วนหัว (ส่วนที่ชอบน้ำ) จะอยู่ในเฟสน้ำ ส่วนหาง (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ) จะอยู่ในเฟสน้ำมัน และทำให้แรงตึงผิวของน้ำมันลดลง จึงทำให้น้ำมันสามารถกระจายอยู่ในน้ำได้ ซึ่งจากคุณสมบัตินี้ จึงใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ เพื่อลดแรงตึงผิวของสิ่งสกปรกจำพวกไขมันที่เกาะอยู่กับพื้นผิวต่างๆ ให้ออกไปกับน้ำ

แรงระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมี 2 แรง (ดังแสดงในรูปที่ 2-6) คือ

1. แรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) เกิดขึ้นที่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิว โดยจะเป็นแรงผลัก (repulsion force) เนื่องจากส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวมีประจุเดียวกัน
2. แรงไฮโดรโฟบิก (hydrophobic force) เกิดขึ้นที่ส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว เป็นแรงที่ดึงส่วนหางเข้าหากัน (attractive force)



รูปที่ 2-6 แรงระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนชอบน้ำออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

2.4.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุลเป็นประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในรูปของ carboxylate, sulfate, sulfonate หรือ phosphate สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาล้างจาน เป็นต้น โดยใช้มากถึง 49% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ขจัดคราบสกปรกได้ดี

2.4.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

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

2.4.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ต่างจากสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบและประจุบวก คือ ส่วนที่ชอบน้ำเป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยจะมีพวก polyether หรือ polyhydroxyl เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

2.4.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวก (Amphoteric surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำสามารถเป็นได้ทั้งประจุบวกและลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นนั้น จะขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่าง (pH>7) ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรด (pH<7) ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดประจุไฟฟ้า สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม ในปัจจุบันยังใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น

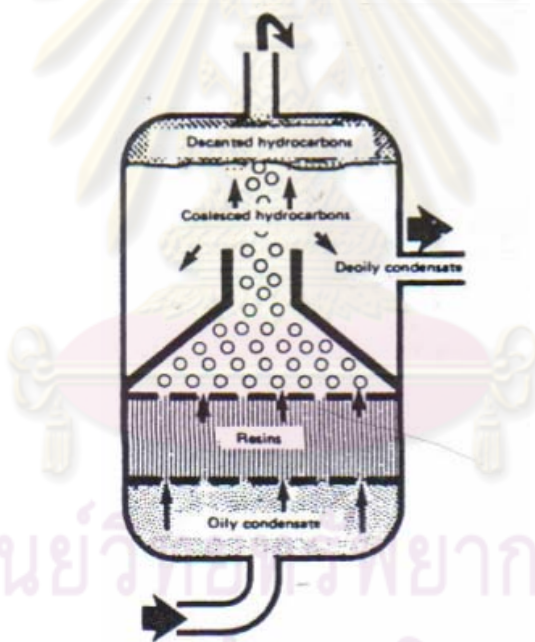
2.5 อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Coalescer)

จากกฎของสโตก (สมการที่ 2-8)

$$W = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_d^2}{18\mu_c}$$

จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเร็วในการลอยขึ้นของอนุภาคน้ำมันสามารถทำได้หลายวิธี โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องอยู่ 4 ตัวแปร ซึ่งตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันยกกำลัง 2 จึงเป็นที่มาของการออกแบบอุปกรณ์ที่เรียกว่า “โคอะเลสเซอร์” (coalescer)

หลักการทำงานของโคอะเลสเซอร์ คือการทำให้อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กเกิดการรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้สามารถแยกได้เร็วขึ้นด้วยการแยกด้วยแรงโน้มถ่วง รูปที่ 2-7 แสดงอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนอิมัลชันจากภาคอุตสาหกรรม



รูปที่ 2-7 การทำงานของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Aurelle, 1985)

น้ำเสียจะถูกส่งเข้าถังปฏิกริยาทางด้านล่างของตัวกลาง (Coalescing bed) ซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่ชอบน้ำมัน (oleophilic material) โดยเป็นได้ทั้งตัวกลางแบบเม็ด (Granular bed) และตัวกลางแบบเส้นใย (Fibrous bed) ถ้าตัวกลางนี้ถูกออกแบบมาอย่างถูกต้อง หยดน้ำมันที่ได้หลังจากผ่านตัวกลางตัวกลางแล้วจะต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น และจะต้องสามารถแยกออกจากน้ำได้

ในโซนการตกตะกอนที่อยู่หลังจากตัวกลาง โดยน้ำมันจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบน ส่วนน้ำทั้งจะถูกแยกออกมาทางด้านล่างของโซนการตกตะกอน

จากการทดลอง (Aurelle, 1985) บำบัดอิมัลชันชั้นสองของซีโรซีนในน้ำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคน้ำมันเท่ากับ 10 ไมครอน แรงตึงผิวระหว่างซีโรซีนกับน้ำ 42 dynes/cm และผลต่างของความหนาแน่น $\Delta\rho = 0.2$ กรัม/ซม.³ ผลที่ได้คือหลังจากผ่านโคอะเลสเซอร์ ขนาดของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น 3.64 มม. ซึ่งจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้นถึง 364 เท่า นั่นคือเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันขนาด 10 ไมครอนถึง 48 ล้านอนุภาค และส่งผลให้ความเร็วในการลอยขึ้นของอนุภาคน้ำมันจาก 1.09×10^{-3} ซม./วินาที (อนุภาคขนาด 10 ไมครอน) เป็น 12.12 ซม./วินาที หรือเพิ่มขึ้นถึง 11,000 เท่า ดังนั้นขนาดของถังตกตะกอนที่อยู่ด้านบนของตัวกลางจะสามารถมีพื้นที่เล็กลงได้ถึง 11,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับถังตกตะกอนแบบธรรมดา ซึ่งการทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ถึงข้อดีและความสำคัญของโคอะเลสเซอร์ในการบำบัดอิมัลชันชั้นสอง

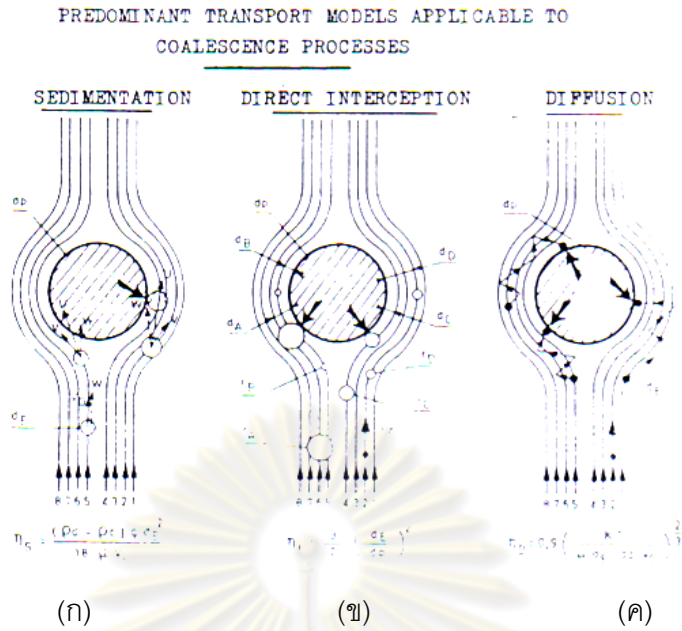
2.5.1 หลักการแยกน้ำมันออกจากน้ำของโคอะเลสเซอร์

กลไกการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันโดยโคอะเลสเซอร์ แบ่งเป็น 3 ระยะ คือ

2.5.1.1 ระยะที่ 1 : การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กไปยังพื้นผิวของตัวกลาง

กลไกการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นนี้จะมีลักษณะคล้ายกับการกรอง โดยสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการเคลื่อนย้าย 3 แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 2-8 ในระยะนี้จะเกิดการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันขนาดเล็ก ซึ่งเคลื่อนที่มากับการไหลของเฟสต่อเนื่อง (ในที่นี้ก็คือน้ำเสีย) กับพื้นผิวของตัวกลางที่ใช้ในโคอะเลสเซอร์ โดยเส้นการไหลรอบๆ ตัวกลางจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-8 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายของอนุภาคน้ำมันขณะเกิดการรวมตัวกันในโคอะเลสเซอร์ (Aurelle, 1985)

- แบบจำลองการเคลื่อนย้ายที่ 1 : การตกตะกอน (Sedimentation)

พิจารณารูปที่ 2-8 (ก) อนุภาคน้ำมันซึ่งเคลื่อนที่ไปตามเส้นการไหลที่ 5 จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ 2 เวกเตอร์ คือ W คือความเร็วในการลอยขึ้น และ V_0 คือความเร็วการไหลของน้ำที่ผ่านตัวกลาง ที่ระยะทางห่างจากตัวกลาง ความเร็วทั้ง 2 เวกเตอร์จะอยู่ในทิศทางเดียวกันคือในแนวตั้ง และอนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นการไหลที่ 5

เมื่อเข้าใกล้ตัวกลาง เวกเตอร์ W จะยังคงอยู่ในแนวตั้ง แต่เวกเตอร์ V_0 จะเปลี่ยนทิศทางไปตามการไหลของน้ำ ซึ่งผลก็คืออนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ออกนอกเส้นการไหลและชนเข้ากับตัวกลาง ทำให้อนุภาคน้ำมันเกาะติดอยู่กับตัวกลาง โดยที่ประสิทธิภาพของการชนกันโดยการตกตะกอน (η_s) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_s = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_p^2}{18\mu_c \cdot V_0} = \frac{W}{V_0} \quad (2-9)$$

- แบบจำลองการเคลื่อนย้ายที่ 2 : การเกาะติดโดยตรง (Direct interception)

ถ้าอนุภาคน้ำมันมีความหนาแน่นเท่ากับน้ำหรือ $\Delta\rho = 0$ กลไกการเคลื่อนย้ายแบบตกตะกอนจะไม่เกิดขึ้น (ดังสมการที่ 2-9) แต่อนุภาคน้ำมันก็ยังสามารถถูกจับได้โดยกลไกแบบการเกาะติดโดยตรง จากรูปที่ 2-8 (ข) ถ้าพิจารณาอนุภาคน้ำมันที่มีรัศมี r_A ที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นการไหลที่ 6 อนุภาคน้ำมันนี้จะเคลื่อนที่ไปตามเส้นการไหลรอบตัวกลาง ถ้าเส้นการ

ไหลห่างจากตัวกลางเป็นระยะทาง d_A ซึ่งมีค่าน้อยกว่ารัศมีของอนุภาคน้ำมัน r_A อนุภาคน้ำมันจะชนและถูกจับโดยตัวกลางด้วยกลไกแบบการเกาะติดโดยตรง โดยประสิทธิภาพของการชนกันโดยการเกาะติดโดยตรง (η_1) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_1 = \frac{3}{2} \left(\frac{d_E}{d_p} \right)^2 \quad (2-10)$$

เมื่อ d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง

• แบบจำลองการเคลื่อนย้ายที่ 3 : การแพร่ (Diffusion)

แบบจำลองการเคลื่อนย้ายแบบนี้สามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 2-8 (ค) แต่การเกาะติดโดยกลไกการเคลื่อนย้ายแบบการแพร่นี้จะเกิดขึ้นกับอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กนี้จะเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ผลก็คือการเคลื่อนที่แบบสุ่มอาจทำให้อนุภาคขนาดเล็กนั้นไปเกาะติดกับตัวกลางได้ โดยประสิทธิภาพของการชนกันโดยการแพร่ (η_D) สำหรับตัวกลางทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

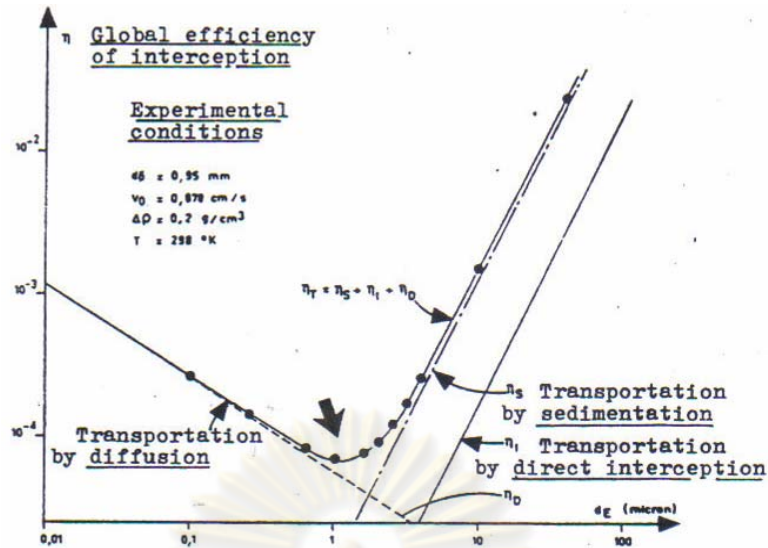
$$\eta_D = 0.9 \left(\frac{K \cdot T}{\mu_C \cdot d_E \cdot d_p \cdot V_0} \right)^{2/3} \quad (2-11)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่ BOLTZMANN

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์. (absolute temperature)

โดยกลไกการเคลื่อนย้ายที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของอิมัลชันที่จะทำการบำบัด และจะพิจารณาประสิทธิภาพของการชนเป็นประสิทธิภาพทั้งหมดของการเกาะติด (global efficiency of interception : η_T) โดยที่

$$\eta_T = \eta_s + \eta_1 + \eta_D \quad (2-12)$$



รูปที่ 2-9 แสดงค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองการเคลื่อนย้ายแต่ละแบบตามขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Aurelle, 1985)

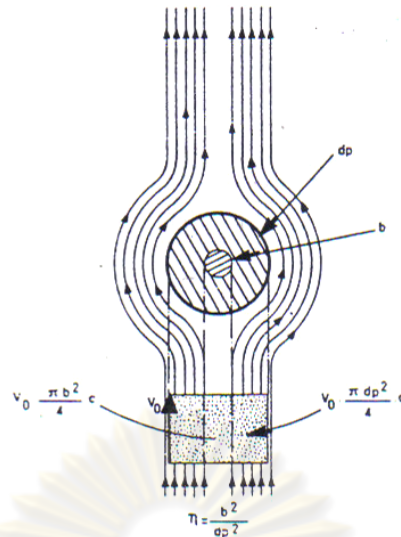
จากรูปที่ 2-9 จะเห็นได้ว่าอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.25-5 ไมครอน เป็นอิมัลชันที่มีค่าประสิทธิภาพทั้งหมดของการเกาะติดต่ำที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่า สำหรับอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน ประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายด้วยการตกตะกอนจะมากกว่าการเคลื่อนย้ายด้วยการแพร่ แต่ถ้าอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน ประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายด้วยการแพร่จะมากกว่าการเคลื่อนย้ายด้วยการตกตะกอน

- ประสิทธิภาพทั้งหมดของการเกาะติดของโคอะเลสเซอร์ที่มีตัวกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p และสูง H

จากรูปที่ 2-10 พื้นที่โปรเจกต์และพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางมีค่าเท่ากับ $\frac{\pi d_p^2}{4}$ ดังนั้นปริมาณของอนุภาคน้ำมันที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยเวลาจึงเท่ากับ

$$\frac{V_0 \pi d_p^2 C}{4} \quad (2-13)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของอิมัลชันที่ต้องการทำการบำบัด (มก./ล.)



รูปที่ 2-10 แสดงลักษณะการไหลของน้ำเสียอิมัลชันผ่านตัวกลาง (Aurelle, 1985)

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลาง จะมีอนุภาคของน้ำมันบางส่วนเท่านั้นที่ถูกจับอยู่ที่ผิวของตัวกลาง ถ้าสมมติให้ปริมาณของน้ำมันที่ถูกจับเท่ากับ X จะได้ว่า ประสิทธิภาพทั้งหมดของตัวกลางจะเท่ากับ

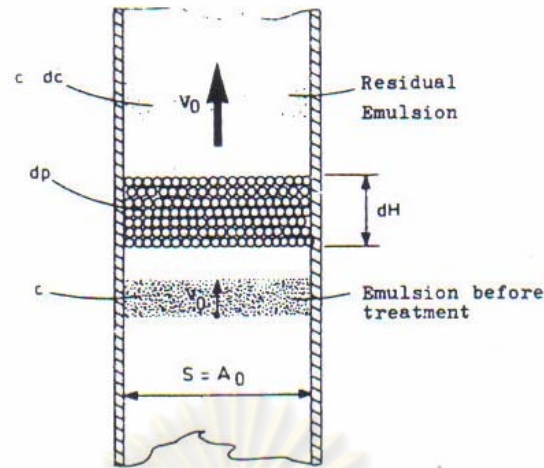
$$\eta_T = \frac{X}{V_0 C \pi d_p^2 / 4} \quad (2-14)$$

ดังนั้น ปริมาณของน้ำมันที่ถูกดักจับโดยตัวกลางจึงมีค่าเท่ากับ

$$X = \eta_T \cdot \frac{V_0 \pi d_p^2 C}{4} \quad (2-15)$$

พิจารณาโคอะเลสเซอร์ในรูปที่ 2-11 ซึ่งประกอบด้วยชั้นตัวกลางหนา d_H ถ้าอัตราส่วนช่องว่างของตัวกลางเท่ากับ ε จะได้ว่า จำนวนของตัวกลางจะเท่ากับ $\frac{A_0 d_H (1 - \varepsilon)}{\pi d_p^3 / 6}$ นั่นคือ ปริมาณของน้ำมันทั้งหมดที่ถูกจับโดยตัวกลางจึงเท่ากับผลคูณระหว่างค่า X กับจำนวนของตัวกลาง หรือเท่ากับ $X \cdot \frac{A_0 d_H (1 - \varepsilon)}{\pi d_p^3 / 6}$

ถ้า α คือประสิทธิภาพในการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันกับพื้นผิวของตัวกลาง จะได้ว่าปริมาณน้ำมันที่เกาะติด (และเกิดการรวมตัวกัน) อยู่ที่ผิวของตัวกลาง จะคำนวณได้จาก $\alpha \cdot \frac{A_0 d_H (1 - \varepsilon)}{\pi d_p^3 / 6}$



รูปที่ 2-11 ลักษณะการทำงานของโคอะเลสเซอร์ที่มีตัวกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p และสูง H (Aurelle, 1985)

หรืออาจกล่าวได้ว่า ปริมาณของน้ำมันที่เกาะติดและเกิดการรวมตัวกันที่ผิวของตัวกลาง จะมีค่าเท่ากับปริมาณของน้ำมันที่ถูกกำจัดออกจากเฟสน้ำ

$$-V_0 \cdot A_0 \cdot dC = 3 \alpha \eta_T \cdot A_0 \frac{V_0 \cdot C (1 - \varepsilon) dH}{2d_p} \quad (2-16)$$

เมื่อ dC = ความเข้มข้นของน้ำมันที่ลดลงหลังจากผ่านโคอะเลสเซอร์

$$\text{นั่นคือ } \frac{dC}{C} = -3(1 - \varepsilon) \alpha \eta_T \cdot \frac{dH}{2d_p} \quad (2-17)$$

อินทิเกรตสมการ (2-17) จะได้

$$\ln\left(\frac{C_s}{C_0}\right) = -\frac{3}{2}(1 - \varepsilon) \alpha \eta_T \cdot \frac{H}{d_p} \quad (2-18)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของน้ำมันในอิมัลชันที่ต้องการบำบัด

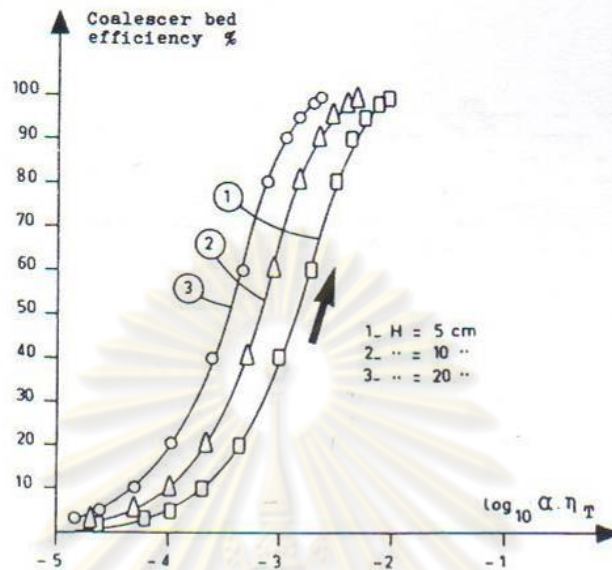
C_s = ความเข้มข้นของน้ำมันที่ยังเหลืออยู่ในน้ำหลังการบำบัด

H = ความสูงของชั้นตัวกลาง

ดังนั้น ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$1 - \frac{C_s}{C_0} = 1 - e^{-\frac{3}{2}(1 - \varepsilon) \alpha \eta_T \cdot \frac{H}{d_p}} \quad (2-19)$$

รูปที่ 2-12 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ในฟังก์ชันของ $\alpha \eta_T$ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพในการรวมอนุภาคน้ำมันของตัวกลาง ที่ความสูงของชั้นตัวกลางต่างๆ กัน

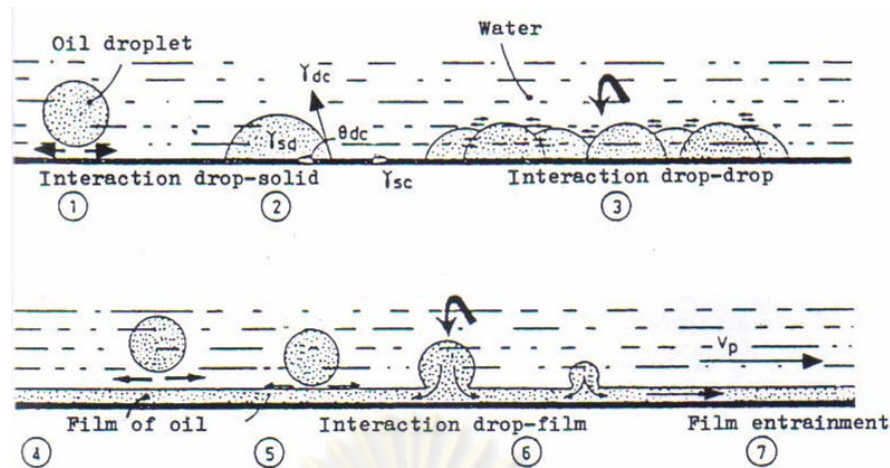


รูปที่ 2-12 การเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ในฟังก์ชันของ $\alpha \eta_T$ (Aurelle, 1985)

จากรูปที่ 2-12 จะเห็นได้ว่าที่ค่า $\alpha \eta_T$ ระหว่าง 10^{-2} ถึง 10^{-3} เป็นช่วงที่ให้ค่าประสิทธิภาพของตัวกลางสูงมาก ซึ่งจะเป็นช่วงที่ทำการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้ดีที่สุด แต่จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความสูงของชั้นตัวกลาง

2.5.1.2 ระยะเวลาที่ 2 : การเกาะติดของอนุภาคน้ำมันบนพื้นผิวของตัวกลางและเกิดเป็นแผ่นฟิล์มน้ำมันบนผิวตัวกลาง

รูปที่ 2-13 จะแสดงเฟสต่างๆ ของระยะเวลาที่ 2 นี้ ซึ่งในรูปจะเป็นกรณีอุดมคติ คือน้ำมันชอบที่จะเกาะอยู่กับตัวกลาง ระยะเวลานี้เป็นระยะที่มีความสำคัญมากสำหรับโคอะเลสเซอร์ที่ดี ซึ่งจะถูกกำหนดโดยค่าความสามารถในการเปียกได้ของวัสดุตัวกลาง (wettability of coalescing material) ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางนั้น ควรเลือกวัสดุที่ชอบน้ำมัน (oleophilic material) คือชอบที่จะให้น้ำมันเกาะมากกว่าน้ำ



รูปที่ 2-13 เฟสต่างๆ ของการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันบนตัวกลาง (Aurelle, 1985)

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การเกาะติดของอนุภาคน้ำมันและฟิล์มน้ำมันบนผิวของวัสดุตัวกลางจะขึ้นอยู่กับค่างานแอดฮีชัน หรือ

$$W_{adh}(sd)_C = \gamma_{dc} (1 + \cos \theta_{dc}) \quad (2-20)$$

ซึ่งในการทำให้อนุภาคน้ำมันเกิดการรวมตัวกันได้ดีนั้น จะต้องให้ค่างานแอดฮีชันนี้มีค่าสูงที่สุด แต่เนื่องจากค่าแรงตึงผิวจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของอิมัลชัน ดังนั้นตัวแปรที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้จึงมีแค่ตัวแปรเดียว นั่นก็คือ ค่ามุมสัมผัส (angle of contact : θ_{dc}) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานผิว (surface energy) ของตัวกลาง (γ_{dc}) และความขรุขระของผิวของวัสดุตัวกลาง

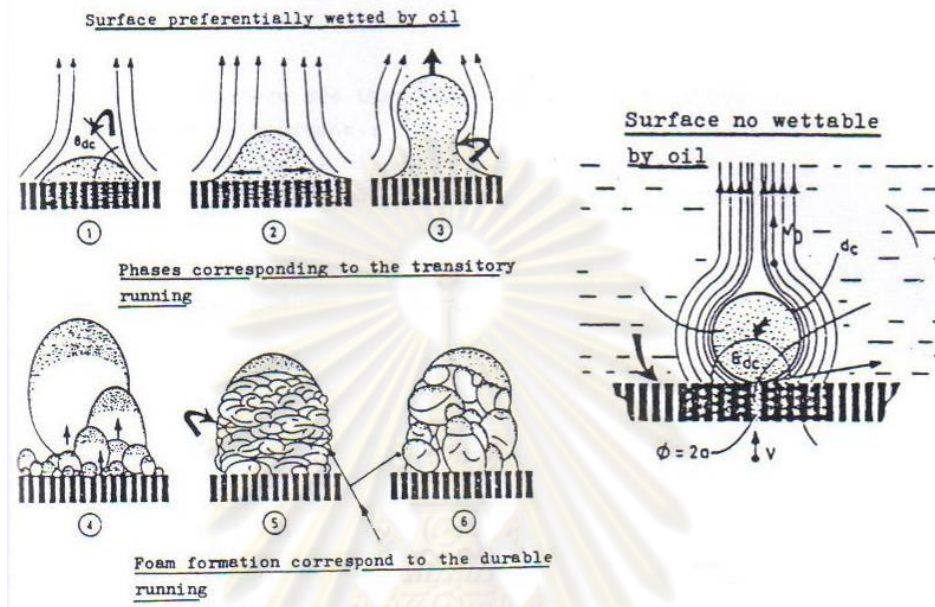
ดังนั้น ในการเลือกวัสดุตัวกลางที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันที่ดี ควรเลือกวัสดุที่มีค่ามุมสัมผัสน้อยๆ ซึ่งจะทำให้ค่างานของการยึดเกาะของน้ำมันที่ผิวของตัวกลางมีค่าสูง

2.5.1.3 ระยะเวลาที่ 3 : การเคลื่อนที่ของน้ำมันออกจากตัวกลางและการแยกน้ำมันจากน้ำเสียในถังตกตะกอน

กลไกที่เกิดขึ้นในระยะเวลาี้จะมีผลต่อขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ออกจากตัวกลางและคุณภาพในการแยกน้ำมันของโคอะเลสเซอร์ ซึ่งกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรมากมาย โดยตัวแปรที่สำคัญที่สุด 4 ตัวแปร ได้แก่

- ความสามารถในการเปียกได้ของผิวหยดน้ำมันหลุดออกจากตัวกลาง (the wettability of the salting out surface)

รูปที่ 2-14 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความสามารถในการเปียกได้ของผิวหยดน้ำมันหลุดออกจากตัวกลางต่อลักษณะของอนุภาคน้ำมันที่แยกออกจากตัวกลาง



รูปที่ 2-14 การแยกตัวของอนุภาคน้ำมันเมื่อผิวหยดน้ำมันหลุดออกจากตัวกลางมีลักษณะต่างกัน (Aurelle, 1985)

- ถ้าผิวหยดน้ำมันหลุดออกจากตัวกลางชอบน้ำมัน ($\theta_{dc} < 90^\circ$) เมื่อน้ำมันกำลังจะแยกออกจากตัวกลาง มันจะกระจายไปบนพื้นผิวของ salting out surface และน้ำก็จะแทรกเข้าไปตามช่องว่างอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำมันแยกตัวออกมาในลักษณะของโฟมหรือฟอง ซึ่งการเกิดโฟมหรือฟองของน้ำมันนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียต่ำลง จึงควรหลีกเลี่ยงเหตุการณ์เช่นนี้
- ถ้าผิวหยดน้ำมันหลุดออกจากตัวกลางไม่ชอบน้ำมัน ($\theta_{dc} > 90^\circ$) จะทำให้น้ำมันที่แยกออกมา มีลักษณะเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่ (หลายมิลลิเมตร) ซึ่งจะทำให้การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียมีประสิทธิภาพมาก ดังนั้น ผิวหยดน้ำมันหลุดออกจากตัวกลางของโคเอสเซอร์ที่ใช้กันทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมจึงมักเป็นวัสดุที่ชอบน้ำ (ไม่ชอบน้ำมัน)

- แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่น้ำมันจะเกิดเป็นหยด (the interfacial oil/water tension and the diameter of the drip point)
แรงในการเกาะติดกันของหยดน้ำมัน ในขณะที่กำลังฟอร์มตัวขึ้นบนผิวหยดน้ำมันหลุดออกจากตัวกลางที่ชอบน้ำ มีค่าเท่ากับ

$$F_{adh} = 2 \pi a \gamma_{ow} \quad (\text{จากรูปที่ 2-14}) \quad (2-21)$$

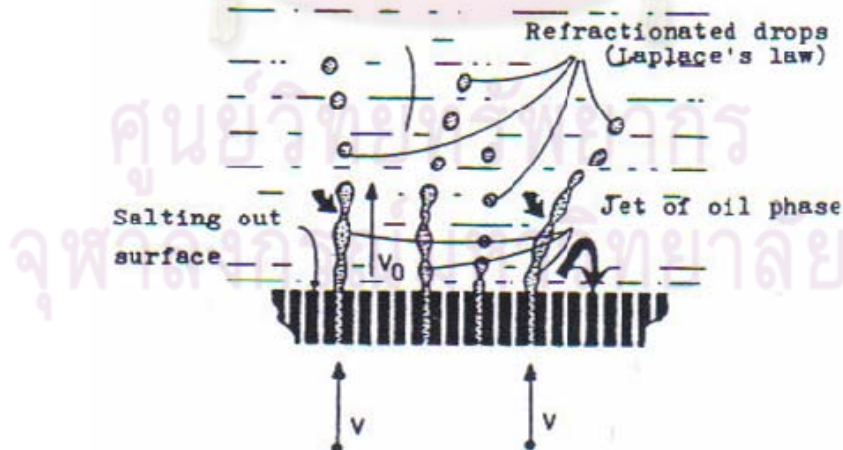
ดังนั้น จะเห็นได้ว่าหยดน้ำมันจะมีขนาดใหญ่ ถ้า :

- ค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำมีค่ามาก
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่น้ำมันจะเกิดเป็นหยด ขนาดใหญ่

- ความเร็วการไหลของอิมัลชันที่ผ่านตัวกลาง

ถ้าความเร็วการไหลของอิมัลชันมีค่าสูงมาก น้ำมันที่แยกออกจากตัวกลางจะมีลักษณะเป็นสาย ซึ่งจะทำให้ น้ำมันแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก แทนที่จะเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่ (ดังแสดงในรูปที่ 2-15) เนื่องจากระยะของการแยกออกจากตัวกลาง (salting out step) ถูกจำกัด

โดยทั่วไป ความเร็วการไหลในตัวกลางควรมีค่าน้อยกว่า 0.5 ซม./วินาที หรือ 18 ม./ชม. โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออิมัลชันมีแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำต่ำ (มีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิว) จำเป็นจะต้องมีการระวังมากเป็นพิเศษ



รูปที่ 2-15 การแยกตัวของอนุภาคน้ำมันในลักษณะเป็นสาย (Aurelle, 1985)

- อัตราส่วนของน้ำมันต่อน้ำ

ในบางกรณี ค่าอัตราส่วนของน้ำมันต่อน้ำจะมีความสำคัญมาก เนื่องจากมีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดการแตกของหยดน้ำมันเพราะเกิดการแยกจากตัวกลางเป็นสาย และอีกอย่างหนึ่งก็คือ อาจเกิดขึ้นของหยดน้ำมันบริเวณรอยต่อของถังตกตะกอน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการรวมตัวของหยดน้ำมันที่รอยต่อของถังตกตะกอนนานกว่าเวลาที่หยดน้ำมันฟอร์มตัวที่ผิวหยดน้ำมันหลุดออกจากตัวกลางจึงเกิดการสะสมของหยดน้ำมันขึ้นได้

2.5.2 ปัจจัยควบคุมประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์

ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์สามารถควบคุมได้โดยปัจจัยต่างๆ มากมาย โดยจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่

2.5.2.1 ลักษณะสมบัติของอิมัลชัน

ลักษณะสมบัติของอิมัลชันจะมีผลกระทบต่อกลไกการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ผลกระทบของลักษณะสมบัติของอิมัลชัน (Wanichkul, 2000)

ตัวแปร	ผลกระทบ
ขนาดหยดน้ำมัน	การรวมตัวของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคน้ำมันใหญ่ขึ้น
ความหนืด	ประสิทธิภาพจะลดลงเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับความหนืด
สารลดแรงตึงผิว	สารลดแรงตึงผิวจะลดอัตราการระบายของฟิล์มและลดประสิทธิภาพ
มวลโมเลกุล	ประสิทธิภาพในการรวมตัวจะลดลงเมื่อมวลโมเลกุลลดลง
ของแข็งแขวนลอย	ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ที่ใช้วัสดุโพลีเมอร์จะลดลงเมื่อน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง

2.5.2.2 ลักษณะสมบัติของเส้นใยตัวกลาง

ผลกระทบของลักษณะสมบัติของเส้นใยตัวกลางต่อกลไกการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน สรุปได้ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ผลกระทบของลักษณะสมบัติของเส้นใยตัวกลาง (Wanichkul, 2000)

ตัวแปร	ผลกระทบ
ความขรุขระ	ความขรุขระของผิวของเส้นใยเป็นปัจจัยมีผลอย่างมากในการแยกอิมัลชันแบบทุติยภูมิ เนื่องจากแรงที่กระทำที่ผิวของอนุภาคจะมีค่ามากกว่าแรงลอยตัวสูงมาก ดังนั้นอนุภาคจะมีรูปร่างเกือบเป็นทรงกลม
	การเปลี่ยนวัสดุเส้นใยจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยก ถ้าความขรุขระของผิวไม่เปลี่ยนแปลง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	อิมัลชันของไซโคลเฮกเซนขนาด 3 ไมครอนในน้ำ ที่แยกโดยใช้ตะแกรงนี้เกิด จะมีค่ามากขึ้นเมื่อจำนวนของชั้นตะแกรงเพิ่มขึ้น
	การรวมตัวของอนุภาคน้ำมันจะมากขึ้นเมื่อความสูงของชั้นตัวกลางเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันค่าความดันตกก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย และยังส่งผลให้เกิดการแตกของอนุภาคน้ำมันที่รวมตัวกันแล้ว ทำให้น้ำมันกระจายตัวใหม่
	อัตราการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันจะมากขึ้นเมื่อความสูงของชั้นตัวกลางเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อขนาดของเส้นใยและความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น
	ความสูงของชั้นตัวกลางจะมีผลไม่มากนักกับประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	การรวมกันของหยดน้ำมันจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เมื่อขนาดของเส้นใยลดลง
	ในทางทฤษฎีเสนอว่า เส้นใยขนาดเล็ก ตัวกลางที่ยาว และอนุภาคขนาดใหญ่ จะทำให้อัตราการรวมตัวสูงขึ้น
แรงกระทำที่ผิว (Surface force)	เมื่อแรงกระทำที่ผิวของตัวกลางลดลง ประสิทธิภาพการแยกจะลดลง
	เส้นใยสแตนเลสสตีล จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าเส้นใยแก้วและเส้นใย PTFE
	ประสิทธิภาพการรวมตัวกันจะสัมพันธ์กับค่าซีต้าโพเทนเชียลและสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลาง

2.5.2.3 เงื่อนไขการดำเนินการ

ผลกระทบของเงื่อนไขการดำเนินการต่อประสิทธิภาพการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ผลกระทบของเงื่อนไขการดำเนินการ (Wanichkul, 2000)

ตัวแปร	ผลกระทบ
ความเร็วการไหล	ประสิทธิภาพจะลดลง เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น
	ความเร็วการไหลผ่านตัวกลางสูงสุดสำหรับตัวกลางแบบเส้นใย คือ 0.5-1 ซม./วินาที
	ความเร็วการไหลสูงสุดของถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีตัวกลาง (superfacial velocity) คือ 4 ซม./วินาที
	ภายใต้ของเขตของ superficial velocity กลไกการชนกันจะมีค่ามากกว่า กลไกอื่นๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบมากกว่า
	เมื่อ superficial velocity มีค่ามากกว่า 1 ซม./วินาที ประสิทธิภาพการแยกอิมัลชันของโพลีเมอร์ในน้ำด้วยตัวกลางแบบเส้นใยซึ่งหนา 5 และ 12 ไมครอน จะลดลง
	อัตราการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันจะมากขึ้น เมื่อความเร็วการไหลลดลง
อุณหภูมิ	อุณหภูมิจะมีผลกระทบที่ซับซ้อนต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแพร่

2.5.3 ข้อดีและข้อเสียของโคอะเลสเซอร์

- ข้อดี

1. การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียมีประสิทธิภาพสูง
2. เป็นอุปกรณ์ที่น่าเชื่อถือ
3. ค่าลงทุนและค่าดำเนินการต่ำ

- ข้อเสีย

อาจเกิดปัญหาได้ถ้าน้ำเสียมีปริมาณของแข็งแขวนลอยมาก ดังนั้นจึงควรมีการป้องกัน เช่น ใช้เครื่องกรอง ทำการบำบัดขั้นต้น หรือมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวกลางโดยการล้างย้อนกลับ (Counter-current washing)

2.6 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกคูเลชัน (Flocculation)

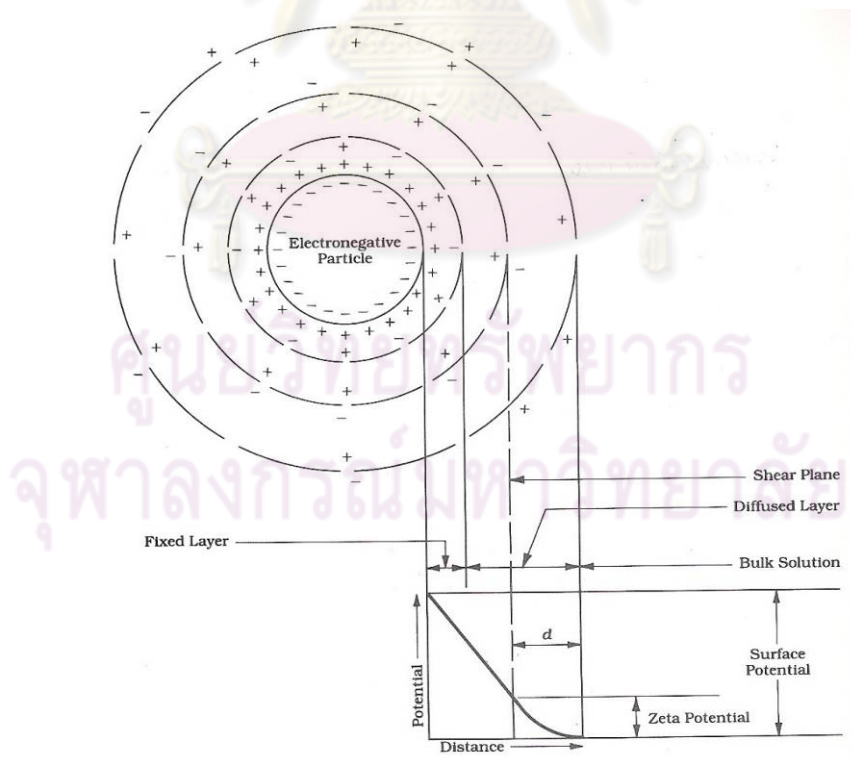
2.6.1 อนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} จนถึง 10^{-3} มม. เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจําตัว โดยพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือ สารจำพวกสารลดแรงตึงผิว ส่วนพวกที่ไม่

ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุเป็นลบ เช่น หยดน้ำมันและเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคส่งผลทำให้อนุภาคเหล่านั้นมีความเสถียรภาพสูง ดังนั้นการทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับกันเป็นกลุ่มก้อนโดยมีขั้นตอน 2 ขั้นตอนคือ (มันสิน, 2542)

2.6.2 การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization)

เสถียรภาพของหยดน้ำมันเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันบนหยดน้ำมัน สามารถอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหยดน้ำมันโดยใช้ทฤษฎี Electric Double Layer Theory โดยอิออนประจุลบบนหยดน้ำมันสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้ อิออนประจุบวกมาแออัดอยู่ที่ใกล้ผิวหยดน้ำมัน (ดังรูปที่ 2-16) อิออนบวกนี้เรียกว่า Counter Ion ความหนาแน่นของอิออนประจุบวกจะสูงที่สุดอยู่ในบริเวณที่อยู่ติดกับหยดน้ำมันและลดลงไปตามระยะห่างจากหยดน้ำมัน ทั้งนี้เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของหยดน้ำมันซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิวและลดน้อยลงเมื่อห่างออกไป ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคกับจุดศูนย์กลางอิออนที่อยู่ใกล้สุดเรียกว่าชั้น Stern Layer (Ω) ซึ่งถือว่าเป็นเปลือกชั้นในทางทฤษฎี ส่วนเปลือกชั้นนอกเรียกว่า Diffuse Layer (ชั้นกระจาย) ครอบคลุมเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่หยดน้ำมันมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

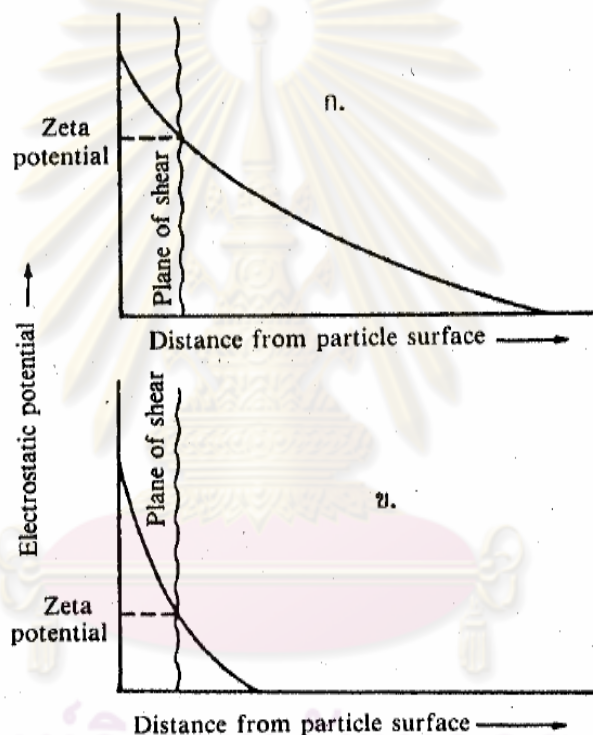


รูปที่ 2-16 โมเดลที่ใช้ในการอธิบาย Electric Double Layer Theory

(Reynolds และ Richards, 1996)

ดังนั้นการทำให้ละลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันจะต้องทำให้แรงดูด (Van Der Waals Force) ของหยดน้ำมันมีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างหยดน้ำมันเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของหยดน้ำมันหรือค่า Zeta Potential โดยอาศัยกลไก 4 แบบดังนี้

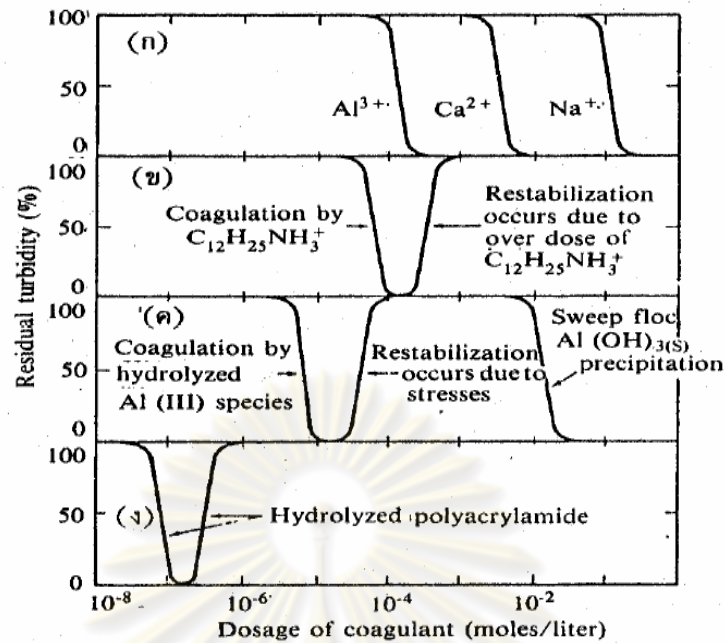
2.6.2.1 กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) โดยการเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับหยดน้ำมันในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิววนอกสุดของน้ำลดตามไปด้วย (ดังรูปที่ 2-17) การทำให้ละลายเสถียรภาพ โดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือ เช่น NaCl ฯลฯ มีข้อที่น่าสนใจดังนี้



รูปที่ 2-17 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับหยดน้ำมัน

(ก) ก่อน และ (ข) หลังเติมไอออน (Weber, 1972)

- ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันด้วยวิธีการลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของหยดน้ำมัน
- ไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้หยดน้ำมันเปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวก (Charge Reversal) ดังรูปที่ 2-18 (ก)



รูปที่ 2-18 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมัน ด้วยกลไกแบบต่างๆ แบบ (ก) ซึ่งเป็นการลดความหนาของชั้นกระจายด้วย Al^{3+} , Ca^{2+} และ Na^{+} ต้องการสารเคมีมากที่สุด ส่วนแบบ (ง) ซึ่งเป็นการใช้โพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมโยง (สะพาน) ให้หยดน้ำมันมารวมตัวกันมีความต้องการสารโคแอกกูแลนต์ที่น้อยที่สุด (Benefield และคณะ, 1982)

2.6.2.2 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของหยดน้ำมัน (Adsorption and Charge Neutralization) โดยใส่สารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถทำให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคหยดน้ำมันและดูดติดผิวได้ซึ่งจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าของหยดน้ำมัน โดยเป็นการทำลายเสถียรภาพโดยกลไกดูดติดผิวจะใช้ปริมาณสารเคมีน้อยกว่ากลไกการลดความหนาของชั้นกระจายดังรูปที่ 2-18 (ก) และ (ข) แต่ถ้ามีการใช้สารเคมีมากเกินไปจะส่งผลทำให้เกิด Charge Reversal ดังรูปที่ 2-18 (ข)

2.6.2.3 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้หยดน้ำมันเข้ามาเกาะจับ (Sweep Coagulation) การใส่สารส้มให้เกิดผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ เหมือนวุ้นสีขาวเพื่อให้อนุภาคมาเกาะแล้วรวมกันเป็นฟล็อกได้ กลไกการใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมัน มีลักษณะที่แตกต่างกัน 2 แบบคือ แบบที่ 1 ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของหยดน้ำมันกล่าวคือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดกระบวนการโคแอกกูแลชันได้ดี แบบที่ 2 น้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อยแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของหยด

น้ำมันจะเกิดขึ้นแล้วก็ตามกระบวนการโคแอกกูเลชันอาจเกิดได้ดีไม่เท่าที่ควรจึงจำเป็นต้องมีการใช้สารโคแอกกูแลนต์ปริมาณที่สูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆสำหรับเป็นสารเป้าสัมผัสให้กับหยดน้ำมัน แต่ในกรณีที่น้ำมันมีความขุ่นสูงโอกาสสัมผัสย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่ากับกรณีแรก

2.6.2.4 กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่อหยดน้ำมัน (Polymer bridging) โดยใช้สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อใส่ลงในน้ำเพื่อจะให้ก้อนจำนวนมากเกาะจับกับหยดน้ำมันและยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆเพื่อทำให้เกิดฟล็อก

2.6.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

ความสำคัญของกระบวนการโคแอกกูเลชัน เนื่องจากหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กไม่สามารถในการแยกโดยวิธีการตกตะกอน จึงมักจะต้องทำการโคแอกกูเลชันก่อนเพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น เช่น ทำให้สารแขวนลอยมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.6.3.1 ส่วนประกอบของกระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการโคแอกกูเลชันมีส่วนประกอบสำคัญ 2 อย่างคือ ถังกวนเร็ว (Rapid mixing tank) และถังกวนช้า (Flocculation tank) ถังกวนเร็วซึ่งมีการเติมโคแอกกูแลนต์จะทำให้น้ำกระจายสารเคมีไปยังส่วนต่างๆ ของน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อให้มีการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันเกิดขึ้น ถังกวนช้าซึ่งได้รับน้ำต่อจากถังกวนเร็วมีหน้าที่สร้างสัมผัสให้กับหยดน้ำมันเพื่อให้เกิดการรวมตัวเป็นฟล็อก

2.6.3.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันเรียกว่า โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) หรือเรียกว่า ฟล็อกคูแลนต์ (Flocculants) เช่น สารส้ม เพอร์ริซซัลเฟต (FeSO_4) ปูนขาว และเพอร์ริคคลอไรด์ (FeCl_3) สารเคมีที่ช่วยให้โคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเรียกว่า โคแอกกูแลนต์เฮด (Coagulant aid) เช่น แอ็กทิเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) และสารอินทรีย์โพลีเมอร์ โดยสารโพลีเมอร์สามารถทำการจำแนกประเภทของโพลีเมอร์ตามประจุการใช้สารช่วยสร้างตะกอน (Coagulation aid) โพลีเมอร์สามารถแบ่งได้อย่างกว้างๆ 2 ชนิด คือ

- โพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส (Cellulose), เจลาติน (Gelatin) และแป้ง (Starch)

- โพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ในปี ค.ศ.1979 ได้มีการสังเคราะห์โพลีเมอร์ขึ้นอย่างสมบูรณ์ และนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง Polyacrylamide ที่สร้างขึ้นจาก Monomer ที่

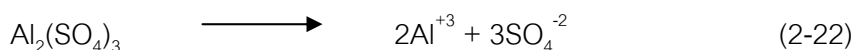
รวมกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนโมเลกุลจะประกอบด้วยน้ำหนักโมเลกุลในปริมาณเป็นล้านหน่วย องค์ประกอบและรูปแบบทางด้านกายภาพของโพลีเมอร์มีรูปร่างเป็นโซ่ยาว (Long chain) เป็นสารเคมีชนิดพิเศษสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จาก Monomers หลายๆ อันรวมกันหรือสามารถทำได้จากการเพิ่มสารเคมีลงไปเพื่อเพิ่มน้ำหนักของ Monomers ซึ่งเป็นตัวแบ่งประเภทของโพลีเมอร์ที่เกิดขึ้น ดังนั้น Monomer จึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งของโพลีเมอร์ แขนของ Monomer ค่อนข้างกว้างจึงใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์โพลีเมอร์ เช่น Acrylamide เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์โพลีเมอร์ สามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ คือ

Cationic polymer มีประจุบวกบนส่วนของสารอินทรีย์ระดับของประจุบนโพลีเมอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนอิออนของ Nitrogen groups มีประสิทธิภาพสูงในการปรับสภาพตะกอนซึ่งมีประจุลบตัวอย่าง Cationic polymer เช่น Polydiallyldimethyl ammonium (PDADMA, cat-floc) สารรวมตะกอน Polyacrylamide ประเภท Cationic เตรียมได้โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบสารเคมีชนิด Non-ionic-polyacrylamide หรือเป็นการรวม Cationic monomer ด้วย Acrylamide polymer ชนิด Cationic polymer จะนิยมใช้ในงานปรับสภาพตะกอนเนื่องจากของแข็งในน้ำตะกอนนั้นมีประจุลบ

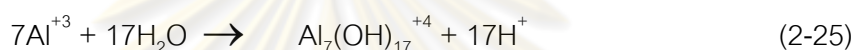
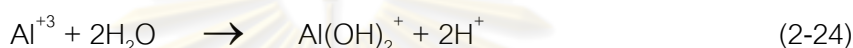
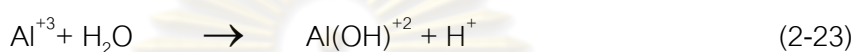
Anionic Polymer มีประจุลบบนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ จำนวนประจุลบขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มของ Acrylamide ที่ละลายอยู่ใน Crylic acid ชนิดของ Anionic polymer เช่น Polyacrylamide acid (PAA), Hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) และ Polystyrene sulfate (PSS) สารรวมตะกอน polyacrylamide ประเภท anionic มีประจุไฟฟ้าเป็นลบเมื่อละลายน้ำและทำให้เกิดกลุ่ม Amide group (NH_2) หรือเกิดจากการรวมกลุ่มของ Anionic monomer จนเป็น Acrylamide polymer

Nonionic polymer ไม่ละลายน้ำแต่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมอนุภาคของตะกอนให้เกิดการรวมกลุ่มกันได้ดี ในทางปฏิบัติ Nonionic polymer อาจเกิดจากการรวมกันของสารอนินทรีย์โพลีเมอร์ Inorganic polymer และสารอินทรีย์โพลีเมอร์ (Organic polymer) ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงของฟล็อกโครงสร้างในรูปสารละลายของสารอินทรีย์โพลีเมอร์เมื่อละลายน้ำจะเปลี่ยนเป็นสารละลาย ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความหนืด ซึ่งค่าความหนืด (Viscosity) ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและระดับของประจุไฟฟ้า

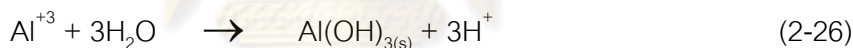
2.6.3.3 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในประเทศไทย เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาที่ไม่แพงมากนัก สารส้ม (อลูมิเนียมซัลเฟต) มีสูตรโมเลกุล $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ซึ่งโดยปกติ * มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวก และลบ ดังปฏิกิริยาที่ 2-22



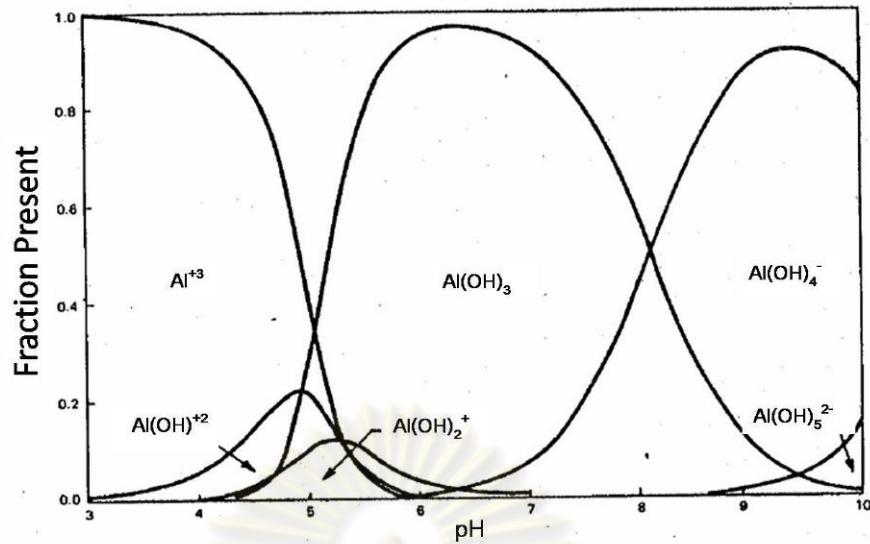
เมื่อเติมสารส้มในน้ำอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จาก $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ หรือ Al^{+3} ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ Al^{+3} จะเกิดขึ้นทันทีโดยไลแกนด์ (Ligands) ชนิดต่างๆที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง OH^- จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (Hamza, Stanonik และ Kessick, 1996) ดังปฏิกิริยาที่ 2-23 ถึง 2-25



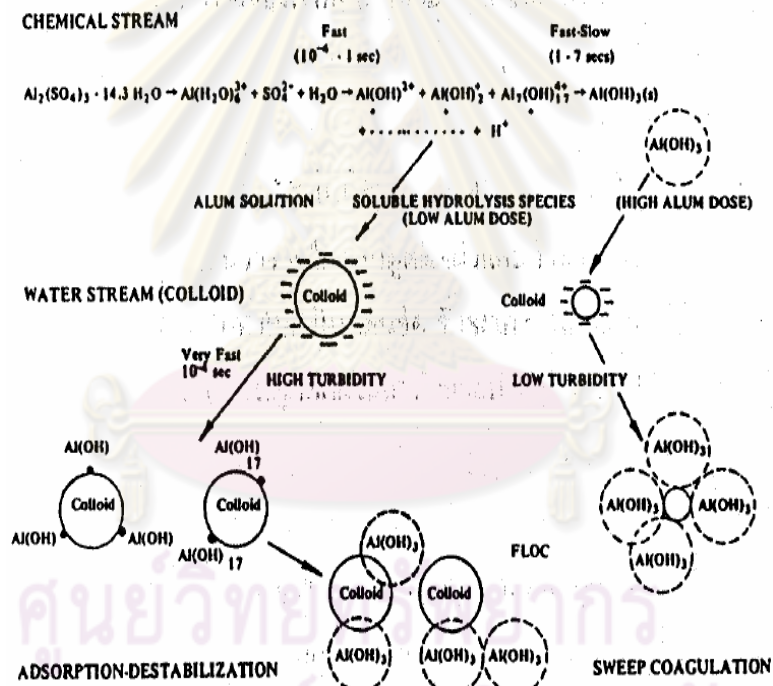
ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation point) ไฮโดรไรซีตจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดังปฏิกิริยาที่ 2-26



ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์คือสารคอมเพล็กซ์ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิสจาก Al^{+3} ถึง $\text{Al}(\text{OH})_3$ สารคอมเพล็กซ์อาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอช (pH) ของน้ำ กล่าวคือถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge) ของ $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_5^{-2}$ ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจะสะเทินทางไฟฟ้าของ $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$ (ดังรูปที่ 2-19) สารส้มที่เติมลงในน้ำจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยกลไกหลักดังนี้ (ดังรูปที่ 2-20)



รูปที่ 2-19 ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มและค่าพีเอช (Sank, 1980)



รูปที่ 2-20 กลไกในการสร้างโคแอกูเลชันด้วยสารส้ม (Sank, 1980)

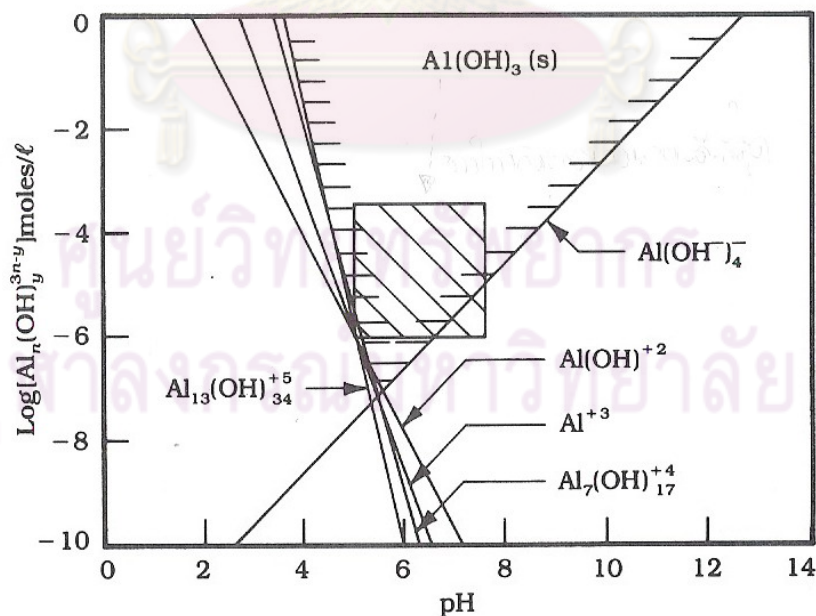
● กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวก ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งมักมีประจุเป็นลบให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีช่วงความเหมาะสมที่แคบซึ่งจะควบคุมการทำงานให้ดีขึ้นยากเพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น

จะต้องพอเหมาะเท่านั้นถ้าหากมีปริมาณต่ำเกินไปกระบวนการโคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคมากทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวกและเกิดเสถียรภาพขึ้นอีก แต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

- กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มมากเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดังปฏิกิริยาที่ (2-26) การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารส้มเป็นจำนวนมากพอจนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ซึ่งทำให้ผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำใหผิวของอนุภาคมีความเหนียวไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า จึงทำหน้าที่สร้างเป้าสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์จนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง

- กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม (Combination Coagulation) เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัด

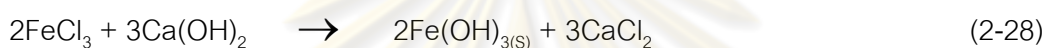
Reynolds และ Richards ได้รวบรวมผลการวิจัยเกี่ยวกับโคแอกกูเลชัน ด้วยสารส้มและนำมาวิเคราะห์ซึ่งเสนอหลักการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มดังแสดงใน (ดังรูปที่ 2-21) ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นว่าโคแอกกูเลชันของสารส้มด้วยกลไกแบบกวาดจะได้ผลดีที่สุดที่พีเอช 6.8 ถึง 8.2



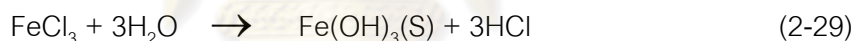
รูปที่ 2-21 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

(Reynolds และ Richards, 1996)

2.6.3.4 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยทั่วไปเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) มีสูตรทาง เคมีว่า $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ FeCl_3 anhydrous มีลักษณะผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง เป็นเม็ดสีเขียวหรือดำและมีรูปสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลืองปกติจะละลายน้ำได้ดีในน้ำดิบในรูปของสารละลาย โดยสารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรดและกีดกร่อนปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำรูปแบบของสารประกอบเหล็กเมื่อละลายน้ำนั้นจะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอนด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอร์ริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ Bicarbonate alkalinity ดังปฏิกิริยาที่ 2-27 และ 2-28



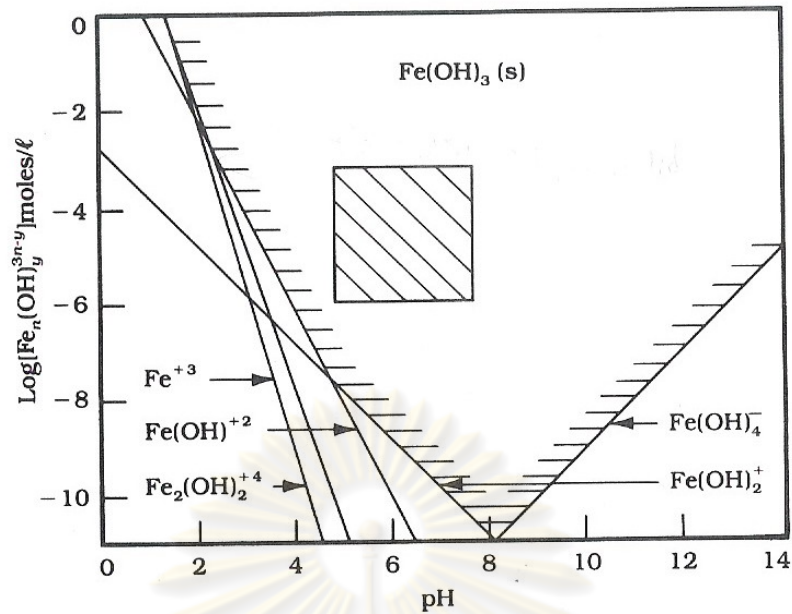
การสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มไม่อาจได้ผลดีมากนักกับน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม กรณีเช่นนี้เฟอร์ริกคลอไรด์ให้ผลดีกว่าเมื่อเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ให้กับน้ำจะมีผลึกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นดังปฏิกิริยาที่ 2-29 (มันสิน, 2537)



ข้อดีอีกประการหนึ่งของสารเคมีชนิดนี้คือ สามารถสร้างโคแอกกูเลชันกับน้ำที่มี H_2S ได้ดี เฟอร์ริกคลอไรด์จะทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนในกระบวนการตกตะกอนได้ทั้ง 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 โคแอกกูเลชันเฟอร์ริกคลอไรด์นี้จะทำหน้าที่สะเทินประจุบนผิวของอนุภาคต่างๆทั้งที่แขวนลอยและละลายอยู่ในน้ำให้กลายเป็นกลางโดยการดูดซับประจุและทำปฏิกิริยากับประจุบนผิวของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งเป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคอ่อนลง และอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดเป็นตะกอนเล็กๆขนาดระหว่าง $10^{-9} - 10^{-7}$ ม.

ขั้นตอนที่ 2 ฟล็อกคูเลชันเฟอร์ริกคลอไรด์จะทำหน้าที่รวมตะกอนเล็กๆที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 ให้เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นขนาดมากกว่า 10^{-7} ม. ซึ่งถือว่าเป็นขนาดของตะกอนที่ใหญ่และหยาบทำให้ง่ายต่อขบวนการแยกตะกอนออกจากน้ำในกระบวนการต่อไปดังรูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ และ เฟอร์รัสคลอไรด์ (Reynolds และ Richards, 1996)

2.6.4 กระบวนการฟล็อกคูเลชัน

2.6.4.1 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้นคือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกันเป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไปมิฉะนั้นแล้วฟล็อกที่เกิดขึ้นอาจแตกหรือหลุดออกจากกันได้วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไปซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือสร้างฟล็อกคูเลชันเรียกว่าถังกวนช้า โดยวิธีการสร้างสัมผัสแบบนี้มีชื่อเทคนิคว่า Orthokinetic Flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกคูเลชันแบบนี้ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.6.4.2 การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วยจึงอาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเรียกว่า Perikinetic Flocculation

2.6.5 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ในการควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันจำเป็นต้องรู้ชนิดและปริมาณสารที่เหมาะสม ตลอดจนสภาวะต่างๆที่เอื้ออำนวยต่อกลไกโคแอกกูเลชันซึ่ง ได้แก่ ระดับพีเอชของน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ และระยะเวลาในการกวนน้ำ ความก้าวหน้าของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโคแอกกูเลชันยังไม่สามารถจะใช้กำหนดและควบคุมตัวแปรต่างๆ ดังกล่าวแล้วได้อย่างสมบูรณ์จึงได้มีการพยายามพัฒนาวิธีควบคุมโคแอกกูเลชันนอกเหนือจากการทดลองจาร์เทสต์ ได้แก่ วิธีการควบคุมโดยวัดศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) การควบคุมโดยวิเคราะห์หาสารโคแอกกูแลนท์ที่เหลือ (Residual Coagulant Analysis) และการควบคุมโดยการหาความสามารถในการกรอง (Filterability) (มันสิน, 2542)

2.6.5.1 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน ความเร็วแกรเดียนท์ (G) หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยเฉพาะกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ ความปั่นป่วนของน้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีระดับสูงกล่าวคือไม่น้อยกว่า 300 วินาที⁻¹ เพื่อให้การกระจายของสารส้มเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอแต่ในถังกวนช้าจะมีความปั่นป่วนต่ำมีค่าไม่เกิน 60-100 วินาที⁻¹ เพื่อให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วสัมผัสกันและจับตัวเป็นก้อนใหญ่ พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วนสามารถคำนวณได้จากสมการของแคมท์ และสไตน์ดังนี้

$$G = \left(\frac{P}{uV} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-30)$$

เมื่อ	G	=	ความเร็วแกรเดียนท์ (วินาที ⁻¹)
	P	=	พลังงานที่ใช้ นิวตัน-ม. (วินาที)
	u	=	ความหนืดของน้ำ (นิวตัน-วินาที/ม. ²)
	V	=	ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (ม. ³)

กรณีที่เกิดการกวนผสมเกิดจากอากาศหรือก๊าซออกซิเจน (Pneumatic mixing) ในถังกวนผสม ถังเติมอากาศในกระบวนการ Activated-sludge และกระบวนการ Induced air flotation เป็นความปั่นป่วนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ขึ้นของฟองอากาศในของเหลว โดยสมการการคำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ฟองอากาศในการปั่นกวนได้ดังสมการที่ 2-31 (Reynolds และ Richards, 1996)

$$P = C_1 Q_G \log \left(\frac{(h + C_2)}{C_2} \right) \quad (2-31)$$

เมื่อ	P	=	พลังงานที่ใช้ นิวตัน-ม./วินาที)
	C_1	=	ค่าคงที่เท่ากับ 3904
	C_2	=	ค่าคงที่เท่ากับ 10.4
	h	=	ระดับความลึกหัวเติมอากาศ (ม.)
	Q_G	=	อัตราการไหลอากาศ (ม. ³ /นาที)

2.6.5.2 การควบคุมด้วยวิธีจาร์เทสต์ จาร์เทสต์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างกว้างขวาง จาร์เทสต์เป็นวิธีทดสอบอย่างง่าย ๆ โดยทำการทดลองในบีกเกอร์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับความเร็วรอบได้ส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และกำหนดชนิดสภาวะต่างๆ ได้แก่ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบ ระยะเวลาการกวนน้ำ และระยะเวลาในการตกตะกอนไว้ค่าหนึ่งจึงทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ ส่วนระดับพีเอชอาจเปลี่ยนแปลงหรือคงที่ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์จากนั้นก็จะได้ค่าประมาณชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดโคแอกกูแลนต์ในการทดลองควรทำหลายๆครั้งเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมยิ่งขึ้น วิธีการทำจาร์เทสต์ (มันสิน, 2542)

1. วิเคราะห์น้ำตัวอย่างเพื่อหาสี ความขุ่น พีเอช และความเป็นด่าง
2. เติมน้ำตัวอย่าง 800 มิลลิลิตร ลงในแก้วบีกเกอร์แต่ละใบ และเติมสารเคมีเป็นโคแอกกูแลนต์ลงไปในแก้ว ตามปริมาณที่ต้องการใช้
3. กวนสารเคมี ที่อัตราการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที นาน 1 นาที
4. เปลี่ยนมากวนช้า 30 รอบต่อนาที นาน 30 นาที แล้วตั้งทิ้งให้ตกตะกอนนาน 30 นาที
5. ดูน้ำส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ ความขุ่น และพีเอช

2.7 กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศ (Air Flotation)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศ เป็นกระบวนการที่จะทำการปล่อยฟองอากาศเข้าสู่ น้ำเสีย ที่ระดับความดันบรรยากาศหรือที่ระดับความดันสูงกว่าระดับความดันบรรยากาศ โดยฟองอากาศที่ปล่อยเข้าไปนี้จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ เกิดการชนและจับกับอนุภาคน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดรวมตัวกันและเคลื่อนที่สู่ผิวน้ำ เป็นชั้นของน้ำมันซึ่งจะถูกกวาดออกไปกำจัดต่อไป กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศนี้สามารถลดความเข้มข้นของน้ำมันน้ำเสียได้ต่ำกว่า 40 มก./ล. (Roshni และ Richard, 2003) กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. Dissolved Air Flotation (DAF)

หลักการของกระบวนการ DAF คือการอัดอากาศให้มีความดันสูงถึงประมาณ 4-5 บรรยากาศ จากนั้นจึงปล่อยอากาศที่มีความดันสูงนี้เข้าสู่ถังน้ำเสีย ทำให้ความดันของอากาศที่ปล่อยเข้าไปลดลงสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30-100 ไมครอน ซึ่งจะเกาะและพองสารที่เป็นของแข็งต่างๆ และอนุภาคน้ำมันให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นเครื่องกวาดจะทำการกวาดอนุภาคต่างๆ ที่ลอยตัวแยกออกมาไปกำจัดต่อไป ระบบนี้เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียเนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมากในการเดินระบบ เพราะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อทำให้เกิดความดันตามต้องการ

2. Induce Air Flotation (IAF)

กระบวนการอินดิวิจแออร์โฟลเทชันเป็นการสร้างฟองอากาศที่มีความดันบรรยากาศ โดยการทำให้เกิดฟองอากาศจากการทำงานของเครื่องจักรกลต่างๆ โดยการป้อนกวนน้ำเสีย หรือการพ่นอากาศผ่านหัวเติมอากาศเข้าสู่ถังน้ำเสียโดยตรง โดยขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 700-1,500 ไมครอน ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเข้าไปเกาะกับน้ำมันและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ จึงทำให้น้ำมันและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยแรงลอยตัวที่เกิดจากฟองอากาศ ระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศแบบอินดิวิจแออร์โฟลเทชันนี้จะมีขนาดเล็ก น้ำหนักน้อย การบำรุงรักษาค่อนข้างง่าย ใช้เวลาในการกำจัดน้ำมันน้อย มีประสิทธิภาพสูง และค่าใช้จ่ายต่ำ ข้อดีอีกประการหนึ่งของกระบวนการอินดิวิจแออร์โฟลเทชัน คือ เป็นการเติมอากาศสู่น้ำเสียจึงช่วยเพิ่มค่าออกซิเจนละลายให้น้ำเสียอีกทางหนึ่งด้วย (Rubio และคณะ, 2002)

2.7.1 กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศกับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมัน

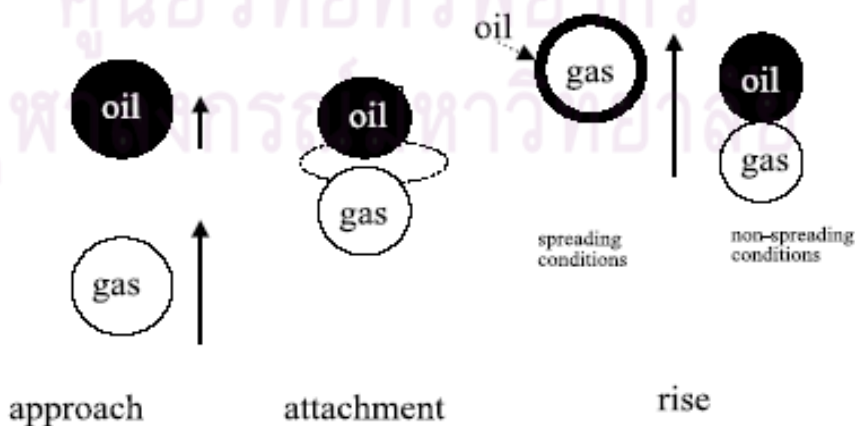
หลักการของการบำบัดก็คือ การทำให้ฟองอากาศเกิดการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งทั้งฟองอากาศและอนุภาคน้ำมันมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงพยายามลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ทำให้สามารถเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำมันกับน้ำได้เร็วกว่าการปล่อยให้ไขมันแยกตัวออกจากน้ำเสียเองตามธรรมชาติ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคน้ำมัน ระยะเวลาที่ใช้ในการเติมอากาศ ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมัน ฟองอากาศและน้ำ การเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันและฟองอากาศในของเหลว และการเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเติมอากาศ

2.7.1.1 ขนาดของอนุภาคน้ำมัน

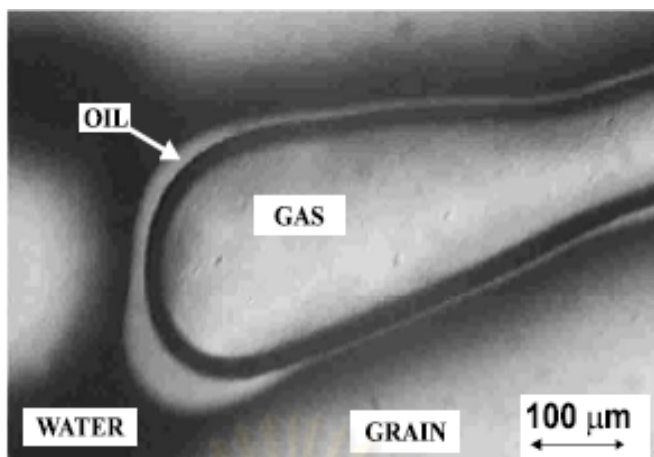
โดยทั่วไปน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันในรูปอิมัลชัน จะมีขนาดของอนุภาคน้ำมันประมาณ 3-20 ไมครอน ซึ่งจากกฎของสโตก จะได้ว่าในการแยกตัวของอนุภาคน้ำมันที่มีขนาด 70 และ 20 ไมครอน จะต้องใช้เวลาประมาณ 600 และ 3,000 วินาที ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียที่ไม่มีมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิว ส่วนน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว อนุภาคน้ำมันจะมีขนาดประมาณ 3-5 ไมครอน ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาการแยกนานถึงประมาณ 24-26 ชั่วโมง เพื่อให้เหลือความเข้มข้นของน้ำมันต่ำกว่า 100 มก./ล. (Deng และคณะ, 2004)

2.7.1.2 การสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมัน

โดยปกติฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคน้ำมัน คือจะมีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมครอนและความหนาแน่นต่างจากน้ำถึงประมาณ 0.9 กรัม/ซม.³ เมื่อเปรียบเทียบกับความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันกับน้ำซึ่งมีค่าประมาณ 0.1 กรัม/ซม.³ จะเห็นได้ว่าผลต่างของความหนาแน่นของฟองอากาศกับน้ำสูงกว่าผลต่างของความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันกับน้ำมากถึง 9 เท่า ซึ่งส่งผลให้การลอยตัวของฟองอากาศเร็วกว่าอนุภาคน้ำมัน ดังนั้นเมื่อนำเอาฟองอากาศมาใช้ในการแยกน้ำมัน ฟองอากาศที่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำจะเกิดการชนและเกาะติดกับอนุภาคน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำ โดยอนุภาครวมของฟองอากาศและน้ำมันที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นฟองอากาศที่มีฟิล์มน้ำมันล้อมรอบ จึงทำให้สามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็วกว่าอนุภาคน้ำมันถึงประมาณ 10-100 เท่า เนื่องจากขนาดของอนุภาครวมมีขนาดใหญ่กว่าและผลต่างของความหนาแน่นเพิ่มจาก 0.1 กรัม/ซม.³ เป็น 0.9 กรัม/ซม.³ โดยกลไกการชนและเกาะติดของฟองอากาศและอนุภาคน้ำมันแสดงดังรูปที่ 2-23 และลักษณะของอนุภาครวมของฟองอากาศและน้ำมันที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2-24



รูปที่ 2-23 การชนและเกาะติดของฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมัน (Carlos และคณะ, 2002)



รูปที่ 2-24 ลักษณะของอนุภาครวมของฟองอากาศและน้ำมัน (Carlos และคณะ, 2002)

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเติมอากาศ

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศจะประสบความสำเร็จได้เมื่อ อนุภาคน้ำมันเกิดการชนและเกาะติดกับฟองอากาศ ทำให้อนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว โดยประสิทธิภาพของการเติมอากาศขึ้นอยู่กับ

1. แรงอุทกพลศาสตร์ เช่น การเคลื่อนที่ของฟองอากาศ และขนาดของอนุภาคน้ำมัน
2. แรงอุณหพลศาสตร์ เช่น แรงตึงผิว
3. ลักษณะทางกายภาพ-เคมี เช่น สภาวะทางเคมีบนพื้นผิวของหยดน้ำมันและฟองอากาศ

ประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวแปรตามกฎของสโตก เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของขนาดของฟองอากาศ ความเข้มข้นของน้ำมันที่เข้าระบบ การเติมสารเคมีเพื่อช่วยในการบำบัด ได้แก่ ความเข้มข้นและชนิดของสารเคมีที่ใช้ ค่าพีเอช รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเติมอากาศ อัตราการไหลของอากาศ ปริมาตรของอากาศต่อปริมาตรของน้ำเสีย อัตราการเติมสารเคมี และอัตราการกำจัดตะกอนน้ำมันอีกด้วย

ขั้นตอนที่มีความสำคัญของกระบวนการเติมอากาศ

1. การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน
2. การเคลื่อนตัวเข้าใกล้กันระหว่างอนุภาคน้ำมันกับฟองอากาศ
3. การแตกออกของฟิล์มน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคน้ำมันกับฟองอากาศ
4. การเชื่อมติดระหว่างอนุภาคน้ำมันกับฟองอากาศ เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์ของกระบวนการเติมอากาศ
5. การกำจัดน้ำมันที่ผิวน้ำออก

2.7.3 การเติมสารเคมีร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศ

การเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย เป็นขั้นตอนที่จำเป็นมากสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศ โดยสารเคมีที่เติมลงไปจะทำให้เกิดการลดลงของแรงผลัทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากประจุบนพื้นผิวของอนุภาคน้ำมัน ทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันที่เคลื่อนที่ชนกัน ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคน้ำมันใหญ่ขึ้นและลอยตัวขึ้นสู่น้ำได้เร็วขึ้นด้วย

ในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว การรวมตัวของอนุภาคน้ำมันเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากแรงผลัทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากประจุบนพื้นผิวของอนุภาคน้ำมัน จึงต้องมีกระบวนการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชัน เพื่อช่วยให้ไขมันเกิดการชนกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น กระบวนการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันนี้สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี คือการเติมสารเคมี เช่น สารประกอบอเล็กโตไลต์ สารลดแรงตึงผิว อลูมิเนียมซัลเฟต เกลือเฟอริก เป็นต้น หรือกระบวนการทางฟิสิกส์ เช่น กระบวนการเติมอากาศ เป็นต้น โดยสารเคมีที่ได้รับความนิยมได้แก่ สารเคมีในกลุ่ม Organic ionic polymers สารทำลายเสถียรภาพเป็นสารเคมีที่ช่วยในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศโดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อปรับปรุงประจุบนอนุภาคของอนุภาคน้ำมัน และพื้นผิวระหว่างอนุภาคน้ำมันและฟองอากาศ โดยที่ประจุตรงข้ามกับพื้นผิวของอนุภาคน้ำมันของสารเคมีจะไปเกิดปฏิกิริยาทำให้เป็นกลาง (Neutralization) กับประจุบนพื้นผิวของอนุภาคน้ำมัน และเกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ฟองอากาศเคลื่อนที่เข้าใกล้และชนได้ง่ายขึ้น และถูกจับด้วยฟองอากาศเคลื่อนที่ลอยตัวเร็วยิ่งขึ้น (ชูลีกร, 2547)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

(Li และ Gu, 2005)

ทำการศึกษารวมตัวของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำโดยใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษ ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย ความยาวของตัวกลาง และขนาดของเส้นใยตัวกลาง

อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้เป็นท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 73 มม. ยาว 70 ซม. โดยให้การไหลของน้ำเสียเป็นแบบการไหลในแนวนอน (horizontal flow) แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2-25 และตัวกลางที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ เส้นใยโพลีโพรพิลีน เส้นใยไนลอน และโพลีโพรพิลีนเม็ด

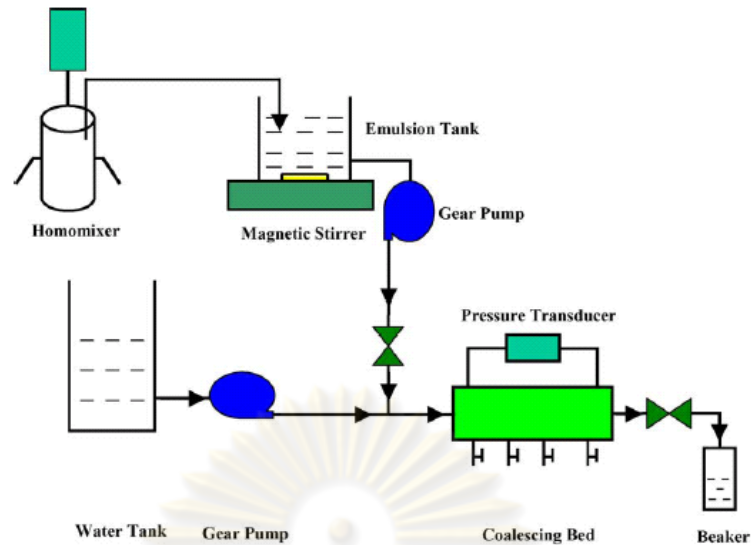


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up used to study the coalescence performance.

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

ผลการศึกษาพบว่า

1. สำหรับโคเอสเลอร์ที่การไหลของน้ำเสียเป็นแบบการไหลในแนวนอน ความยาวของตัวกลางจะไม่มีผลต่อการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน
2. ประสิทธิภาพของโคเอสเลอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเข้าโคเอสเลอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีช่วงที่เหมาะสมในการดำเนินการบำบัด ซึ่งสามารถหาได้จากการทดลอง
3. ความเข้มข้นของน้ำเสียและชนิดของตัวกลางที่ใช้ จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดอิมัลชันของอุปกรณ์โคเอสเลอร์

2.8.2 Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion

(Sokolović และคณะ, 2007)

ทำการศึกษารวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันเจือจาง โดยใช้อุปกรณ์โคเอสเลอร์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่

1. ความยาวของชั้นตัวกลาง ทำการศึกษาความยาวของชั้นตัวกลาง 3-15 ซม.
2. ลักษณะการไหลของน้ำ ทำการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำ 3 รูปแบบ ได้แก่ การไหลในแนวราบ การไหลในแนวตั้งแบบไหลลง และการไหลในแนวตั้งแบบไหลขึ้น

3. ลักษณะสมบัติของตัวกลาง ทำการศึกษา โดยใช้เส้นใยโพลียูรีเทน (Polyurethane (PU) fibers) ที่มีลักษณะสมบัติต่างกัน 5 ชนิด
4. ความเร็วการไหลของน้ำ ค่าความเร็วที่ทำการศึกษา ได้แก่ 16-50 ม./ชม.
5. ความเข้มข้นของน้ำมัน 500-10,000 มก./ล. โดยมีขนาดของอนุภาคน้ำมันเฉลี่ย 20 ไมครอน

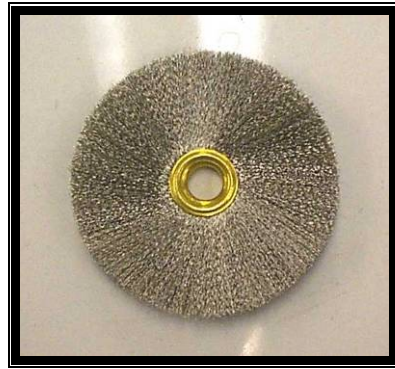
โดยในการเปรียบเทียบผลการทดลองจะใช้ค่าความเร็ววิกฤติ (Critical velocity) ซึ่งได้แก่ ความเร็วการไหลที่ให้ค่าความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำทิ้งเท่ากับ 15 มก./ล. และความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำทิ้ง

ผลการศึกษาพบว่า

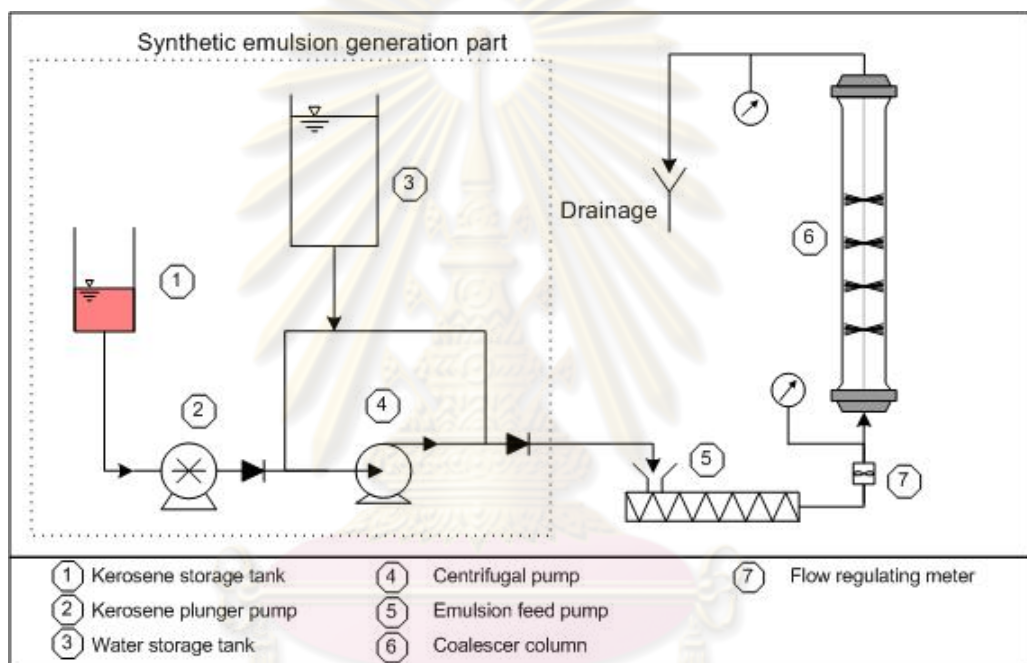
1. การไหลของน้ำในแนวราบจะให้ค่าความเร็ววิกฤติสูงสุดในทุกการทดลอง
2. ความเร็ววิกฤติจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อค่าการซึมผ่านได้ของน้ำของตัวกลางและความยาวของตัวกลางเพิ่มขึ้น
3. ในช่วงที่ความยาวของตัวกลางมีค่าน้อย ความเร็ววิกฤติจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความยาวของตัวกลางมีค่ามากขึ้น ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียจะไม่มีผลกระทบต่อความเร็ววิกฤติ
4. ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำทิ้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียเพิ่มขึ้น

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

ทำการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง ความเร็วการไหลของน้ำเสีย และการวางตัวกลางแบบขั้นตอน (Multi-stage bed configuration) ต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ โดยใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ทรงกระบอกและตัวกลางแบบเส้นใยทำจากสแตนเลสสตีล ขนาด 60 ไมครอน มีลักษณะเป็นแบบวงแหวนดังแสดงในรูปที่ 2-26 และแผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2-27 ซึ่งจะทำการศึกษาทดลองโดยใช้มีลชันของคีโรซีนในน้ำที่ความเข้มข้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ขนาดเฉลี่ยของหยदन้ำมัน 10 ไมครอน



รูปที่ 2-26 ตัวกลางแบบวงแหวนที่ใช้ในการศึกษา (Wanichkul, 2000)



รูปที่ 2-27 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง (Wanichkul, 2000)

ผลการศึกษาพบว่า

1. ความสูงของตัวกลางและความเร็วการไหลของน้ำ เป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมประสิทธิภาพของโคอเลสเซอร์ โดยประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-7 ซม. หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และการเพิ่มความเร็วการไหลของน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของโคอเลสเซอร์ลดลง
2. โคอเลสเซอร์ที่มีการวางตัวกลางแบบชั้นตอน จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการวางตัวกลางแบบติดกันถึง 25% และยังช่วยลดการอุดตันของตัวกลางได้ด้วย

2.8.4 Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup

(Moosai และ Dawe, 2003)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากำบัติน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศ โดยจะมุ่งเน้นไปที่กลไกการชนกันของฟองอากาศและอนุภาคน้ำมัน รวมไปถึงผลกระทบของการใช้สารลดแรงตึงผิว

ผลการศึกษาพบว่า

1. ประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศ จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของฟองอากาศ นอกจากนี้การเติมสารเคมีเพื่อช่วยรวมอนุภาคน้ำมันจะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย
2. เมื่ออนุภาคน้ำมันเกิดการชนและรวมตัวกับฟองอากาศ อนุภาครวมที่ได้จะกลายเป็นฟองอากาศที่มีน้ำมันเคลือบเป็นฟิล์มอยู่ที่ผิว ทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นและผลต่างของความหนาแน่นของอนุภาครวมกับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็วขึ้น
3. กระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศจะทำงานได้ดีกับอนุภาคน้ำมันขนาด 20 ถึง 150 ไมครอน และประสิทธิภาพจะต่ำเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 3 ไมครอน

2.8.5 Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation (Meysami และ Kasaeian, 2005)

ทำการศึกษาเพื่อนำเอากระบวนการอินดิวิจอร์แอริฟเลชันมาใช้ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากน้ำมันมะกอกร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 6 ชนิด ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต อะนีนีน บิวทานอล ไดโซเดียมฟอสเฟต ไตรโซเดียมฟอสเฟต และเททราโพน โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่

1. การทดลองด้วยวิธีจาร์เจสต์ เพื่อหาชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ให้อิมัลชันที่มีเสถียรภาพสูงที่สุด โดยวัดจากความขุ่นของอิมัลชัน
2. การทดลองด้วยวิธีจาร์เจสต์ เพื่อหาความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชัน โดยทำการศึกษาโคแอกกูแลนต์ 4 ชนิด ได้แก่ ไคโตซาน สารส้ม น้ำแป้ง และเพอริกคลอไรด์
3. การศึกษาการนำเอากระบวนการอินดิวิจอร์แอริฟเลชันใช้ในการบำบัดอิมัลชันร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว อัตราการไหลของอากาศ และระยะเวลาเติมอากาศ

ผลการศึกษาพบว่า

1. การใช้โคโตซานร่วมกับสารส้มที่ความเข้มข้น 15 มก./ล. และ 25 มก./ล. ตามลำดับ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 สามารถลดความขุ่นของอิมัลชันได้มากถึง 90%
2. การใช้โคโตซาน 100 ส่วนในล้านส่วน ร่วมกับการเติมอากาศด้วยอัตราการไหล 3 ลิตร/นาที่ นาน 45 วินาที ที่พีเอช 6 จะบำบัดอิมัลชันของน้ำมันมะกอกได้ดีที่สุด โดยสามารถลดค่าซีไอดีได้ถึง 95%

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง จะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการทำงานของโคอะเลสเซอร์ พฤติกรรมการรวมตัวของเฟสกระจายในขณะที่ผ่านมาชั้นตัวกลาง และการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ ซึ่งจะพบได้ว่าประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ส่วนใหญ่ยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ นอกจากนี้การนำเอาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ไปใช้ยังมีปัญหาในเรื่องการอุดตันของตัวกลาง รวมไปถึงวัสดุตัวกลางมีราคาแพงและหาซื้อได้ยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์โดยการนำเอาการวางตัวกลางแบบชั้นตอน การเติมสารเคมี และกระบวนการอินดิวิชแอโรโพลเทชันเข้ามาประยุกต์ใช้ รวมไปถึงศึกษาเพื่อนำเอาวัสดุราคาถูกลงและหาซื้อได้ง่ายมาใช้แทนตัวกลางสำเร็จรูปราคาแพงอีกด้วย ซึ่งจะทำการศึกษาโดยมุ่งเน้นไปที่น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปของอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากเป็นน้ำมันที่มีเสถียรภาพสูง และยากต่อการบำบัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

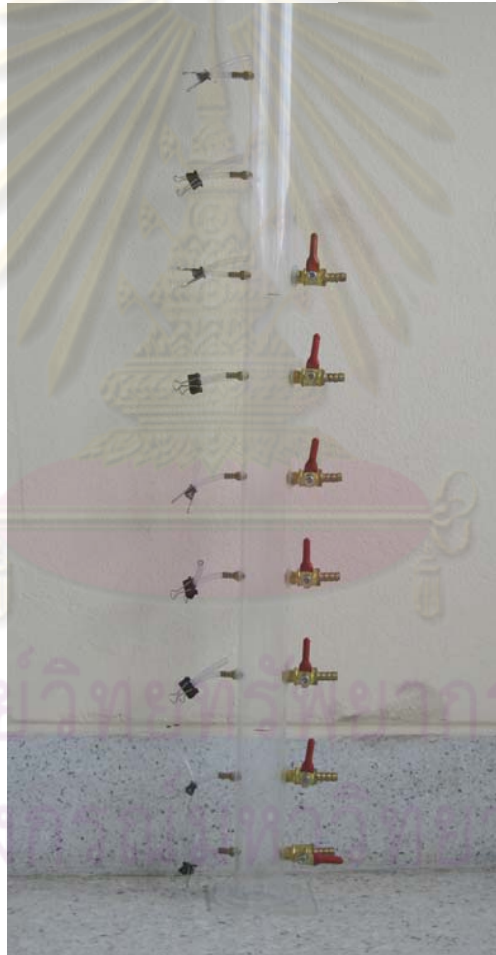
บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

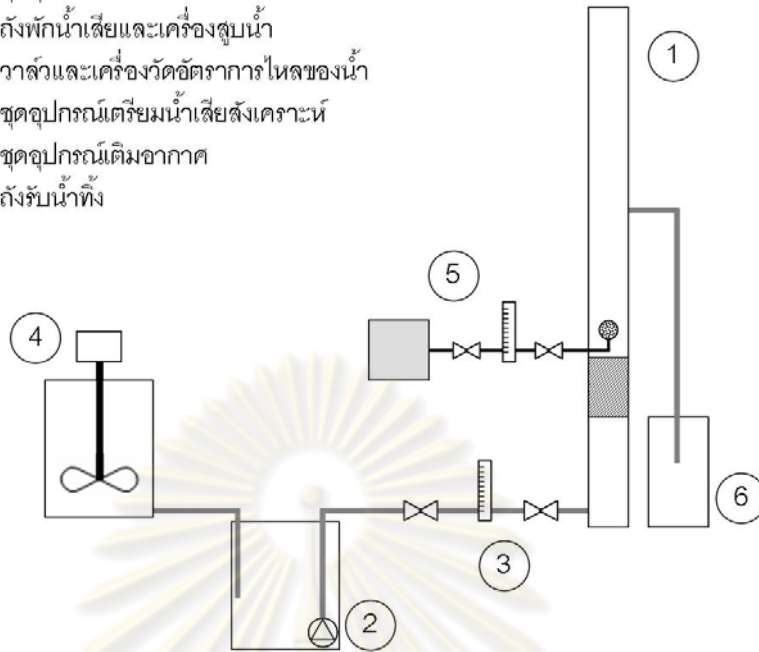
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ทำจากท่อพลาสติกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 1 ม. ดังแสดงในรูปที่ 3-1 โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3-2



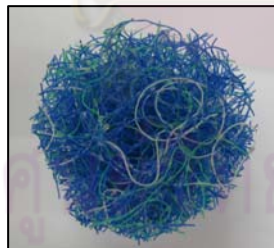
รูปที่ 3-1 ถึงปฏิบัติการสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

- 1) ชุดอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์
- 2) ถังพักน้ำเสียและเครื่องสูบน้ำ
- 3) วาล์วและเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
- 4) ชุดอุปกรณ์เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
- 5) ชุดอุปกรณ์เติมอากาศ
- 6) ถังรับน้ำทิ้ง



รูปที่ 3-2 แผนผังแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง

2. ตัวกลางสำหรับโคอะเลสเซอร์แบบเส้นใย (fibrous coalescing bed) ใช้ตัวกลางแบบเส้นใย 2 ชนิด (ดังรูปที่ 3-3) ได้แก่
 - ฝอยขัดหม้อสแตนเลส บริษัท ยูนิ-ท้อป เทรดิง (1988) จำกัด
 - เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา



(ก) เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

(ข) ฝอยขัดหม้อสแตนเลส

รูปที่ 3-3 ตัวกลางแบบเส้นใยที่ใช้ในการศึกษา

3. เครื่องปั่น (Motor stirrer) บริษัท เบคไทย (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น IKA LABORTECHIK
4. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible pump) ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 1,000 ลิตร/ชั่วโมง บริษัท JUN aquarium equipment รุ่น HX-2500

5. เครื่องเติมอากาศ ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 6.5 ลิตร/นาที บริษัท HAILEA รุ่น ACO-9905
6. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 20 ลิตร/ชั่วโมง บริษัท New-Flow Technologies ,INC
7. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 1.5 ลิตร/นาที บริษัท Matheson รุ่น E 436
8. หัวเติมอากาศแบบหัวทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 หัวเติมอากาศแบบหัวทรายที่ใช้ในการทดลอง

9. ถังเก็บน้ำพลาสติกขนาด 10 ลิตร
10. นาฬิกาจับเวลา บริษัท KADIO รุ่น KD-2015
11. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง บริษัท Basler รุ่น A602f-2
12. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล บริษัท Canon รุ่น IXY digital 1000
13. กล้องจุลทรรศน์ บริษัท Nikon รุ่น YS2-H
14. คอมพิวเตอร์ บริษัท Hewlett-Packard
15. อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี (มันลิน, 2546)
 - หลอดทดสอบวัดค่าซีไอดี ขนาด 16x150 มม. พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (tetrafluoroethylene, TFE)
 - ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น 600 ที่สามารถให้ความร้อนอยู่ระหว่าง $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$
 - ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 100 และ 1,000 มล.
 - กระบอกลม (cylinder) ขนาด 200, 500 และ 1,000 มล.
 - ปิเปต (pipet) ขนาด 1, 5, 10 และ 25 มล.
16. ชุดทดสอบ Jar test

3.1.2 สารเคมี

1. น้ำมันปาล์ม บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ จำกัด มหาชน โดยมีลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-1


ตารางที่ 3-1 ลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์ม บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ จำกัด มหาชน

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

ที่มา : บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ จำกัด มหาชน

2. สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ได้แก่ Sodium lauryl sulphate (SLS หรือ SDS) ของบริษัท Carlo Erba Co., Ltd ซึ่งมีลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ลักษณะสมบัติของ Sodium lauryl sulphate

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

3. สารทำลายเสถียรภาพ (Demulsifier) ได้แก่
 - สารส้ม (Alum, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) ของบริษัท Carlo Erba Co., Ltd
4. สารละลายมาตรฐาน Potassium Dichromate Digestion ($K_2Cr_2O_7$) ของบริษัท Carlo Erba Co., Ltd
5. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4) ความบริสุทธิ์ 98% บริษัท J.T. Baker

6. สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulfate ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
7. น้ำกลั่น

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้จะดำเนินการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลักๆ ได้แก่

3.2.1 การทดลองที่ 1 : การเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ในขั้นนี้เป็นการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่มีเสถียรภาพสูง โดยวัดจากความขุ่นของน้ำเสีย ซึ่งจะใช้ค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ให้ค่าความขุ่นของน้ำเสียเริ่มคงที่เป็นตัวแทนของจุด CMC (Critical micelle concentration) และใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองต่อไป รวมถึงทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

3.2.1.1 การทดลองที่ 1.1 : การหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม

ทำการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ในการเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่มีเสถียรภาพสูงที่สุด สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ ได้แก่ Sodium lauryl sulphate (SDS) โดยความเข้มข้นที่ทำการทดลอง คือ 0.58-28.84 กรัม/ลิตร และเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีวิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-5 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-5 แผนผังแสดงการหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรในการศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	1. น้ำประปา
2. ชนิดของน้ำมัน	2. น้ำมันปาล์ม
3. ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	3. Sodium lauryl sulphate (SDS)
4. ความเข้มข้นน้ำมัน	4. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
5. ปริมาตรน้ำตัวอย่าง	5. 100 มิลลิลิตร
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของ SDS	1. 0.58-28.84 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ค่าความขุ่นของน้ำเสีย	1. ค่าความขุ่นของน้ำเสีย

3.2.1.2 การทดลองที่ 1.2 : การศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของอนุภาคน้ำมัน ค่าความหนืด (Viscosity) และค่าซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีวิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-6 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-4



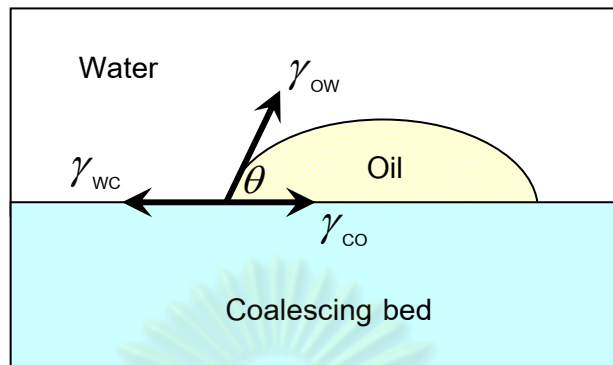
รูปที่ 3-6 แผนผังแสดงการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ 2. ชนิดของน้ำมัน 3. ชนิดของสารลดแรงตึงผิว 4. ความเข้มข้นน้ำมัน 5. ปริมาณน้ำตัวอย่าง	1. น้ำประปา 2. น้ำมันปาล์ม 3. Sodium lauryl sulphate (SDS) 4. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 5. 2 ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ขนาดอนุภาคน้ำมัน 2. ค่าความหนืด 3. ค่าซีไอดี	1. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2. ค่าความหนืด 3. ค่าซีไอดี

3.2.2 การทดลองที่ 2 : การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลาง

เมื่อพิจารณาการเกาะติดของหยดน้ำมันในน้ำบนผิวของตัวกลาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 แรงตึงผิวระหว่างน้ำ น้ำมัน และตัวกลาง

จะเห็นได้ว่า

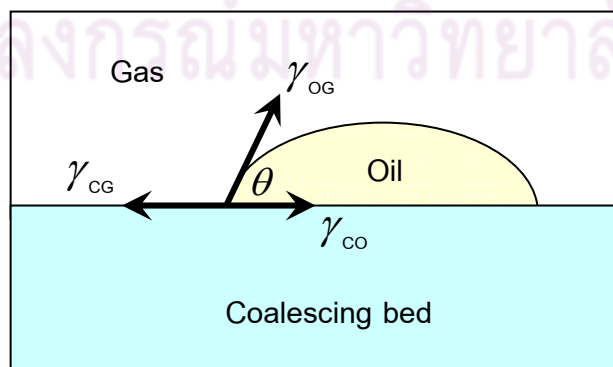
$$\gamma_{wc} = \gamma_{co} + \gamma_{ow} \cos \theta \quad (3-1)$$

เมื่อ

- γ_{wc} = แรงตึงผิวระหว่างน้ำกับตัวกลาง
- γ_{co} = แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง
- γ_{ow} = แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ

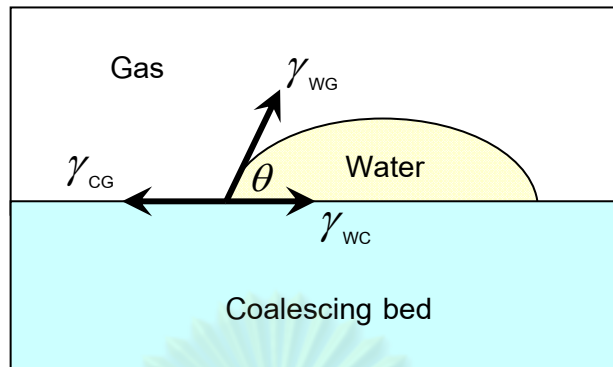
ซึ่งสอดคล้องกับสมการของ Young (สมการที่ 2-4)

จากสมการที่ 3-1 จะพบว่า หากต้องการทราบค่ามุมสัมผัส จะต้องทราบค่าแรงตึงผิวทั้งหมดก่อน แต่เนื่องจากค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับตัวกลาง (γ_{wc}) และค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับตัวกลาง (γ_{co}) นั้นทำการวัดได้ยาก จึงต้องทำการวิเคราะห์โดยการใช้น้ำมันและน้ำลงบนตัวกลางภายใต้อากาศ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิวได้ดังรูปที่ 3-8 และรูปที่ 3-9 ตามลำดับ



รูปที่ 3-8 แรงตึงผิวระหว่างน้ำมัน ตัวกลาง และอากาศ

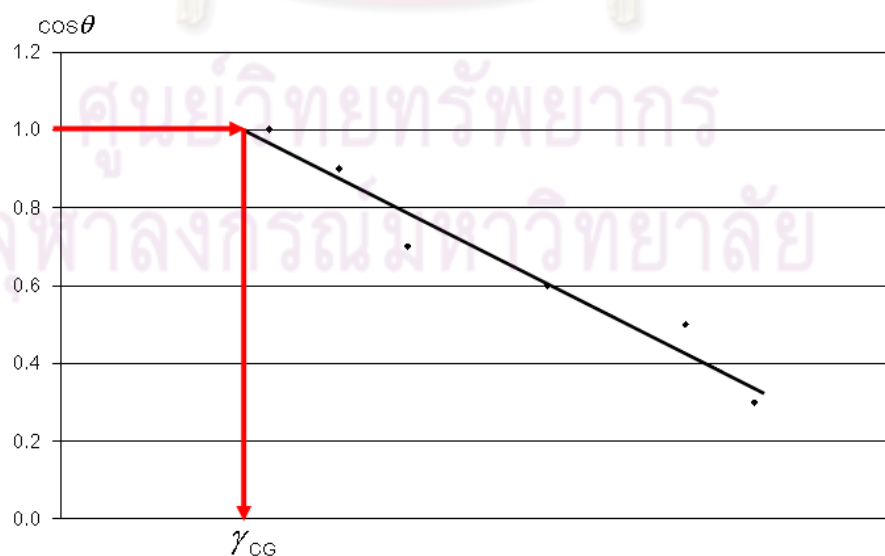
จาก รูปที่ 3-8 จะได้ว่า $\gamma_{CG} = \gamma_{CO} + \gamma_{OG} \cos \theta$ (3-2)



รูปที่ 3-9 แรงตึงผิวระหว่างน้ำ ตัวกลาง และอากาศ

จาก รูปที่ 3-9 จะได้ว่า $\gamma_{CG} = \gamma_{WC} + \gamma_{WG} \cos \theta$ (3-3)

แต่จากสมการที่ 3-2 และ 3-3 มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าก็คือ γ_{CG} ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของตัวกลาง เรียกว่า ค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง (Critical surface tension) ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีการของ Zisman (Method of Zisman) โดยจะทำการหยดน้ำซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน (รู้ค่าแรงตึงผิว) ลงบนผิวของตัวกลาง จากนั้นจึงทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแต่ละค่า เมื่อนำค่าแรงตึงผิวของน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ มาพล็อตกราฟกับค่าโคไซน์ของมุมสัมผัส ($\cos \theta$) จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3-10 ซึ่งค่าแรงตึงผิวของน้ำที่ให้ค่าโคไซน์ของมุมสัมผัสเท่ากับ 1 คือ ค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง (γ_{CG})



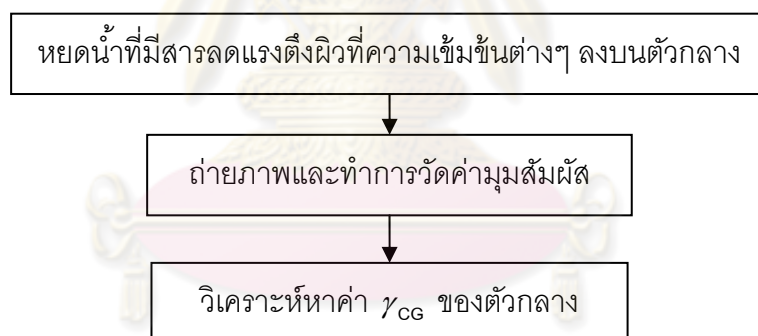
รูปที่ 3-10 ตัวอย่างการหาค่า γ_{CG} ด้วยวิธีของ Zisman

เมื่อทราบค่า γ_{CG} แล้ว ก็จะสามารถหาค่า γ_{CO} และ γ_{WC} ได้จากสมการที่ 3-2 และ 3-3 ตามลำดับ หลังจากนั้นก็จะหาค่ามุมสัมผัสได้จากสมการที่ 3-1

จากสมการที่ 3-1 จะเห็นได้ว่า ความไม่ชอบน้ำของตัวกลางสามารถบอกได้ด้วยค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันบนตัวกลาง โดยที่ตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำจะให้ค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลาง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เพื่อเลือกเส้นใยที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวกลางในการทดลองต่อไป โดยเส้นใยที่ทำการศึกษาได้แก่ เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา และฝอยขัดหม้อสแตนเลส การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

3.2.2.1 การทดลองที่ 2.1 : การหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง (Critical surface tension, γ_{CG})

ทำการทดลองหาค่าแรงตึงผิววิกฤติ (γ_{CG}) ของตัวกลางทั้งสองชนิดด้วยวิธีการของ Zisman (Method of Zisman) เพื่อนำไปใช้ในการหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำต่อไป โดยวิธีการทดลองแสดงผังแผนผังในรูปที่ 3-11 และตัวแปรในการศึกษาแสดงตารางที่ 3-5



รูปที่ 3-11 ผังผังแสดงการหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ 2. ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	1. น้ำประปา 2. Sodium lauryl sulphate (SDS)
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของ SDS 2. ชนิดของตัวกลาง	1. 0-1,900 มิลลิกรัม/ลิตร 2. เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา และเส้นใยสแตนเลส
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง	1. ค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง

3.2.2.2 การทดลองที่ 2.2 : การหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ

ทำการทดลองหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด โดยวิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-12 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-6



รูปที่ 3-12 แผนผังแสดงการหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการหาค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ

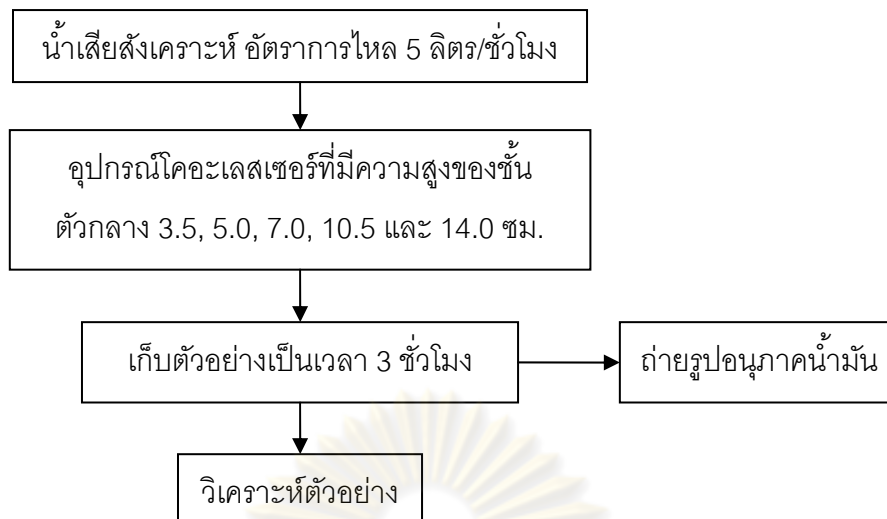
ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ 2. ชนิดของน้ำมัน 3. ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	1. น้ำประปา 2. น้ำมันปาล์ม 3. Sodium lauryl sulphate (SDS)
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวกลาง	1. เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา และเส้นใยสแตนเลส
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ความไม่ชอบน้ำของตัวกลาง	1. ค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำและน้ำมันบนตัวกลาง

3.2.3 การทดลองที่ 3 : การศึกษาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่ใช้ทั่วไป

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่ใช้ทั่วไป โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความยาวสูงของชั้นตัวกลาง และอัตราการไหลของน้ำเสีย เพื่อหาความสูงของชั้นตัวกลาง และอัตราการไหลของน้ำเสียที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเดินระบบแบบทีละเท (Batch) และทดลองกับตัวกลางทั้ง 2 ชนิด คือ เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา และเส้นใยสแตนเลส ซึ่งจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดจากค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี รวมถึงทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัด ซึ่งจากผลของการทดลองที่ 3 นี้ จะได้ชนิดและความสูงของชั้นตัวกลาง รวมถึงอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ทำงานแบบทีละเทที่จะนำไปใช้ในการทดลองอื่นๆ ต่อไป โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

3.2.3.1 การทดลองที่ 3.1 : การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาค่าความสูงของชั้นตัวกลาง 5 ค่า คือ 3.5, 5.0, 7.0, 10.5 และ 14.0 เซนติเมตร และควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่ 5 ลิตร/ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำตามเวลาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าซีไอดีและขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัด โดยการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-13 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-7



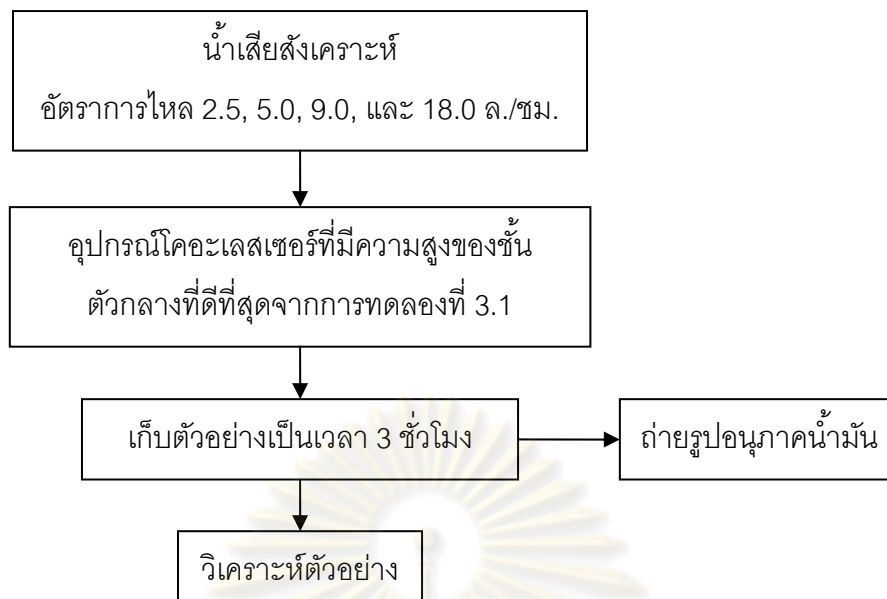
รูปที่ 3-13 แผนผังแสดงการศึกษาลักษณะของความสูงของชั้นตัวกลาง

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะของความสูงของชั้นตัวกลาง

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว	2. การทดลองที่ 1
3. อัตราการไหลของน้ำเสีย	3. 5 ลิตร/ชั่วโมง
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวกลาง	1. เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา และเส้นใยสแตนเลส
2. ความสูงของชั้นตัวกลาง	2. 3.5, 5.0, 7.0, 10.5 และ 14.0 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการบำบัด	1. ค่าซีไอดี
2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.2.3.2 การทดลองที่ 3.2 : การศึกษาลักษณะของอัตราการไหลของน้ำเสีย

ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีความสูงของชั้นตัวกลางที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.1 ซึ่งทำการศึกษารัตราการไหลของน้ำเสีย 4 ค่า คือ 2.5, 5.0, 9.0, และ 18.0 ลิตร/ชั่วโมง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำตามเวลาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าซีไอดีและขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัด โดยวิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-14 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-8



รูปที่ 3-14 แผนผังแสดงการศึกษามลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการศึกษามลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว	2. การทดลองที่ 1.1
3. ความสูงของชั้นตัวกลาง	3. การทดลองที่ 3.1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวกลาง	1. เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา และเส้นใยสแตนเลส
2. อัตราการไหลของน้ำเสีย	2. 2.5, 5.0, 9.0, และ 18.0 ลิตร/ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการบำบัด	1. ค่าซีไอดี
2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน

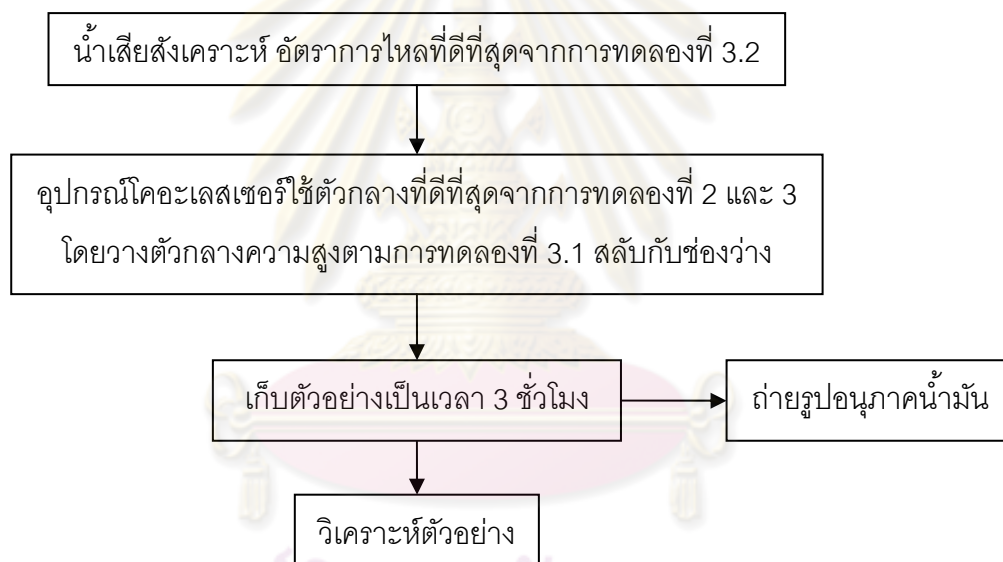
3.2.4 การทดลองที่ 4 : การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ทำการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2 โดยการประยุกต์ใช้วิธีการวางตัวกลางแบบชั้นตอน (Multi stage bed configuration) การเติมสารเคมี (Chemical addition) และกระบวนการอินดิวิจแอริฟเลชัน (Induce Air Flotation, IAF) โดยทำการเดินระบบแบบที่ละเท (Batch) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดจากค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี รวมถึงทำการศึกษา

ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งจะใช้ตัวกลางที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 2 และ 3 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ได้แก่

3.2.4.1 การทดลองที่ 4.1 : การวางตัวกลางแบบชั้นตอน

ทำการทดลองเพื่อศึกษาการนำเอาวิธีการเปลี่ยนรูปแบบการวางตัวกลาง มาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยจะวางตัวกลางเป็นชั้นสลับกับช่องว่าง โดยให้ตัวกลางแต่ละชั้นสูงเท่ากับความสูงที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.1 โดยใช้จำนวนของชั้นตัวกลาง 1, 2, 3 และ 4 ชั้น และอัตราการไหลของน้ำเสียที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.2 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำตามเวลาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และวิเคราะห์ค่าซีไอดีและขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยวิธีการทดลองแสดงผังในรูปที่ 3-15 และตัวแปรในการศึกษาแสดงผังตารางที่ 3-9



รูปที่ 3-15 ผังผังแสดงการศึกษาวิธีการวางตัวกลางแบบชั้นตอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการศึกษาวิธีการวางตัวกลางแบบขั้นต่อน

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 3. อัตราการไหลของน้ำเสีย	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 2. การทดลองที่ 1.1 3. การทดลองที่ 3.2
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะการวางตัวกลาง 2. จำนวนชั้นตัวกลาง	1. แบบขั้นต่อน และแบบธรรมดา 2. 1, 2, 3 และ 4 ชั้น
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการบำบัด 2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	1. ค่าซีไอดี 2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน

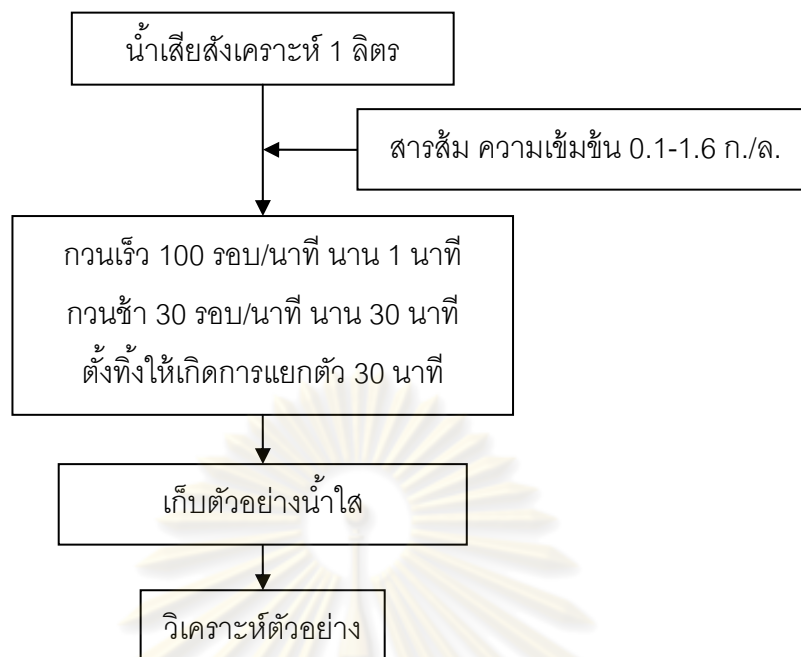
3.2.4.2 การทดลองที่ 4.2 : การเติมสารเคมี

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการเติมสารเคมีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้ความสูงของตัวกลางที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.1 และอัตราการไหลของน้ำเสียที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.2 โดยสารเคมีที่ใช้ได้แก่ สารส้ม (Alum) โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- การทดลองที่ 4.2.1 : การศึกษาความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสมโดยวิธีจาร์เจสต์

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีจาร์เจสต์ โดยความเข้มข้นของสารส้มที่ทำการทดลอง 0.1-1.6 กรัม/ลิตร วิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-16 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-10

ศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



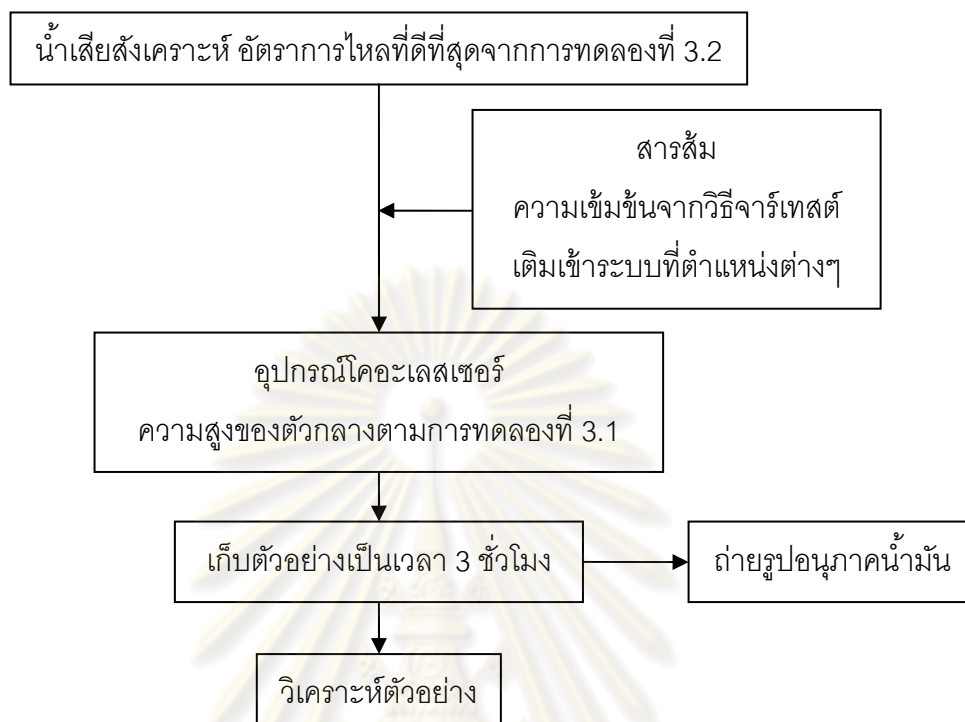
รูปที่ 3-16 แผนผังแสดงการศึกษาความเข้มข้นของสารส้อมที่เหมาะสมโดยวิธีจาร์เทสต์

ตารางที่ 3-10 ตัวแปรในการศึกษาความเข้มข้นของสารส้อมที่เหมาะสมโดยวิธีจาร์เทสต์

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว	2. การทดลองที่ 1.1
3. ปริมาตรน้ำเสีย	3. 1 ลิตร
4. ชนิดของสารเคมี	4. สารส้อม
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของสารส้อม	1. 0.1-1.6 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการบำบัด	1. ค่าซีไอดี

- การทดลองที่ 4.2.2 : การศึกษาตำแหน่งของการเติมสารเคมีที่เหมาะสม ทำการศึกษาตำแหน่งเติมสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้ความสูงของตัวกลางที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.1 และอัตราการไหลของน้ำเสียที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.2 โดยใช้ความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสมจากวิธีจาร์เทสต์ ซึ่งตำแหน่งเติมสารเคมีที่ทำการศึกษ ได้แก่ เติมในถังน้ำเสีย เติมในท่อน้ำเสียเข้า เติมใต้ตัวกลาง 1 ซม. และเติม

กลางตัวกลาง โดยวิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-17 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-11



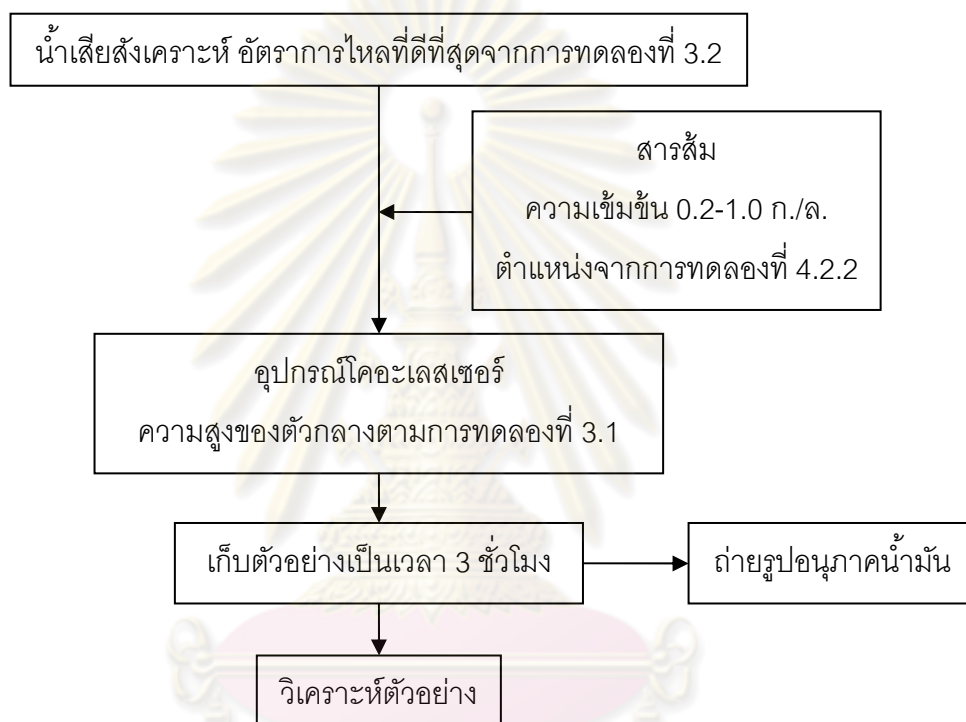
รูปที่ 3-17 แผนผังการศึกษาตำแหน่งของการเติมสารเคมีที่เหมาะสม

ตารางที่ 3-11 ตัวแปรในการศึกษาตำแหน่งของการเติมสารเคมีที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว	2. การทดลองที่ 1.1
3. อัตราการไหลของน้ำเสีย	3. การทดลองที่ 3.2
4. ชนิดของสารเคมี	4. สารส้ม
5. ความเข้มข้นของสารส้ม	5. การทดลองที่ 4.2.1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ตำแหน่งเติมสารส้ม	1. ในถังน้ำเสีย ในท่อน้ำเสียเข้า ใต้ตัวกลาง 1 ซม. และกลางตัวกลาง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการบำบัด	1. ค่าซีไอดี
2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน

- การทดลองที่ 4.2.3 : การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ทำการศึกษาดังกล่าวโดยศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารเคมีต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้ความสูงของตัวกลางที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.1 และอัตราการไหลของน้ำเสียที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.2 โดยความเข้มข้นของสารส้มที่ทำการทดลองได้แก่ 0.2-1.0 กรัม/ลิตร และเติมสารเคมีที่ตำแหน่งที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2.2 วิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-18 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-12



รูปที่ 3-18 แผนผังการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

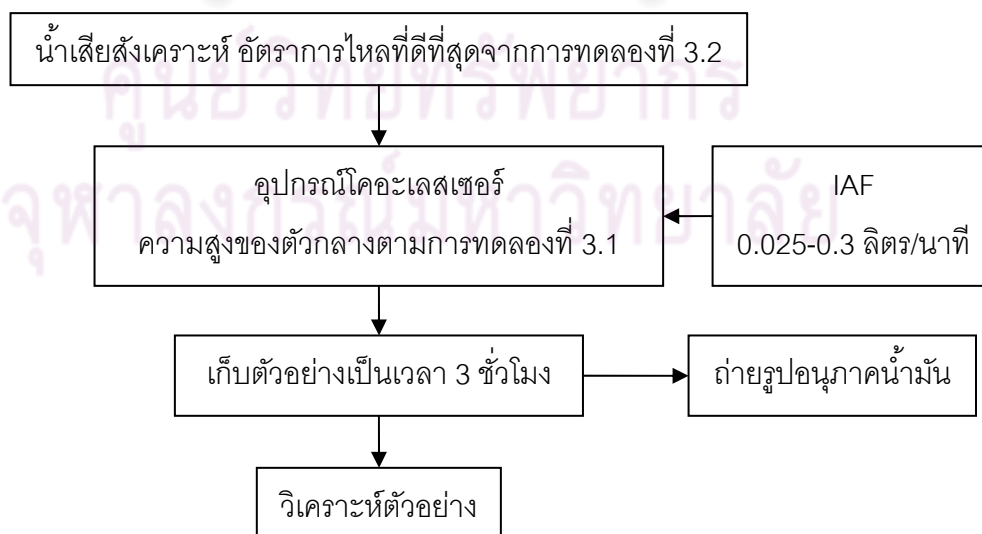
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3-12 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารสัมผัสต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 3. อัตราการไหลของน้ำเสีย 4. ชนิดของสารเคมี 5. ตำแหน่งเติมสารสัมผัส	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 2. การทดลองที่ 1.1 3. การทดลองที่ 3.2 4. สารสัมผัส 5. การทดลองที่ 4.2.2
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของสารสัมผัส	1. 0.2-1.0 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการบำบัด 2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	1. ค่าซีไอดี 2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.2.4.3 การทดลองที่ 4.3 : การประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิวิจแออร์โฟลเทชัน

ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอากระบวนการอินดิวิจแออร์โฟลเทชันมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้ความสูงของตัวกลางที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.1 และอัตราการไหลของน้ำเสียที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.2 โดยจะทำการเติมอากาศเหนือชั้นตัวกลางและใช้อัตราการเติมของอากาศ 0.025-0.3 ลิตร/นาที วิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-19 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-13



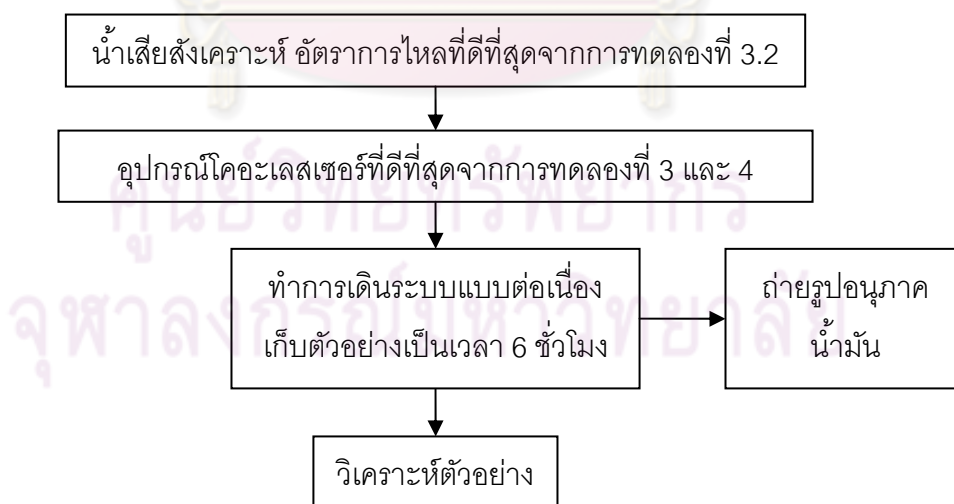
รูปที่ 3-19 แผนผังการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิวิจแออร์โฟลเทชัน

ตารางที่ 3-13 ตัวแปรในการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิคซ์แอร์โฟลเทชัน

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 3. อัตราการไหลของน้ำเสีย 4. ตำแหน่งเติมอากาศ	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 2. การทดลองที่ 1.1 3. การทดลองที่ 3.2 4. เหนือชั้นตัวกลาง
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. อัตราการเติมของอากาศ	1. 0.025-0.3 ลิตร/นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการบำบัด 2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	1. ค่าซีไอดี 2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.2.5 การทดลองที่ 5 : การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous)

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองนำอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3 และการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นการเดินระบบแบบที่ละเทมาทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบแบบต่อเนื่อง และความเป็นไปได้ในการนำเอาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ได้จากการศึกษาไปใช้งานจริง โดยวิธีการทดลองแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3-20 และตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-14



รูปที่ 3-20 แผนผังการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 3-14 ตัวแปรในการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 3. อัตราการไหลของน้ำเสีย	1. 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร 2. การทดลองที่ 1.1 3. การทดลองที่ 3.2
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
1. รูปแบบของโคอะเลสเซอร์	1. การทดลองที่ 3 และ 4
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการบำบัด 2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	1. ค่าซีไอดี 2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.3 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3-15 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
- ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว	- ค่าความขุ่นของน้ำเสีย
- ชนิดของวัสดุตัวกลาง	- ค่ามุมสัมผัส
- ความไม่ชอบน้ำของตัวกลาง	- ไม้บรรทัด
- ความหนาของชั้นตัวกลาง	- เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
- อัตราการไหลของน้ำเสีย	
- ลักษณะการวางตัวกลาง	
- การเติมสารเคมี	
- อัตราการไหลของอากาศ	- เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ
- ลักษณะการเติมอากาศ	
- คุณภาพของน้ำทิ้ง	- ค่าซีไอดี
- การรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน	- เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน

บทที่ 4

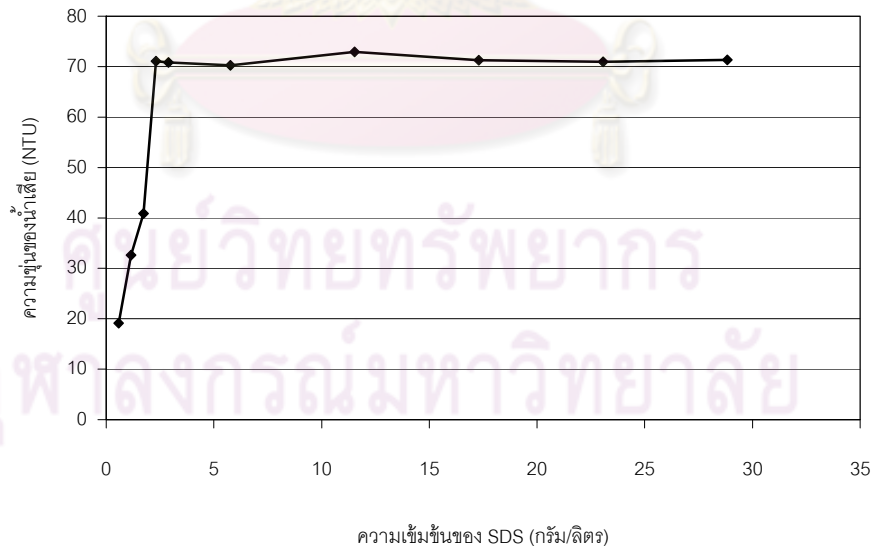
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ในส่วนนี้เป็นการทดลอง เพื่อหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร (Li และ Gu, 2005) และใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบ เพื่อสร้างอิมัลชันของน้ำมันที่มีความคงตัว (Stabilized oily emulsion) โดยใช้ค่าความขุ่นของน้ำเสียเป็นตัวแปรในการศึกษา (Meysami และ Kasaeian, 2005)

4.1.1 การหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม

จากการทดลองเพื่อทำการหาค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ พบว่าค่าความขุ่นของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของ SDS มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความขุ่นเริ่มมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของ SDS มีค่า 2.31 กรัม/ลิตร โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำเสียและความเข้มข้นของ SDS แสดงดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำเสียและค่าความเข้มข้นของ SDS

จากกราฟรูปที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าในช่วงค่าความเข้มข้นของ SDS มีค่าน้อยคือ 0.58-2.31 กรัม/ลิตร จะทำให้ความขุ่นของน้ำเสียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการลดลงของแรงตึง

ผิวระหว่างน้ำและน้ำมัน อีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวของน้ำมันมากพอที่จะดูดซับโมเลกุลของ SDS แต่เมื่อความเข้มข้นของ SDS มีค่ามากกว่า 2.31 กรัม/ลิตร จะเห็นได้ว่าความขุ่นของน้ำเสียมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมันเริ่มมีค่าคงที่ และพื้นที่ผิวของหยดน้ำมันที่เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กดูดซับโมเลกุลของ SDS จนเต็ม จึงส่งผลให้โมเลกุลของ SDS ที่เหลือเกิดการจับตัวกันเองเกิดเป็นไมเซลล์ ซึ่งส่งผลต่อความขุ่นของน้ำเสียน้อยมาก

ซูลีกร (2547) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ SDS, CTAB และ Tween 20 ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงตึงผิว พบว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวเกิดขึ้น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวมีค่าต่ำ ค่าแรงตึงผิวจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น และช่วงที่ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่ามากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวมีแนวโน้มลดลงและคงที่เมื่อปริมาณของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดลองของซูลีกรสอดคล้องกับค่าความขุ่นที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ดังนั้นจึงใช้ค่าความเข้มข้นของ SDS เท่ากับ 2.31 กรัม/ลิตร ในการเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์สำหรับการทดลองต่อไป

4.1.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียสังเคราะห์ที่จะใช้ในการศึกษา มีความเข้มข้นของน้ำมัน 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร (Ahmad และคณะ, 2006) และทำการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ (COD) ค่าความหนืด (Viscosity) และขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ซึ่งจะใช้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, D_{32}) เป็นตัวแทน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) สามารถคำนวณได้จากสมการ 4-1

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

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, D_{32})

คำนวณได้จากสมการ 4-2

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (4-2)$$

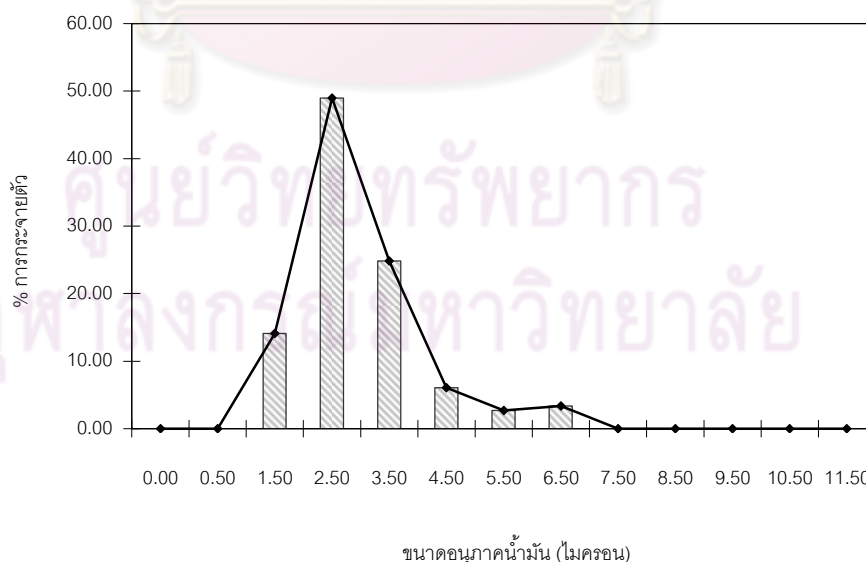
โดย D_i = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน
 n = จำนวนอนุภาคน้ำมัน

จากสมการที่ 4-1 และสมการที่ 4-2 จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทั้งสองแบบจะแตกต่างกันที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) จะคำนวณบนพื้นฐานของจำนวนเป็นหลัก แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, D_{32}) จะคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทรงกลมที่มีอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวที่เท่ากัน ซึ่งนิยมใช้ในกรณีพื้นที่ผิวของอนุภาคมีความสำคัญ (Creative Commons Attribution-ShareAike, 2009)

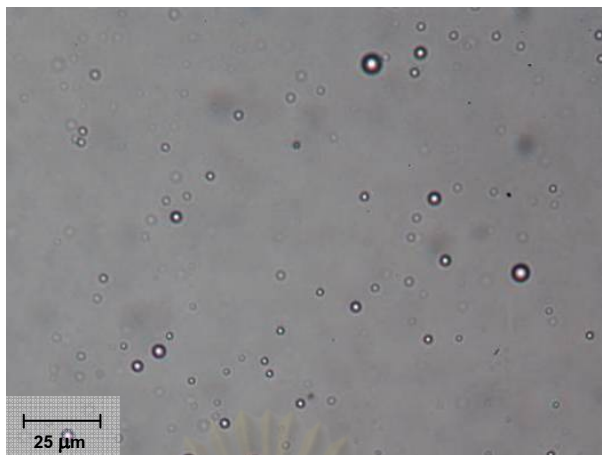
โดยผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-1 และเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียแสดงดังรูปที่ 4-2 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) เท่ากับ 2.90 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, D_{32}) เท่ากับ 3.69 ไมครอน นอกจากนี้รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า แสดงดังรูปที่ 4-3

ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

ความขุ่น (NTU)	71.08
ค่าซีไอดี (มก./ล.)	13,469
ความหนืด (cps)	19.70
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (ไมครอน)	2.90
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (ไมครอน)	3.69



รูปที่ 4-2 เปอร์เซนต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4-3 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์

จากรูปที่ 4-2 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคน้ำมันมีขนาด 1.5-6.5 ไมครอน โดยส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 2.5 ไมครอน ซึ่งมีจำนวนมากถึง 49% ของจำนวนอนุภาคน้ำมันทั้งหมด จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะเห็นได้ว่าน้ำเสียมักมีลักษณะเป็นอิมัลชันชั้นสอง (Secondary emulsion) คือ มีอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กกว่า 20 ไมครอน (Aurelle, 1985) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงและกำจัดโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกได้ยาก โดยจากกฎของสโตก (สมการที่ 2-8) จะสามารถคำนวณความเร็วในการลอยขึ้นของอนุภาคน้ำมันขนาด 3.69 ไมครอน ได้เท่ากับ 8.24×10^{-7} เมตร/วินาที หรือต้องใช้เวลากว่า 14 วัน ในการเคลื่อนที่ขึ้นเป็นระยะทาง 1 เมตร

นอกจากนี้ จากการทดลองหาค่าซีไอดีของ SDS ที่ความเข้มข้น 2.31 กรัม/ลิตร ในน้ำประปา พบว่ามีค่าซีไอดีเท่ากับ 3,648 มก./ล. และค่าซีไอดีของน้ำประปามีค่าเท่ากับ 0 มก./ล. ดังนั้นค่าซีไอดีของน้ำมันในน้ำเสียจึงมีค่าเท่ากับ 9,821 มก./ล. ซึ่งคิดเป็น 72.92% ของค่าซีไอดีทั้งหมด รวมทั้งความเข้มข้นของ SDS ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1 CMC ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันเป็นอนุภาคขนาดเล็กและดูดซับบนพื้นผิวของน้ำมันจนเต็มพอดี จึงเกิดไมเซลล์ของ SDS น้อยมาก ดังนั้น ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำจึงเป็นการแยกเอา SDS ที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคน้ำมันออกไปด้วย และค่าประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ซึ่งคิดจากค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์จึงสามารถใช้แทนประสิทธิภาพการแยกน้ำมันได้ โดยคำนวณจากสมการ 4-3

$$\%COD_{removed} = \frac{COD_{influent} - COD_{effluent}}{COD_{influent}} \quad (4-3)$$

โดย $\%COD_{removed}$ = ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี (%)
 $COD_{influent}$ และ $COD_{effluent}$ = ค่าซีไอดีของน้ำเสียและน้ำทิ้งตามลำดับ

4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลาง

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ คือ เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาและเส้นใยสแตนเลส ซึ่งมีลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 4-2 โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษาได้แก่ ค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง (γ_{CG}) และค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ ซึ่งเป็นตัวแปรที่จะบอกถึงความไม่ชอบน้ำของตัวกลางที่เป็นลักษณะสมบัติสำคัญของตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ตารางที่ 4-2 ลักษณะสมบัติของตัวกลางที่ทำการศึกษา

ลักษณะสมบัติ	เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา	เส้นใยสแตนเลส
ชนิดของวัสดุ	Polyester base	Stainless steel
ความพรุน (%)	97.23	97.08
พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (m^2/m^3)	443	1,586
ความหนาแน่นของตัวกลาง (g/cm^3)	1.72	4.99

4.2.1 การหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลาง (Critical surface tension, γ_{CG})

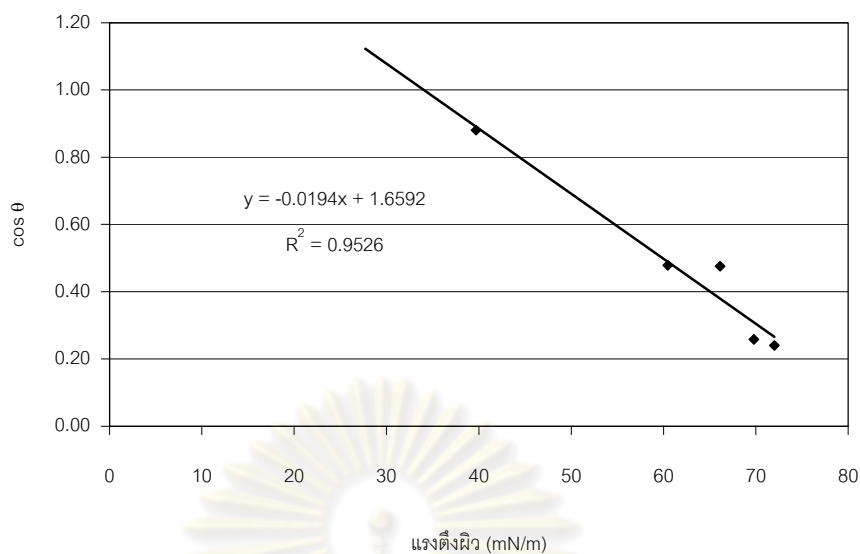
จากการทดลองถ่ายภาพหยดน้ำซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ กันบนผิวของตัวกลาง และทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ เพื่อหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา และเส้นใยสแตนเลส แสดงดังต่อไปนี้

4.2.1.1 ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

ผลการทดลองเพื่อหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาแสดงดังตารางที่ 4-3 และกราฟรูปที่ 4-4

ตารางที่ 4-3 ตัวแปรจากการทดลองหยดน้ำผสม SDS ที่ความเข้มข้นต่างๆ บนเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

ความเข้มข้นของ SDS (มก./ล.)	มุมสัมผัส, θ (องศา)	$\cos \theta$	แรงตึงผิว (mN/m)
0	76.11	0.240	72.00
50	75.00	0.259	69.78
110	61.60	0.476	66.12
200	61.40	0.479	60.45
1900	28.30	0.880	39.70



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับค่า $\cos \theta$ ของเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

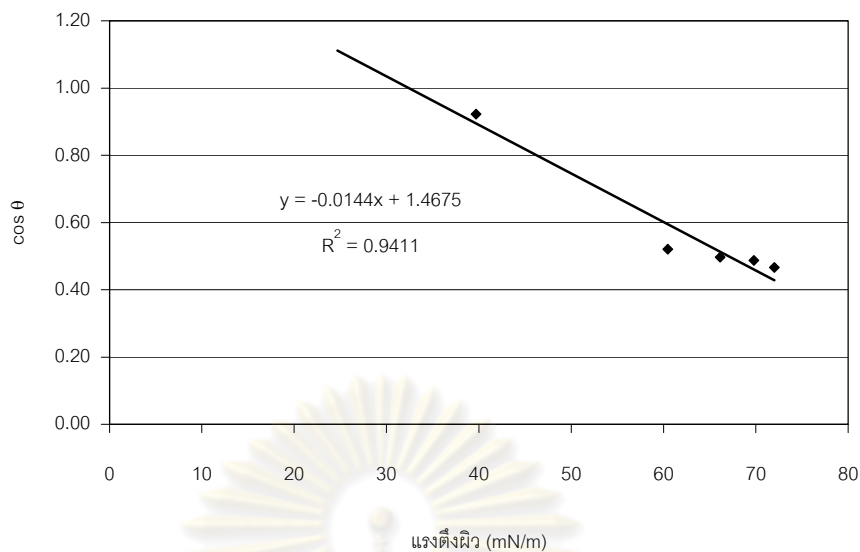
จากกราฟรูปที่ 4-4 จะเห็นได้ว่าที่ค่า $\cos \theta$ เท่ากับ 1 จะให้ค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 33.98 mN/m ดังนั้นค่าแรงตึงผิววิกฤติของเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา (γ_{CG}) มีค่าเท่ากับ 33.98 mN/m

4.2.1.2 ตัวกลางเส้นใยสแตนเลส

ผลการทดลองเพื่อหาค่าแรงตึงผิววิกฤติของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสแสดงดังตารางที่ 4-4 และกราฟรูปที่ 4-5

ตารางที่ 4-4 ตัวแปรจากการทดลองหยดน้ำผสม SDS ที่ความเข้มข้นต่างๆ บนเส้นใยสแตนเลส

ความเข้มข้นของ SDS (มก./ล.)	มุมสัมผัส, θ (องศา)	$\cos \theta$	แรงตึงผิว (mN/m)
0	62.22	0.466	72.00
50	60.80	0.488	69.78
110	60.22	0.497	66.12
200	58.63	0.521	60.45
1900	22.64	0.923	39.70



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับค่า $\cos \theta$ ของเส้นใยสแตนเลส

จากกราฟรูปที่ 4-5 จะเห็นได้ว่าที่ค่า $\cos \theta$ เท่ากับ 1 จะให้ค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 32.47 mN/m ดังนั้นค่าแรงตึงผิววิกฤติของเส้นใยสแตนเลส (γ_{CG}) มีค่าเท่ากับ 32.47 mN/m

4.2.2 การหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำ

จากสมการของ Young (สมการที่ 3-1) จะเห็นได้ว่าสามารถคำนวณหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนผิวของตัวกลางในน้ำได้จากค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและตัวกลาง และค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและตัวกลางในอากาศ ซึ่งได้จากผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.2.2.1 การหาค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและตัวกลาง (γ_{CO})

ผลการทดลองเพื่อหาค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและตัวกลางของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด โดยการหยดน้ำมันลงบนตัวกลาง พบว่าน้ำมันจะกระจายไปบนผิวของตัวกลางและไม่คงลักษณะของหยดน้ำมันอยู่บนตัวกลาง แสดงว่าค่ามุมสัมผัส (θ) มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งผลการคำนวณค่าแรงตึงผิวด้วยสมการของ Young (สมการที่ 3-2) แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ตัวแปรจากผลการทดลองหาค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและตัวกลางทั้ง 2 ชนิด

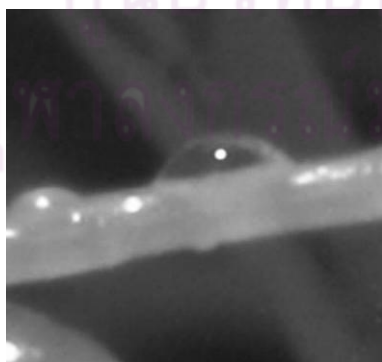
ตัวแปร	เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา	เส้นใยสแตนเลส
มุมสัมผัส, θ (องศา)	0	0
$\cos \theta$	1.00	1.00
γ_{CG} (mN/m)	33.98	32.47
γ_{OG} (mN/m)	31.00	31.00
γ_{CO} (mN/m)	2.98	1.47

4.2.2.2 การหาค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและตัวกลาง (γ_{wc})

จากการทดลองเพื่อหาค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและตัวกลางทั้ง 2 ชนิด โดยการหยดน้ำลงบนตัวกลางแล้วจึงทำการวัดค่ามุมสัมผัส และคำนวณค่าแรงตึงผิวด้วยสมการของ Young (สมการที่ 3-3) แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4-6 และตัวอย่างรูปถ่ายหยดน้ำบนตัวกลางแสดงดังรูปที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ตัวแปรจากผลการทดลองหาค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและตัวกลางทั้ง 2 ชนิด

ตัวแปร	เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา	เส้นใยสแตนเลส
มุมสัมผัส, θ (องศา)	65.73	63.62
$\cos \theta$	0.41	0.44
γ_{CG} (mN/m)	33.98	32.47
γ_{WG} (mN/m)	72.00	72.00
γ_{WC} (mN/m)	4.46	0.79



(ก) เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา



(ข) เส้นใยสแตนเลส

รูปที่ 4-6 รูปถ่ายหยดน้ำบนตัวกลางทั้ง 2 ชนิด

จากตารางที่ 4-5 และ 4-6 จะได้ว่าค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและตัวกลาง และค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและตัวกลางของตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา มีค่าเท่ากับ 2.98 mN/m และ 4.46 mN/m ตามลำดับ และสำหรับเส้นใยสแตนเลส มีค่าเท่ากับ 1.47 mN/m และ 0.79 mN/m ตามลำดับ

จากค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำกับตัวกลาง สามารถคำนวณค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำได้จากสมการของ Young (สมการที่ 3-1) โดยแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ เท่ากับ 40 mN/m (Yu และคณะ, 2006) ซึ่งผลการคำนวณค่ามุมสัมผัสของตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาและเส้นใย สแตนเลส มีค่าเท่ากับ 87.88 องศา และ 90.97 องศา ตามลำดับ แสดงว่าเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา มีความไม่ชอบน้ำมากกว่าเส้นใยสแตนเลส เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่า ดังนั้นจึงน่าจะสนใจที่จะประยุกต์ใช้เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาเป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยจะได้ทำการศึกษาในส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของน้ำเสียจากการทดลองต่อไป

4.3 การศึกษาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่ใช้ทั่วไป

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่ใช้ทั่วไป เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาและเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลาง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดของตัวกลาง ความสูงของชั้นตัวกลาง และอัตราการไหลของน้ำเสีย

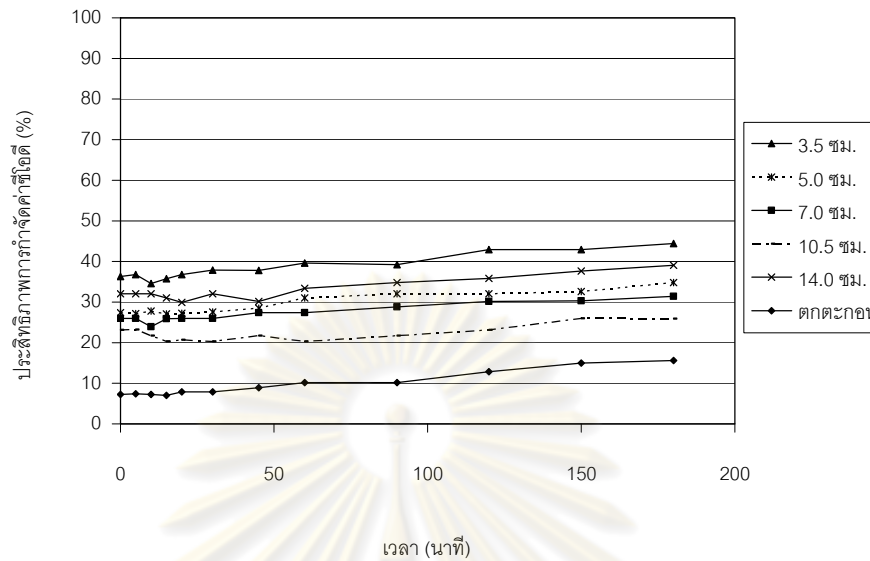
4.3.1 การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง

จากการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง ซึ่งทำการศึกษาดังกล่าว 2 ชนิด ได้แก่

4.3.1.1 เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

รูปที่ 4-7 แสดงผลการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา ซึ่งพบว่า ในช่วงความสูงของชั้นตัวกลางที่ทำการศึกษาคือ 3.5-14 ซม. ค่าความสูง 3.5 ซม. ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีสูงสุด โดยมีค่าประมาณ 35-45% นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าเมื่อความสูงของตัวกลางมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5, 7 และ 10.5 ซม. ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีมีค่าลดลง จึงเป็นไปได้ว่า ความสูงของตัวกลางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เกิดการรวมตัวกันแล้ว เกิดการแตกตัวอีกครั้ง จึงมีขนาดเล็กลงทำให้แยกตัวได้ช้าเมื่อตั้งทิ้งให้ตกตะกอน แต่เมื่อ

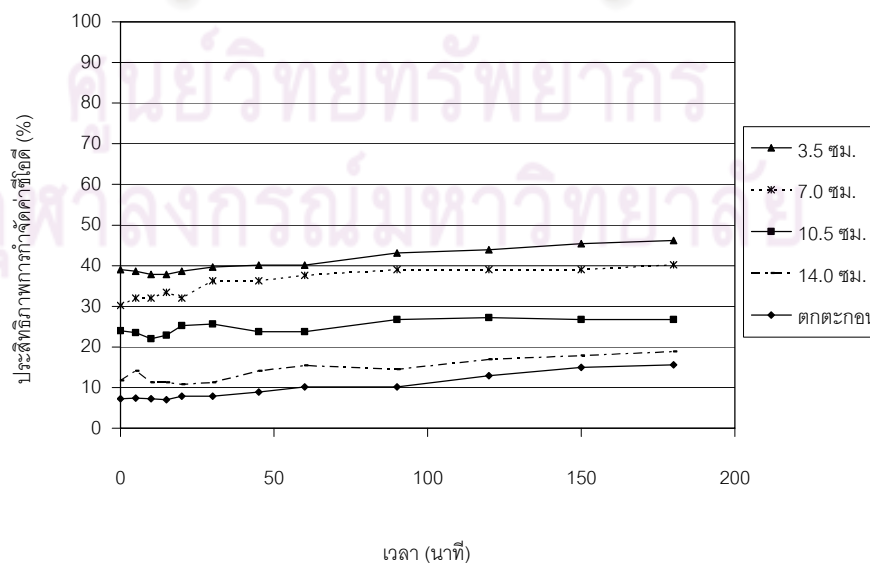
ความสูงของตัวกลางเพิ่มมากขึ้นอีกเป็น 14 ซม. กลับส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันอีกครั้งก่อนที่จะหลุดออกชั้นตัวกลาง



รูปที่ 4-7 ผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

4.3.1.2 เส้นใยสแตนเลส

รูปที่ 4-8 แสดงผลการศึกษาลักษณะผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา คือ ค่าความสูงของชั้นตัวกลาง 3.5 ซม. ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีสูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 38-46% รวมทั้งยังพบอีกว่าการเพิ่มขึ้นของชั้นตัวกลางจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา



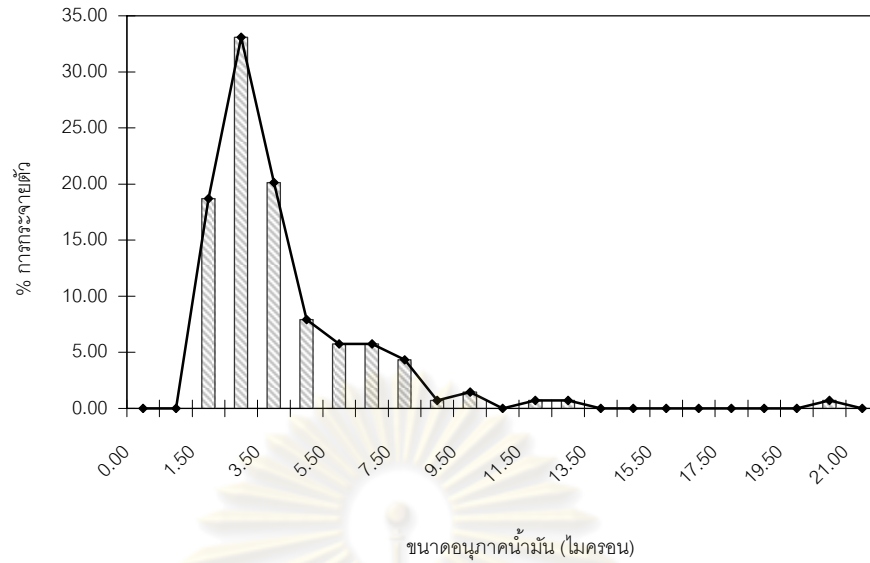
รูปที่ 4-8 ผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

จากกราฟรูปที่ 4-7 และรูปที่ 4-8 จะเห็นได้ว่าทุกค่าความสูงของตัวกลางทั้ง 2 ชนิดที่ทำการศึกษาจะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีสูงกว่าการตั้งให้ตกตะกอนโดยไม่ผ่านชั้นตัวกลาง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การใช้เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาและเส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางโคอะเลสเซอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวได้

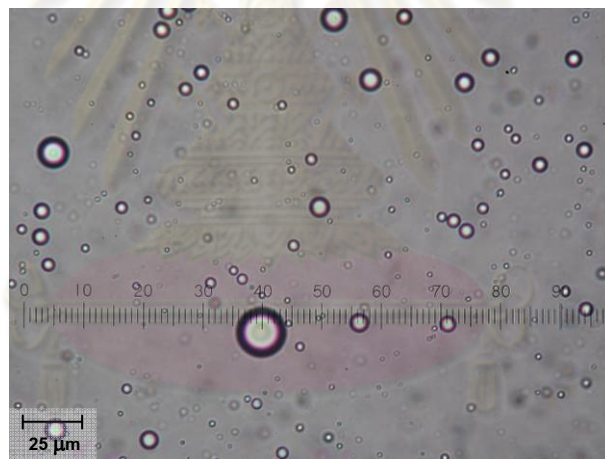
จากผลการศึกษาคูณสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลางและความสูงของชั้นตัวกลางพบว่าเส้นใยกรองน้ำตู้ปลามีความไม่ชอบน้ำมากกว่า แต่ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีใกล้เคียงกับเส้นใยสแตนเลส ซึ่งอาจเกิดจากเส้นใยสแตนเลสมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมากกว่าเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา ผลให้พื้นที่สำหรับการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันมากกว่า จึงเป็นไปได้ว่าอาจเกิดกลไกการกรองขึ้นมากกว่าการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งผิดจากหลักการของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ นอกจากนี้ เนื่องจากเส้นใยสแตนเลสมีอายุการใช้งานต่ำกว่าเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา เพราะจะเกิดสนิมเหล็กเกาะตามผิวเส้นใย รวมทั้งทำให้น้ำเสียเกิดการพบปะื้อนของสนิมเหล็ก ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงจะใช้เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาในการศึกษาในส่วนอื่นต่อไป

นอกจากนี้ผลการวัดขนาดอนุภาคน้ำมันของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม. พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) เท่ากับ 3.70 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (D_{32}) เท่ากับ 8.42 ไมครอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสีย (D_{mean} 2.90 ไมครอน และ D_{32} 3.69 ไมครอน) จะพบว่าค่า D_{mean} ของน้ำเสียและน้ำผ่านตัวกลางมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (0.80 ไมครอน) ในขณะที่ค่า D_{32} ของน้ำเสียและน้ำผ่านตัวกลางมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (4.73 ไมครอน) ดังนั้น การใช้ค่า D_{32} ในการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคน้ำมันจึงสามารถช่วยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนมากกว่าค่า D_{mean} เนื่องจากอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กมีจำนวนค่อนข้างมาก ดังนั้นการเฉลี่ยด้วยจำนวนจะทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ที่มีจำนวนไม่มาก ไม่มีนัยสำคัญต่อจำนวนทั้งหมดและขนาดเฉลี่ยมากนัก โดยเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม. แสดงดังรูปที่ 4-9 และตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันแสดงดังรูปที่ 4-10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

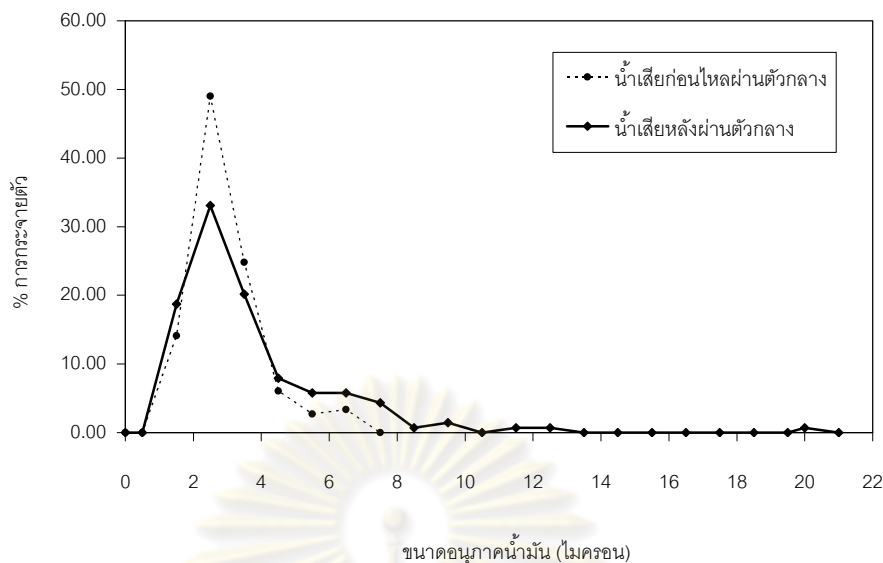


รูปที่ 4-9 เปรอเซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม.



รูปที่ 4-10 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม.

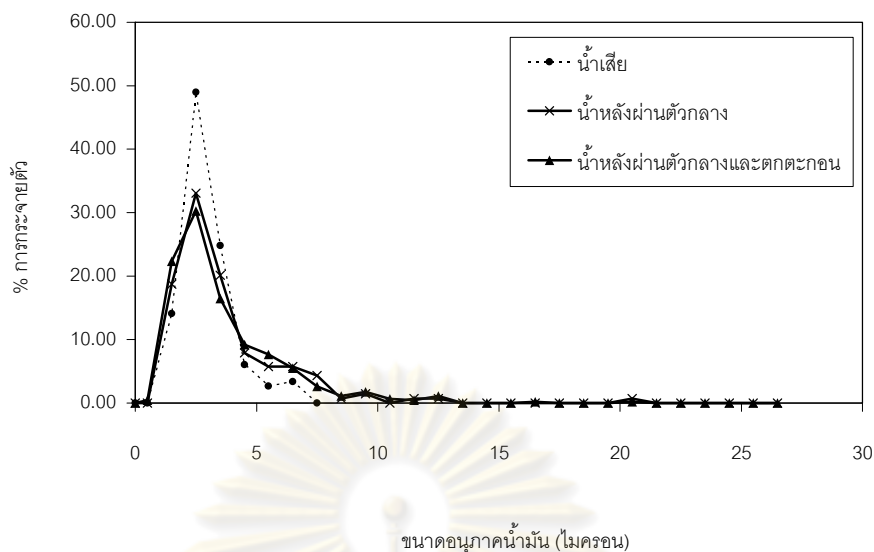
จากรูปที่ 4-9 และ รูปที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อไหลผ่านตัวกลาง แสดงว่าเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันจริง ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำเสียก่อนไหลผ่านตัวกลาง (แสดงดังรูปที่ 4-11) จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของน้ำมันในน้ำที่ผ่านตัวกลางมีขนาดอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กน้อยลงและมีอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กนั่นเอง



รูปที่ 4-11 กราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันของน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง

นอกจากนี้ ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม. และทำการตั้งทิ้งไว้ 90 นาที แสดงดังรูปที่ 4-12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคน้ำมันส่วนใหญ่มีขนาด 1-3 ไมครอน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) เท่ากับ 3.77 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (D_{32}) เท่ากับ 7.61 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันของน้ำหลังการตกตะกอนกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลางทันที จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันของน้ำหลังการบำบัดค่อนข้างใกล้เคียงกับน้ำที่ผ่านตัวกลางทันที แสดงว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไปสามารถรวมอนุภาคน้ำมันได้ส่วนหนึ่ง แต่ยังมีปัญหาในการกำจัดน้ำที่ผ่านตัวกลางมาแล้ว เนื่องจากยังคงมีอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กที่คงเหลืออยู่ภายในเฟสน้ำอีกจำนวนหนึ่ง ดังจะเห็นได้จากค่าซีไอดีซีของน้ำ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีซีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ไม่สูงมากนัก

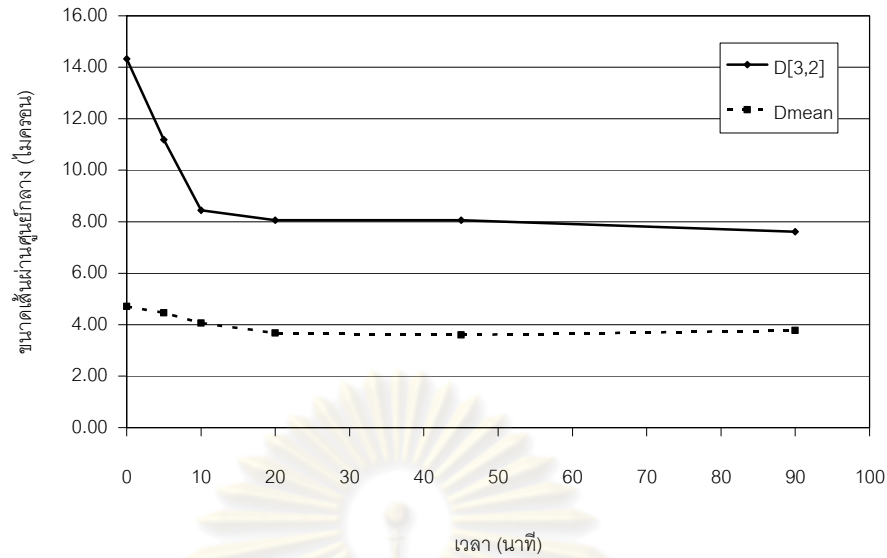
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-12 เปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางและตกตะกอน 90 นาที เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม. และทำการตั้งทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-13 จะเห็นได้ว่า

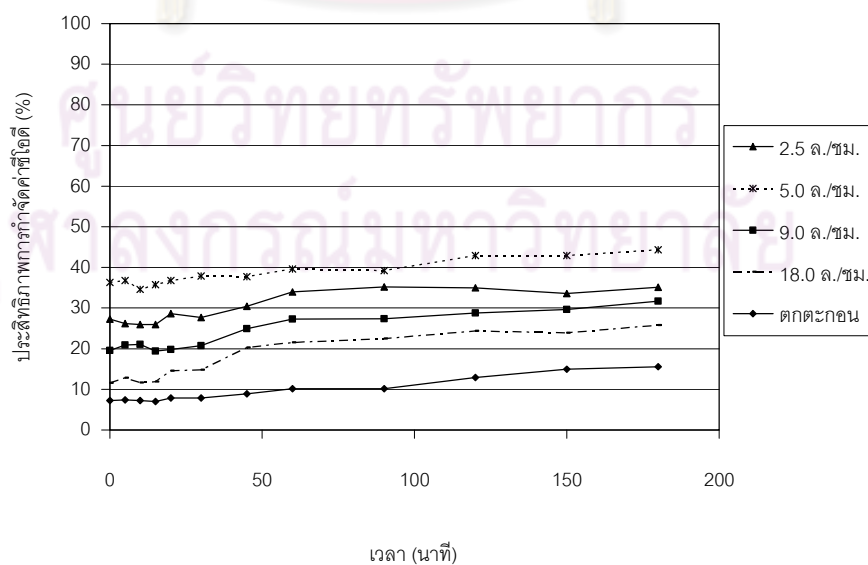
- ในช่วง 10 นาทีแรก ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคน้ำมันจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่กำลังลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าซีไอดีของน้ำทิ้ง (รูปที่ 4-7) ก็จะได้เห็นว่าสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี คือในช่วง 10 นาที ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีจะค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่อยู่
- และหลังจาก 10 นาที จะพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคน้ำมันจะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก จึงต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำนานกว่า และประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้น



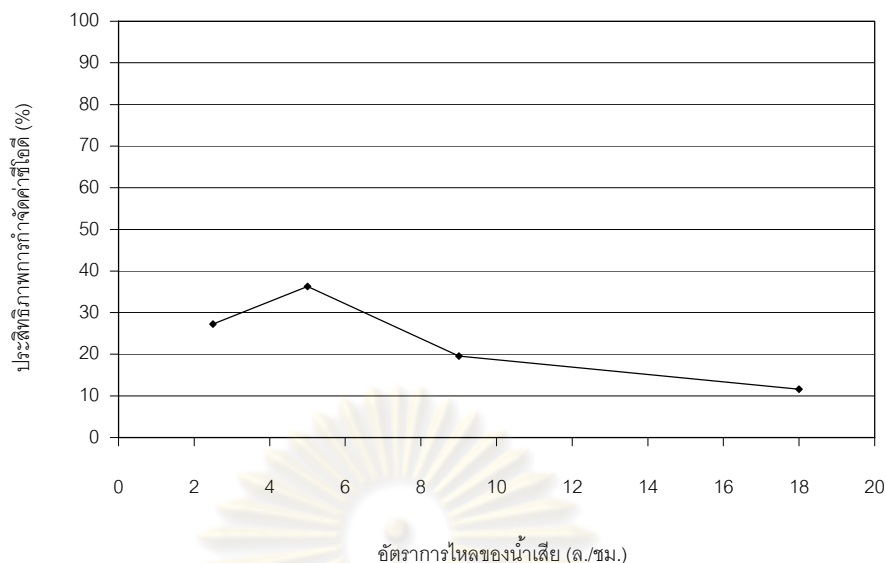
รูปที่ 4-13 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่เวลาต่างๆ ของโคอะเลสเซอร์

4.3.2 การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย

รูปที่ 4-14 แสดงผลการศึกษผลกระทบอัตราการไหลของน้ำเสียต่อค่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา ความสูงของชั้นตัวกลาง 3.5 ซม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่เหมาะสมที่สุด คือ 5 ลิตร/ชั่วโมง โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีประมาณ 35-45% และจะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามเวลา ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ณ เวลาเริ่มต้น ที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-14 ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี



รูปที่ 4-15 การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ณ เวลาเริ่มต้น ที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ

จากรูปที่ 4-15 จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีแบ่งได้ออกเป็น 2 ช่วง คือ

- ช่วงที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นพาให้อนุภาคน้ำมันเกิดการเคลื่อนที่แบบมีความเร็วและไปในทิศทางเดียวกับการไหล จึงทำให้เกิดการชนและเกาะติดกับเส้นใยตัวกลาง อีกทั้งยังทำให้เกิดการชนกับหยดน้ำมันที่ติดอยู่บนเส้นใยและเกิดการรวมตัวกันอีกด้วย แต่ที่อัตราการไหลต่ำๆ อนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่แบบบราวเนียน จึงมีโอกาสที่จะชนกับตัวกลางและชนกันเองน้อยลง
- ช่วงที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วการไหลของน้ำมีค่าสูงและเกิดการปั่นป่วน จึงทำให้อนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่กับตัวกลางหลุดออกจากตัวกลางได้ง่าย และหลุดออกจากตัวกลางก่อนที่จะมีขนาดใหญ่มากพอเหมาะ เมื่อน้ำมันที่ผ่านออกจากตัวกลางจึงมีขนาดเล็ก ส่งผลให้แยกตัวออกจากน้ำเสียได้ช้า

Li และ Gu (2005) ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ พบว่าประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่อ

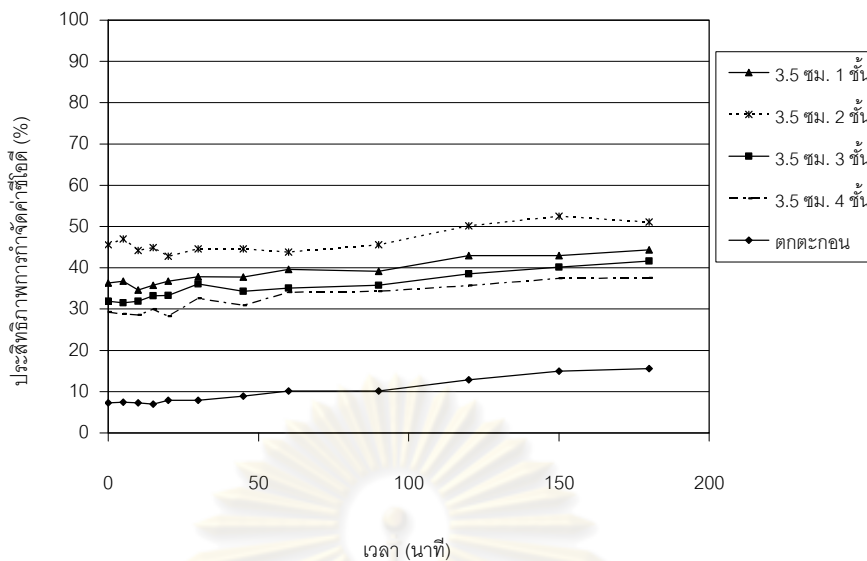
อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าโคอะเลสเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์จะมีค่าสูงสุด 9.37 % ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 267.11 มล./วินาที หรือความเร็ว superficial เท่ากับ 1.07 มม./วินาที ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองคือประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีสูงสุดที่อัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 5 ลิตร/ชั่วโมง หรือความเร็ว superficial เท่ากับ 0.91 มม./วินาที โดยจะเห็นได้จากกราฟรูปที่ 4-15 ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดลองของ Li และ Gu คือประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำเสีย จนมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตร/ชั่วโมง จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเข้าโคอะเลสเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Wanichkul (2000) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ พบว่าการเพิ่มความเร็วการไหลของน้ำ จะทำให้ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ลดลง โดยช่วงความเร็วการไหลของน้ำที่ทำการศึกษาคือ 2.0-6.8 ซม./วินาที

4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดี โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะการวางตัวกลาง การเติมสารเคมี และการประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิวิชแอรีโพลเทชัน (IAF) ซึ่งจากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาจะพบว่าตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ คือเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา เนื่องจากมีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากกว่าเส้นใยสแตนเลส นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของชั้นตัวกลางและอัตราการไหลของน้ำเสียที่เหมาะสม คือ 3.5 ซม. และ 5 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้ค่าตัวแปรดังกล่าวเป็นเงื่อนไขสำหรับการเดินระบบในการทดลองต่อไป

4.4.1 การวางตัวกลางแบบขั้นตอน

รูปที่ 4-16 แสดงผลการศึกษผลกระทบของการวางตัวกลางแบบขั้นตอน (Step bed configuration) โดยวางตัวกลางสูง 3.5 ซม. และเว้นช่องว่าง 3.5 ซม. จากกราฟจะเห็นได้ว่าการวางตัวกลางแบบขั้น 2 ชั้นตอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีประมาณ 8% ซึ่งแสดงว่าอนุภาคน้ำมันที่หลุดจากตัวกลางชั้นที่ 1 เกิดการรวมตัวกันอีกครั้งอย่างต่อเนื่องในตัวกลางชั้นที่ 2 (Re-coalesce) แต่กลับพบว่าเมื่อเพิ่มชั้นตัวกลางเป็น 3 และ 4 ชั้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีมีค่าลดลงประมาณ 3% และ 6% ตามลำดับ แสดงว่าการเพิ่มจำนวนชั้นตัวกลางมากเกินไปจะส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่รวมตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวอีกครั้งในชั้นตัวกลางชั้นถัดมาได้

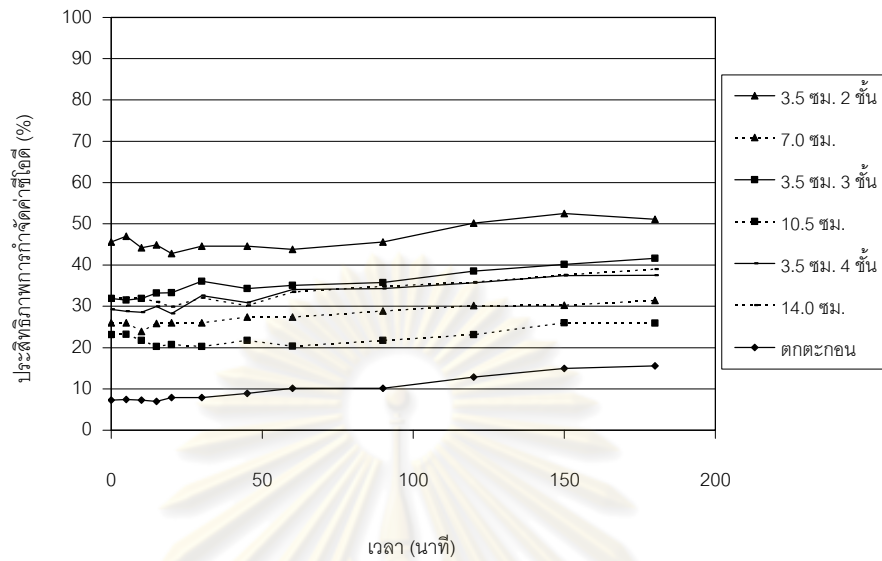


รูปที่ 4-16 ผลกระทบของการวางตัวกลางแบบขั้นตอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี

รูปที่ 4-17 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีของการวางตัวกลางแบบติดกันกับการวางตัวกลางแบบขั้นตอน ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบความสูงของตัวกลางที่เท่ากัน การวางตัวกลางแบบขั้นตอนจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีสูงกว่าการวางตัวกลางแบบติดกันทั้งหมด โดยการวางตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีสูงกว่าความสูงชั้นตัวกลาง 7 ซม. ถึง 19% ในขณะที่การวางตัวกลางแบบขั้นตอน 3 ชั้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีสูงกว่าความสูงชั้นตัวกลาง 10.5 ซม. ประมาณ 13% แสดงว่าเกิดกระบวนการรวมตัวอีกครั้งของอนุภาคน้ำมัน (Re-coalesce) จริง แต่สำหรับความสูงของตัวกลาง 14 ซม. พบว่าการวางตัวกลางแบบขั้นตอนไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี แสดงว่าสำหรับตัวกลางที่มีความสูงมากๆ การวางตัวกลางแบบขั้นตอนไม่ช่วยให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดการแตกตัวของอนุภาคที่รวมตัวกันแล้วอีกด้วย โดยจะเห็นได้จากประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีที่มีแนวโน้มลดลง

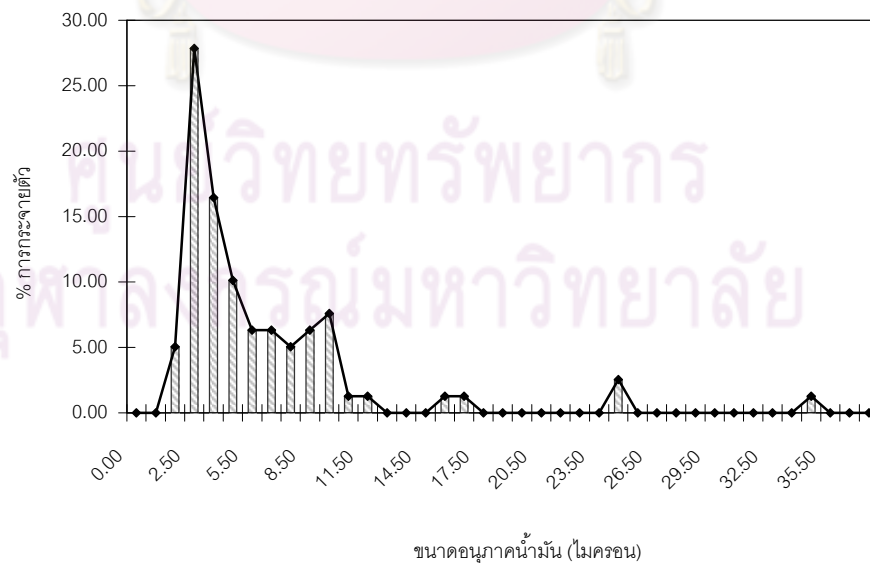
Wanichkul (2000) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการวางตัวกลางแบบขั้นตอน (Multi-stage bed configuration) ต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ พบว่าที่ความสูงของตัวกลางเท่ากัน ประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์แบบวางตัวกลางสลับกับช่องว่างจะสูงกว่าแบบธรรมดาประมาณ 10-15% อีกทั้งยังช่วยลดการอุดตันของตัวกลางได้ด้วย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของหยदन้ำมันผ่านชั้นตัวกลางที่หนาจะทำให้เกิดการเกาะติดบนตัวกลางไปตามระยะทางที่หยदन้ำมันเคลื่อนที่ผ่าน ในขณะที่การเคลื่อนที่ผ่านชั้นบางๆ จะทำให้โอกาสการเกาะติดอยู่บนตัวกลางน้อยกว่า รวมทั้งการหลุดของหยदन้ำมันออกจากตัวกลางที่หนาอาจเกิด

ลักษณะเป็นสาย ซึ่งจะให้น้ำมันแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก แทนที่จะเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่

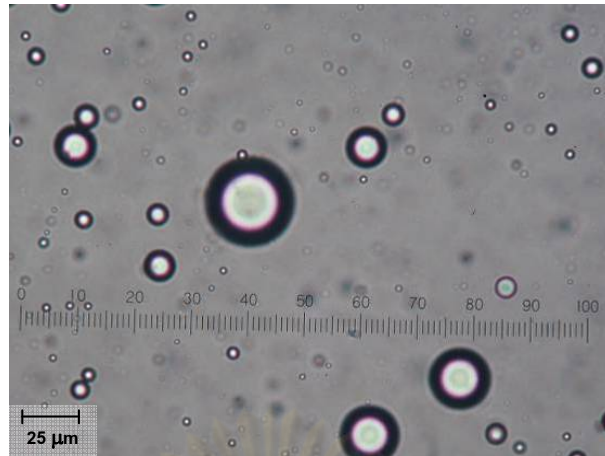


รูปที่ 4-17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของการวางตัวกลางแบบติดกัน
กับการวางตัวกลางแบบชั้นตอน

นอกจากนี้ จากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันของโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบชั้นตอน 2 ชั้น แสดงดังรูปที่ 4-18 และตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 4-19

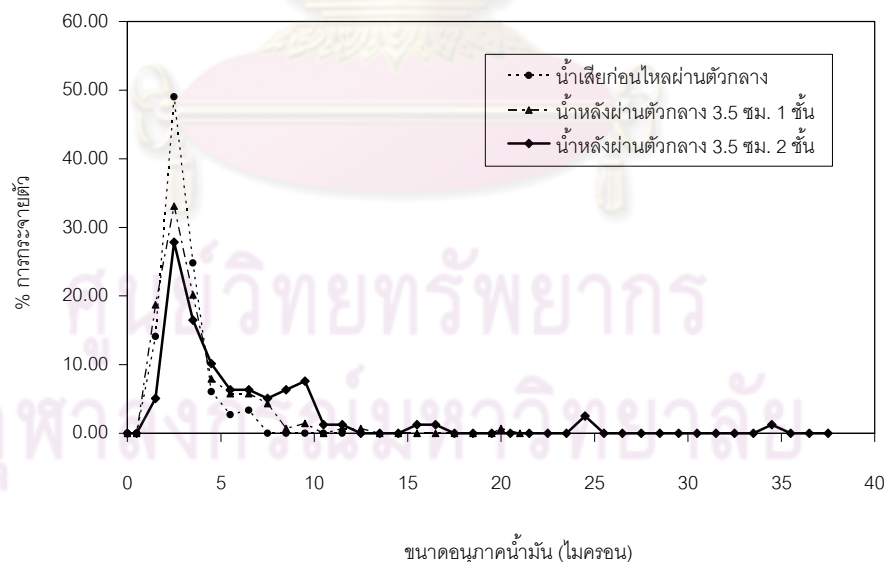


รูปที่ 4-18 เปร็เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางที่วางแบบ
ชั้นตอน 2 ชั้น



รูปที่ 4-19 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางที่วางแบบขั้นตอน 2 ชั้น

จากรูปที่ 4-18 และรูปที่ 4-19 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางที่วางแบบขั้นตอน 2 ชั้น ส่วนใหญ่มีขนาด 2-10 ไมครอน ซึ่งมีประมาณ 86% ของจำนวนอนุภาคน้ำมันทั้งหมด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) เท่ากับ 5.82 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (D_{32}) เท่ากับ 19.47 ไมครอน รูปที่ 4-20 แสดงลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันของโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น เปรียบเทียบกับน้ำเสียก่อนไหลผ่านตัวกลาง และน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางหนา 3.5 ซม. 1 ชั้น



รูปที่ 4-20 เปรอ์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันหลังผ่านตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น เปรียบเทียบกับน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางหนา 3.5 ซม. 1 ชั้น และน้ำเสียก่อนไหลผ่านตัวกลาง

จากรูปที่ 4-20 จะพบว่า เปอร์เซ็นต์ของหยดน้ำมันขนาดเล็ก (2.5 ไมครอน) ของน้ำที่ผ่านตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น ลดลงจาก 49% ในน้ำเสีย เป็น 28% แต่มีเปอร์เซ็นต์ของหยดน้ำมันขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าเกิดการรวมตัวกันของหยดน้ำมันขนาดเล็กและกลายเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางที่หนา 3.5 ซม. 1 ชั้น จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของหยดน้ำมันขนาดเล็ก (2.5 ไมครอน) ของน้ำที่ผ่านตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น น้อยกว่าน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางที่หนา 3.5 ซม. 1 ชั้น ประมาณ 5% แต่มีเปอร์เซ็นต์ของหยดน้ำมันขนาดใหญ่มากกว่า แสดงว่าการวางตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น สามารถเพิ่มขนาดหยดน้ำมันได้มากกว่า และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี (รูปที่ 4-16) จะเห็นได้ว่าแบบขั้นตอน 2 ชั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีได้มากขึ้นถึง 8% ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาระยะกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน

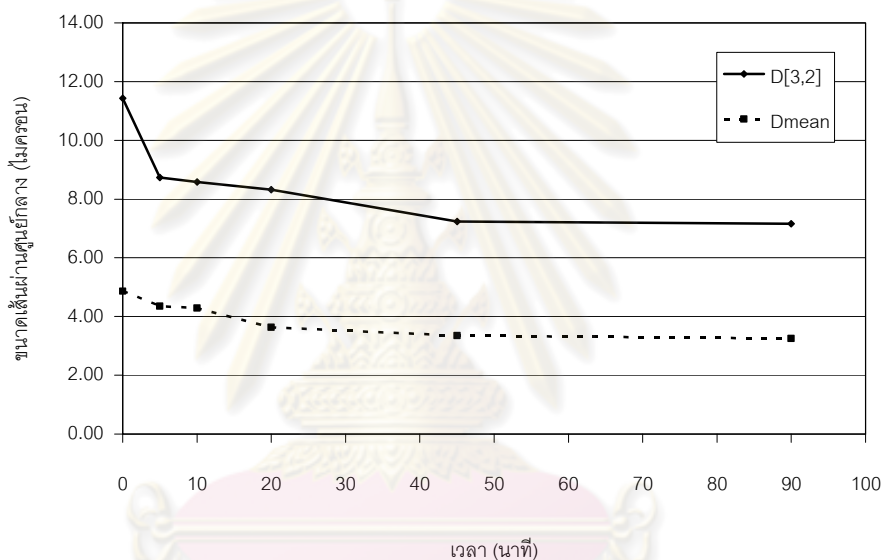
นอกจากนี้จากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านโคอะเลสเซอร์แบบขั้นตอน 2 ชั้น และหลังจากตั้งให้ตกตะกอน 90 นาที แสดงดังรูปที่ 4-21 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่เพิ่งผ่านตัวกลาง เนื่องจากน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำหมดแล้ว โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (D_{32}) ของน้ำหลังการบำบัดมีค่าเท่ากับ 3.25 ไมครอน และ 7.16 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 4-21 เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางแบบขั้นตอน และตกตะกอน 90 นาที เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโคอะเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น และทิ้งให้แยกตัวที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-22 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

- ในช่วง 5 นาทีแรกขนาดของน้ำมันลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นว่าหยดน้ำมันขนาดใหญ่ได้ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ
- จากนั้นในช่วง 5-45 นาที ขนาดของอนุภาคน้ำมันจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดค่อนข้างเล็กจึงลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างช้าๆ
- หลังจาก 45 นาที ขนาดของอนุภาคน้ำมันจะค่อนข้างคงที่โดยมีขนาดประมาณ 3.25 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดที่ค่อนข้างเล็กมากและไม่สามารแยกออกจากน้ำได้



รูปที่ 4-22 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่เวลาต่างๆ ของโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น

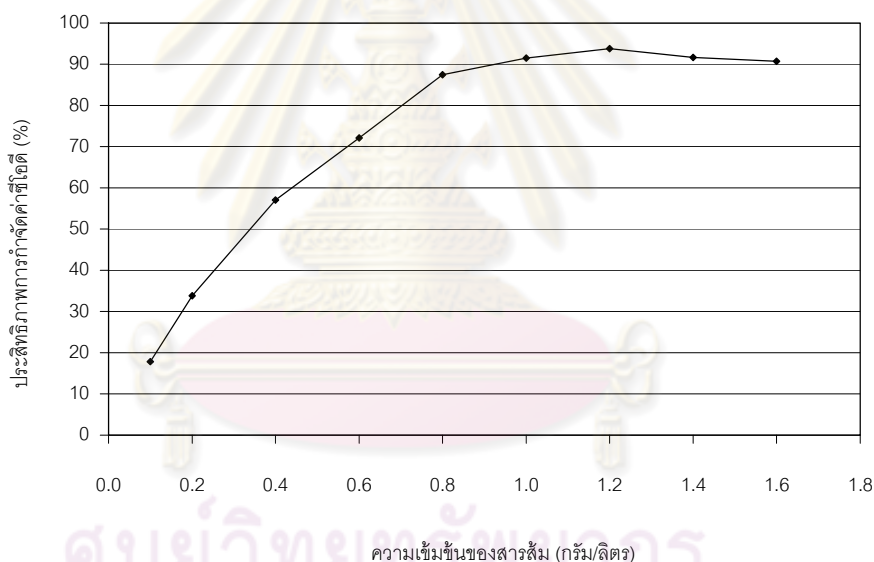
ดังนั้น จากรูปที่ 4-22 จะเห็นได้ว่าการบำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์นั้นจะใช้เวลาในการบำบัดสั้นมาก คือ ประมาณ 5 นาที แต่จะพบว่าอนุภาคน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำจะมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ซึ่งจะยากต่อการบำบัด จึงจำเป็นที่จะต้องมีการใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นที่สามารถกำจัดน้ำมันที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนได้ หรืออาจประยุกต์ใช้กระบวนการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำ ก่อนผ่านเข้าสู่โคอะเลสเซอร์เพื่อให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งได้ทำการศึกษาดังหัวข้อถัดไป

4.4.2 การเติมสารเคมี

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยการทำลายเสถียรของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนที่จะผ่านน้ำเสียเข้าสู่โคอะเลสเซอร์ เพื่อเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน ด้วยกระบวนการเติมสารเคมี ซึ่งสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ สารส้ม และไม่ทำการปรับค่า pH ของน้ำเสีย เนื่องจากค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มี SDS ด้วยสารส้มมีค่าประมาณ 6-7 (ประจักษ์, 2551) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง (pH ประมาณ 7)

4.4.2.1 การศึกษาความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เจสต์

ทำการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน โดยทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารส้มความเข้มข้น 0.1-1.6 กรัม/ลิตร โดยใช้วิธีจาร์เจสต์ (มันลิน, 2542) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-23



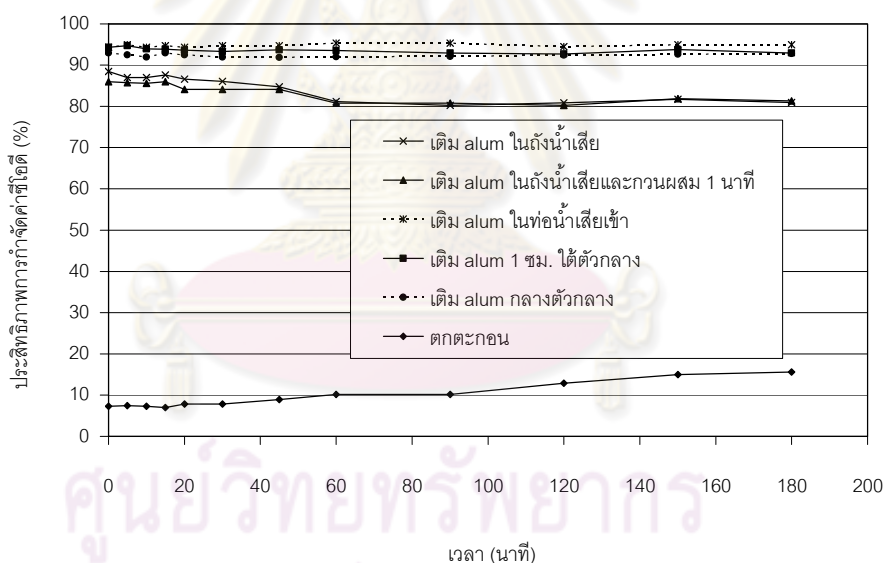
รูปที่ 4-23 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี
โดยวิธีจาร์เจสต์

จากรูปที่ 4-23 จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารส้มมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงความเข้มข้น 0.1-0.8 กรัม/ลิตร หลังจากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารส้มมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารส้มต่ำๆ ประสิทธิภาพการจับตัวของอนุภาคน้ำมันและสารส้มจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ สารส้มจึงสามารถตกตะกอนน้ำมันได้เต็มที่ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้นจนเกินปริมาณน้ำมันที่อยู่ในน้ำเสีย จึงเกิดการแย่งกันจับกับอนุภาคน้ำมัน รวมทั้งเกิดการจับตัวกันเองของสารส้ม

ซึ่งเป็นกลไกแบบ Sweep Floc Coagulation (Ahmad และคณะ, 2006) จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีมีแนวโน้มคงที่ โดยค่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีสูงสุด 93.81% ซึ่งในการทดลองต่อไป ได้ทำการศึกษาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการเติมสารเคมีในคอลัมน์โคอะเลสเซอร์ โดยเลือกใช้ค่าความเข้มข้นของสารส้ม 1.0 กรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 91.51%) เนื่องจากเป็นความเข้มข้นของสารส้มที่ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเริ่มคงที่

4.4.2.2 การศึกษาตำแหน่งของการเติมสารเคมีที่เหมาะสม

จากการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารส้มสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีจาร์เทสต์พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีของน้ำเสียเริ่มมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารส้มมีค่าประมาณ 1 กรัม/ลิตร ดังนั้นการทดลองนี้จึงทำการศึกษาตำแหน่งที่เหมาะสมของการเติมสารเคมีสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ โดยเลือกใช้ตัวกลางเดินใยกรองน้ำตู้ปลา ความสูงตัวกลาง 3.5 ซม. อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.0 ลิตร/ชั่วโมง และความเข้มข้นของสารส้ม 1 กรัม/ลิตร ซึ่งผลการศึกษาดังกราฟรูปที่ 4-24



รูปที่ 4-24 ผลกระทบของตำแหน่งเติมสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีของโคอะเลสเซอร์

จากรูปที่ 4-24 จะเห็นได้ว่าการเติมสารส้มในถังน้ำเสียจะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่ำกว่าการเติมสารส้มในท่อน้ำเสียและในคอลัมน์โคอะเลสเซอร์ เนื่องจากการเติมสารส้มในถังน้ำเสียจะทำให้เกิดตะกอนของสารส้มที่จับตัวกับน้ำมันชั้นในถังน้ำเสีย และเมื่อทำการป้อนเข้าสู่คอลัมน์โคอะเลสเซอร์จะเกิดการแตกตัวของตะกอนและฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำ อีกทั้งยังติดอยู่ตามชั้นตัวกลางอีกด้วย ส่วนการเติมสารส้มในท่อน้ำเสียจะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าการเติมสารส้มในคอลัมน์โคอะเลสเซอร์เล็กน้อย นอกจากนี้การเติมสารส้มใต้ตัวกลางจะ

ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าการเติมสารส้มกลางตัวกลางเล็กน้อยเช่นกัน เนื่องจากเกิดการกวนผสมของสารเคมีและน้ำเสียได้มากกว่า โดยเมื่อพิจารณาจากผลคูณของค่าความเร็วแกรเดียนท์และระยะเวลาสัมผัส (G.T) ซึ่งค่าความเร็วแกรเดียนท์สำหรับการไหลผ่านตัวกลางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-4 (Ladislav, 2000)

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

และความเร็วแกรเดียนท์ของการไหลในท่อ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-5 (Ladislav, 2000) ดังนี้

$$G = \sqrt{\frac{\rho g Q H}{A L \mu}} \quad (4-5)$$

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

ความเร็วการไหลผ่านท่อขนาดเล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-6 (Ladislav, 2000)

$$G = \sqrt{\frac{32 v^2}{d^2}} \quad (4-6)$$

โดย	v	=	ความเร็วการไหลของน้ำ
	d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

ซึ่งผลการคำนวณค่า G.T ของการเติมสารเคมีในท่อน้ำเสีย ใต้ตัวกลาง 1 ซม. และกลางตัวกลางแสดงดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลการคำนวณค่า G.T ของการเติมสารเคมีที่ตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งเติมสารเคมี	โคแอกกูเลชัน			ฟล็อกคูเลชัน		
	G (s ⁻¹)	T (s)	G.T	G (s ⁻¹)	T (s)	G.T
ในท่อน้ำเสีย			1552.10	5.03	432.44	2176.30
- ในท่อน้ำเสีย	233.32	0.48	113.14			
- ในคอลัมน์ใต้ตัวกลาง	4.20	186.11	782.00			
- ในตัวกลาง	17.15	38.32	656.97			
ใต้ตัวกลาง 1 ซม.	17.15	38.32	656.97	5.03	432.44	2176.30
กลางตัวกลาง	14.00	19.16	268.21	5.03	432.44	2176.30

จากตารางที่ 4-7 เมื่อพิจารณากระบวนการโคแอกกูเลชัน จะเห็นได้ว่า

- การเติมสารส้มในท่อน้ำเสียเข้าจะให้ค่า G สูงกว่าการเติมสารส้มใต้ตัวกลาง และกลางตัวกลาง เนื่องจากท่อน้ำเสียมีขนาดค่อนข้างเล็ก (0.35 ซม.) จึงมีความเร็วการไหลค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังให้ค่า G.T สูงที่สุดด้วย เนื่องจากมีระยะเวลาการสัมผัสค่อนข้างนานกว่าการเติมสารส้มใต้ตัวกลางและกลางตัวกลาง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของการเติมสารส้มในท่อน้ำเสียมีค่าสูงที่สุดด้วย โดยมีค่าเท่ากับ 94.77%
- ส่วนการเติมสารส้มใต้ตัวกลางจะให้ค่า G.T สูงกว่าการเติมสารส้มกลางตัวกลาง เนื่องจากมีระยะทางของการกวนผสมสารส้มและระยะเวลาการกวนผสมสูงกว่า จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของการเติมสารส้มใต้ตัวกลาง (93.63%) สูงกว่าการเติมสารส้มกลางตัวกลาง (92.38%) ด้วย

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าค่า G.T เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเลือกใช้สารเคมีร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ และส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกัน ทั้งจากการกวนผสมในเส้นท่อ ใต้และกลางตัวกลาง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่า G และค่า T ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งควรมีค่า 700-1,000 s⁻¹ และ 30-60 วินาที ตามลำดับ หรือควรมีค่า G.T มากกว่า 20,000 (มันสิน, 2542) จะพบว่าค่า G.T จากการทดลองมีค่าค่อนข้างน้อย เนื่องจากค่า G ที่ได้มีค่าน้อยมาก นอกจากนี้ค่า G และค่า T ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันควรมีค่า 20-50 s⁻¹ และ 20-30 นาที ตามลำดับ (มันสิน, 2542) จะพบว่าค่า G และค่า T ที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยมาก จึงส่งผลให้ค่า G.T น้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็นไปด้วย แต่เมื่อ

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกับวิธีจาร์เทสต์ (รูปที่ 4-23) จะพบว่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แสดงว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์มีข้อดีทั้งในด้านของการประหยัดพลังงานและเวลาการบำบัด ดังนั้นโคอะเลสเซอร์จึงสามารถใช้ในการกวนผสมสารเคมีได้ทั้งการกวนเร็วและกวนช้า และมีข้อดีทั้งประหยัดและให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูง

ทั้งนี้ จากการทดลองพบว่าการเติมสารส้มที่ความเข้มข้นสูง (1.0 กรัม/ลิตร) จะทำให้เกิดตะกอนของสารส้มที่จับตัวกับน้ำมันขึ้นอย่างชัดเจน ด้วยกลไก Sweep Floc Coagulation ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งส่งผลให้มีตะกอนที่เกิดขึ้นจะติดอยู่ในชั้นตัวกลางเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ ตะกอนบางส่วนที่หลุดออกจากตัวกลางก็จะตกอยู่บนชั้นตัวกลางขณะที่ทำการตั้งทิ้งให้น้ำมันแยกตัวอีกด้วย (ดังแสดงในรูปที่ 4-25) จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าสูง แต่เนื่องจากกลไกของโคอะเลสเซอร์แตกต่างจากถังกรอง คือต้องการให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในน้ำ จนมีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็วขึ้น จึงไม่ควรให้เกิดการกรองของตะกอนในชั้นตัวกลางและการตกตะกอนของตะกอนน้ำมัน ดังนั้น ในการทดลองต่อไปจึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของโคอะเลสเซอร์ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการเติมสารส้มใต้ตัวกลางและกลางชั้นตัวกลาง ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวน่าจะสามารถนำมาใช้ในการเลือกระบบเติมสารเคมีที่เหมาะสมได้

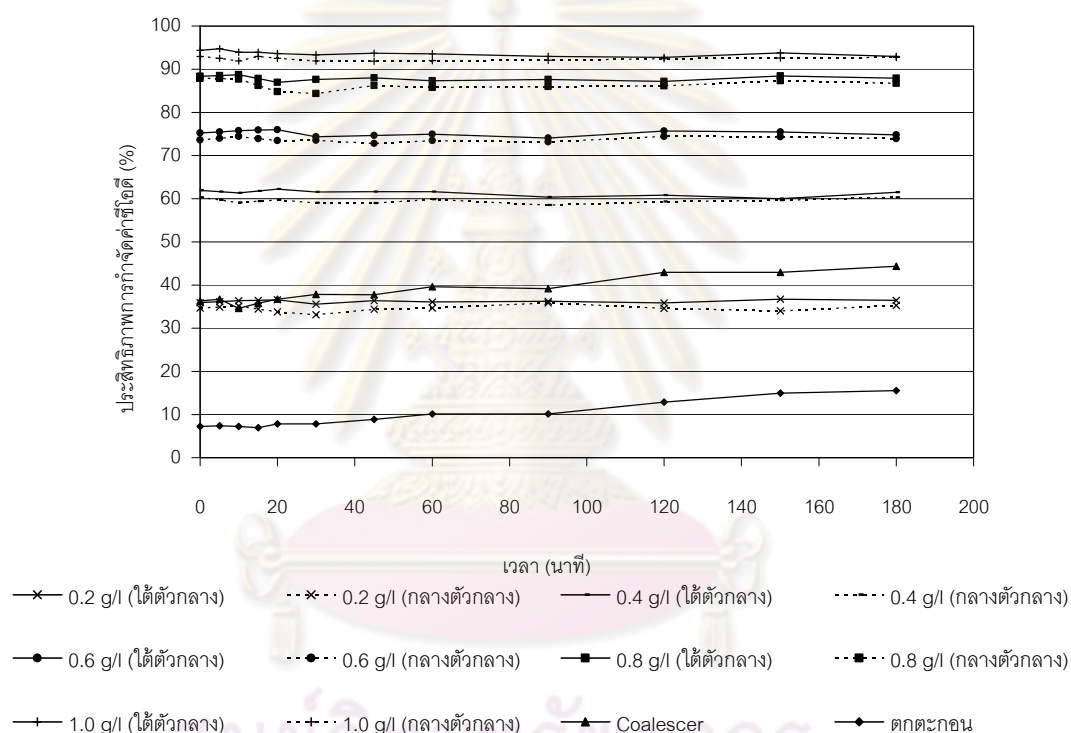


รูปที่ 4-25 ตัวอย่างตะกอนน้ำมันที่ติดในชั้นตัวกลางและตกตะกอนบนตัวกลาง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของการเติมสารส้มทั้ง 3 ตำแหน่งนั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะทำการศึกษาการเติมสารส้มใต้ตัวกลางและกลางตัวกลาง เนื่องจากการเติมสารส้มในท่อน้ำเสียเข้าอาจทำให้เกิดตะกอนในคอลัมน์ช่วงใต้ตัวกลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอนของสารเคมีใต้ตัวกลาง รวมทั้งอาจเกิดการอุดตันในท่อน้ำเสียได้

4.4.2.3 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอเลสเซอร์

จากการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของการเติมสารส้ม พบว่าการเติมสารส้มได้ตัวกลางและกลางตัวกลางน่าจะมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์โคอเลสเซอร์ เนื่องจากเป็นการใช้ตัวกลางในการช่วยกวนผสมสารเคมี แล้วเกิดการจับตัวกับน้ำมันที่ด้านบนของตัวกลางและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ รวมไปถึงสะดวกในการประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นการทดลองนี้ จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอเลสเซอร์ โดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมสารส้มได้ตัวกลาง 1 ซม.และกลางตัวกลาง ด้วยความเข้มข้นต่างๆ กัน ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4-26



รูปที่ 4-26 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพของโคอเลสเซอร์

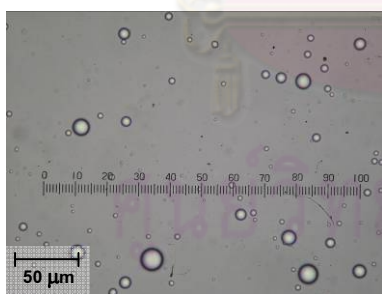
จากรูปที่ 4-26 จะเห็นได้ว่าการเติมสารส้มได้ตัวกลางให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีมากกว่าการเติมสารส้มกลางตัวกลางเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกันในทุกค่าความเข้มข้นของสารส้ม และจะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีค่อนข้างคงที่ รวมถึงมีแนวโน้มที่จะลดลงเล็กน้อยตามเวลาที่ตั้งทิ้งให้น้ำมันแยกตัว ซึ่งเกิดจากกลไกที่ต่างกันตามความเข้มข้นของสารส้ม ดังนี้

- ความเข้มข้นของสารส้มต่ำ อนุภาคน้ำมันจะจับตัวกันโดยมีสารส้มเป็นตัวเชื่อม จึงเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็วใน

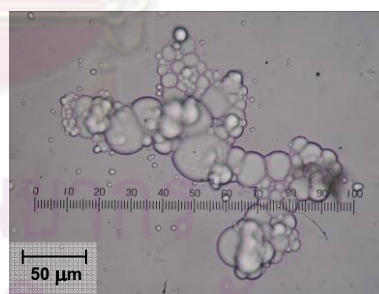
ช่วงแรก และจะเหลือหยดน้ำมันบางส่วนที่ไม่จับตัวกับสารส้ม เนื่องจากสารส้มมีปริมาณน้อยกว่า จึงค่อยๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างช้าๆ

- ความเข้มข้นของสารส้มสูง อนุภาคน้ำมันจะจับตัวกับสารส้มเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก จึงเกิดการติดค้างอยู่ในชั้นตัวกลาง รวมถึงตกตะกอนบนตัวกลาง จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าสูงมาก ส่วนตะกอนที่มีขนาดเล็ก ก็จะแขวนลอยอยู่ในน้ำและบางส่วนก็จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างช้าๆ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

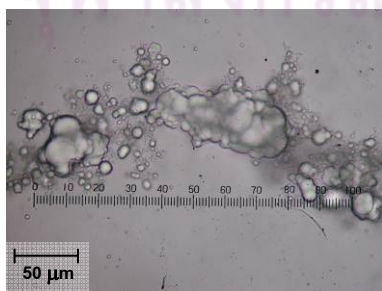
จากตัวอย่างรูปถ่ายหยดน้ำมันที่ความเข้มข้นสารส้มต่างๆ กันแสดงดังรูปที่ 4-27 พบว่าการเติมสารส้มที่ความเข้มข้นต่ำ (0.2 กรัม/ลิตร) ให้ผลประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในช่วงแรกไม่แตกต่างจากโคอะเลสเซอร์ที่ไม่ได้เติมสารส้ม แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้แยกตัวจะพบว่าน้ำที่ผ่านโคอะเลสเซอร์ที่ไม่ได้เติมสารส้มจะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับโมเลกุลของสารส้มบนผิวของหยดน้ำมัน ทำให้หยดน้ำมันมีน้ำหนักมากขึ้น รวมถึงการใช้ปริมาณสารส้มไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการจับตัวกันของอนุภาคน้ำมันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ โดยเป็นเพียงอนุภาคบางส่วนเท่านั้นที่ถูกทำลายเสถียรภาพ ดังนั้นอนุภาคส่วนที่เหลือยังคงมีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำ จึงเกิดการแยกตัวออกจากน้ำได้ยาก รวมทั้งเกิดการตกค้างของสารส้มอยู่ในน้ำเสียและส่งผลให้ค่าซีไอดีของน้ำมีค่าสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีตะกอนของสารส้มเกิดขึ้นอีกด้วย



(ก) 0.2 กรัม/ลิตร



(ข) 0.4 กรัม/ลิตร



(ค) 0.6 กรัม/ลิตร

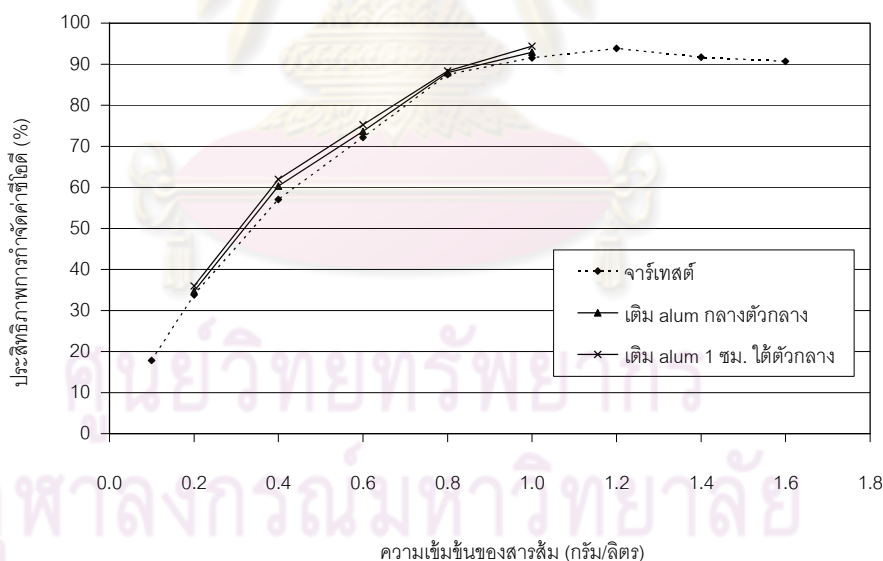


(ง) 0.8 กรัม/ลิตร

รูปที่ 4-27 รูปถ่ายหยดน้ำมันที่ความเข้มข้นสารส้มต่างๆ

การเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 0.4 กรัม/ลิตร จะพบว่ามีการจับตัวของหยดน้ำมัน เกิดเป็นกลุ่มน้ำมันขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4-27 (ข) ซึ่งส่งผลให้ค่าความเร็วในการลอยตัวของน้ำมัน สูงขึ้นด้วยตามกฎของสโตก แต่ก็เห็นได้ว่ายังมีอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กบางส่วนแขวนลอยอยู่ในน้ำ จึงทำให้ค่าซีไอดีของน้ำลดลงได้ส่วนหนึ่งเท่านั้น ส่วนการเติมสารส้มที่ความเข้มข้นสูง (0.6-0.8 กรัม/ลิตร) จะเห็นได้ว่าเกิดตะกอนของสารส้มขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4-27 (ค) และ (ง) โดยปริมาณและขนาดของตะกอนสารส้มจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารส้มที่เติม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเฟสน้ำจะพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารส้มสูงมากๆ จะมีอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กน้อยลง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีสูงตามไปด้วย แต่ตะกอนสารส้มที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก เนื่องจากเป็นกลไก Sweep Floc Coagulation จึงส่งผลให้ตะกอนที่เกิดขึ้นติดอยู่ในตัวกลางและตกตะกอนบนชั้นตัวกลางมากกว่าที่จะลอยขึ้นสู่อากาศ

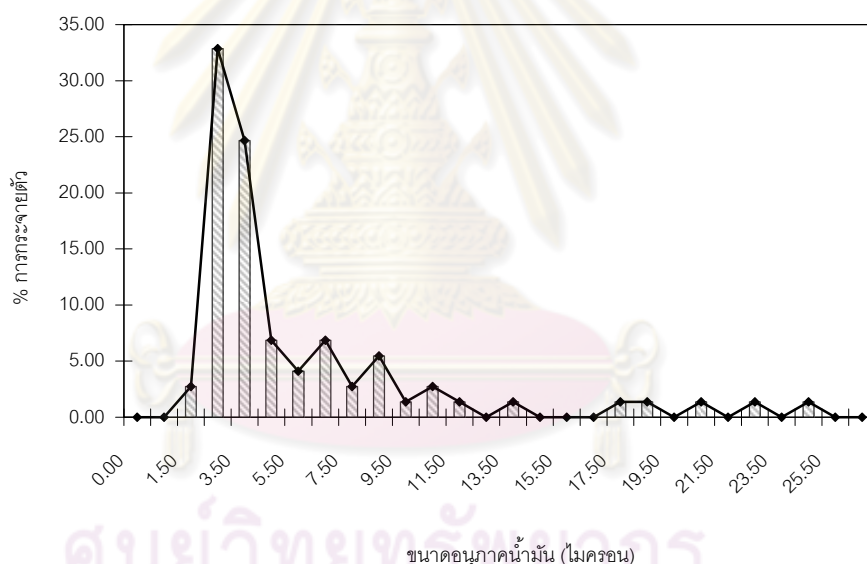
เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ที่ประยุกต์ใช้การเติมสารเคมีที่เวลาเริ่มต้น กับประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของวิธีจาร์เทสต์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4-28 จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่การใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จะประหยัดเวลาในการบำบัดได้มากกว่าเพราะไม่ต้องมีเวลาในการกรวนเร็ว กรวนช้า รวมถึงการตั้งทิ้งให้ตกตะกอน ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง รวมทั้งสามารถประหยัดค่าก่อสร้างได้ด้วย



รูปที่ 4-28 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เปรียบเทียบกับวิธีจาร์เทสต์

จากการศึกษาข้างต้นจะพบว่าความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์คือประมาณ 0.4 กรัม/ลิตร เนื่องจากไม่ทำให้เกิดตะกอนของสารส้มติดค้างในตัวกลางและตกบนชั้นตัวกลาง ซึ่งผลการศึกษาคือการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่าน

โคะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร ที่ได้ตัวกลาง พบว่าเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันแสดงดังรูปที่ 4-29 ซึ่งอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 2-4 ไมครอน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) 5.55 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (D_{32}) 15.15 ไมครอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโคะเลสเซอร์แบบทั่วไป ($D_{mean} = 3.70$ ไมครอน และ $D_{32} = 8.42$ ไมครอน) จะเห็นได้ว่าการเติมสารส้มช่วยเพิ่มขนาดของ D_{mean} ได้มากถึง 50% และเพิ่มขนาด D_{32} ได้ 80% จึงส่งผลให้ค่าความเร็วในการลอยขึ้นของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นตามกฎของสโตก และเมื่อเปรียบเทียบกับโคะเลสเซอร์แบบขั้นตอน ($D_{mean} = 5.82$ ไมครอน และ $D_{32} = 19.47$ ไมครอน) จะพบว่าขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดจะพบว่า การเติมสารส้มมีประสิทธิภาพสูงกว่าการวางตัวกลางแบบขั้นตอนถึง 10% เนื่องจากการเติมสารส้มนั้นจะทำให้ลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ดังนั้นในระหว่างที่กำลังลอยขึ้นด้านบนอนุภาคน้ำมันจึงเกิดการรวมตัวกันอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งสามารถจับอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กได้มากกว่าด้วย จึงลดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้มากกว่า



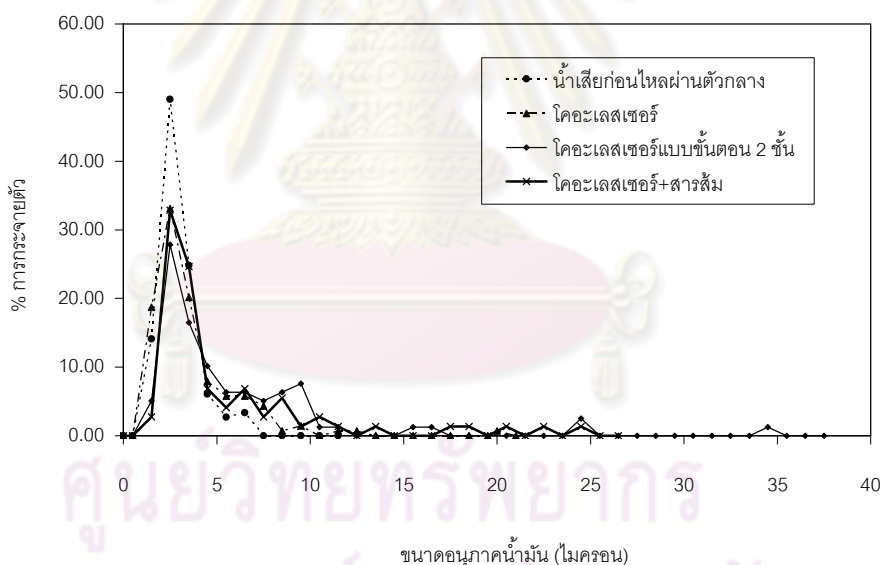
รูปที่ 4-29 เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันของน้ำเสียสังเคราะห์ อุปกรณ์โคะเลสเซอร์แบบธรรมดา และโคะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 4-30 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

- เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันของโคะเลสเซอร์ที่เติมสารส้มกับน้ำเสียสังเคราะห์จะพบว่าสอดคล้องกับการทดลอง

ของโคอะเลสเซอร์แบบธรรมดาและโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบชั้นตอน คือเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กจะลดลงและมีเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีก็จะเห็นว่าสอดคล้องกัน คือ สามารถกำจัดค่าซีไอดีได้ถึง 60%

- จากการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบธรรมดา พบว่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำมันขนาดเล็กไม่แตกต่างกันมากนัก แต่มีเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ผลของน้ำที่เพิ่งผ่านตัวกลาง ซึ่งเพิ่งเกิดการกวนผสมกับสารส้ม น้ำมันจึงยังไม่รวมตัวกันมากนัก
- และจากการเปรียบเทียบกับโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบชั้นตอน จะพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ของน้ำมันขนาดเล็กมากกว่าเล็กน้อย และมีเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาดใหญ่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากน้ำที่เพิ่งผ่านชั้นตัวกลางจึงยังไม่เกิดการรวมตัวกันมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับการวางตัวกลางแบบชั้นตอน

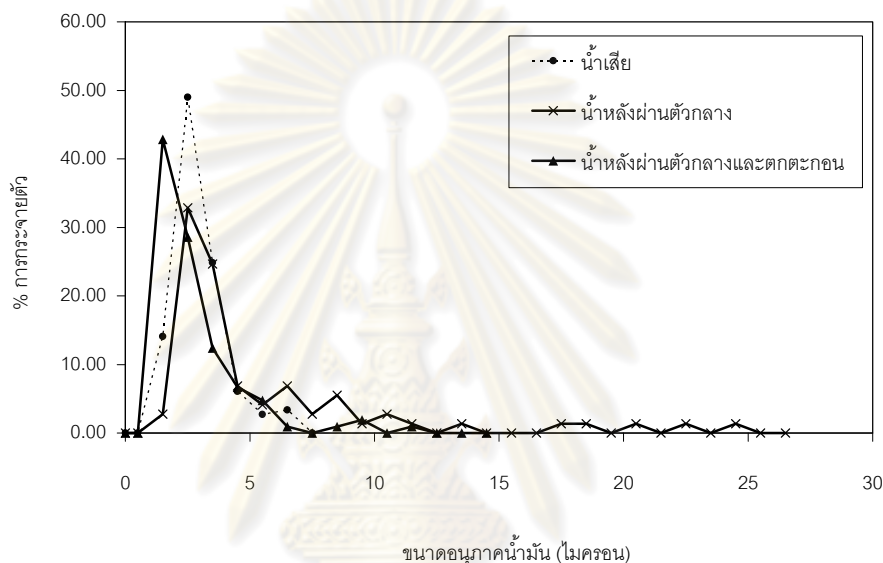


รูปที่ 4-30 เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันหลังจากผ่านโคอะเลสเซอร์ที่เติมสารส้มเปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบธรรมดา และโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบชั้นตอน

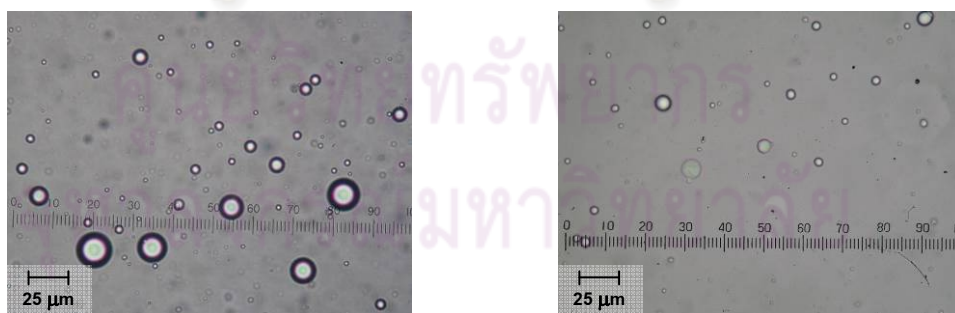
จากการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านโคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร ที่ได้ตัวกลาง และทำการตั้งทิ้งให้เกิดการแยกตัวอีก 90 นาที แสดงดังกราฟรูปที่ 4-31 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อนุภาคน้ำมันที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำจะมีขนาดเล็กถึงเมื่อ

เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำที่ผ่านโคอะเลสเซอร์ทันที โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดประมาณ 1-3 ไมครอน ซึ่งมีปริมาณมากถึง 71.43% ของอนุภาคน้ำมันทั้งหมด และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) 2.82 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (D_{32}) 5.89 ไมครอน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ผ่านโคอะเลสเซอร์ทันที จะพบว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะหายไป เนื่องจากลอยขึ้นสู่ผิวน้ำหมดแล้ว จึงส่งผลให้ค่าซีไอดีของน้ำหลังการบำบัดมีค่าลดลง

ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตรและน้ำที่ผ่านการตั้งทิ้งให้เกิดการแยกตัวแล้ว แสดงดังรูปที่ 4-32



รูปที่ 4-31 เปรอ์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์แบบเติมสารส้มและตกตะกอน 90 นาที เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง



(ก) หลังผ่านโคอะเลสเซอร์ทันที

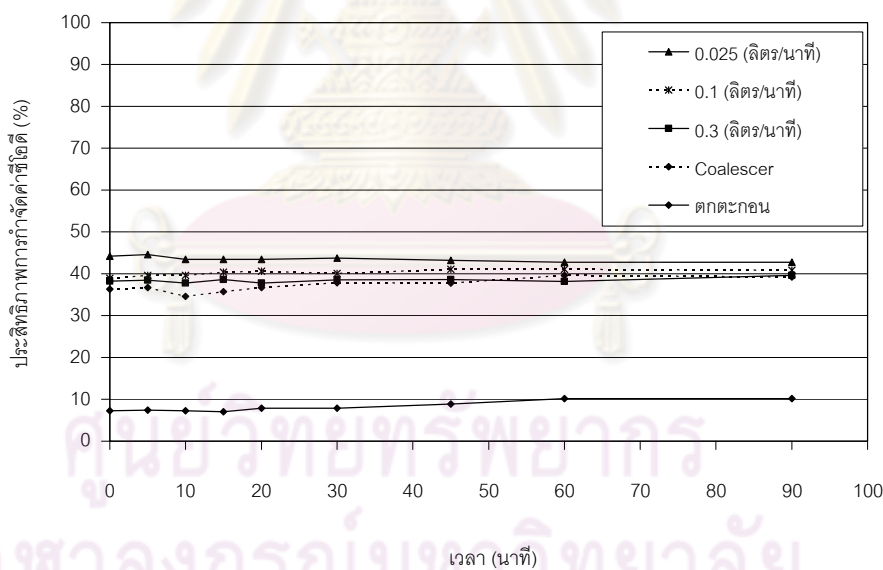
(ข) หลังผ่านโคอะเลสเซอร์และตกตะกอน

รูปที่ 4-32 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม

4.4.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการอินดิวิชแอริโพลเทชัน (IAF)

กระบวนการ IAF ใช้หลักการเติมอากาศที่ความดันบรรยากาศ เพื่อให้เกิดฟองอากาศได้น้ำ โดยขนาดของฟองที่เกิดขึ้นประมาณ 0.7-1.5 มิลลิเมตร (Rubio และคณะ, 2002) ซึ่งจะรวมตัวกับน้ำมันในน้ำเสียเป็นฟิล์มน้ำมันรอบฟองอากาศทำให้ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำกับน้ำมันซึ่งมีค่าประมาณ 0.1 กรัม/ซม.³ เพิ่มขึ้นเป็นผลต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำกับอากาศ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.9 กรัม/ซม.³ รวมทั้งมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 3-20 ไมครอน เป็นมากกว่า 50 ไมครอน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกฎของสโตก (สมการที่ 2-8) จะพบว่าความเร็วในการลอยขึ้นจะเพิ่มขึ้นถึง 10-100 เท่า จึงสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งกระบวนการ IAF เป็นกระบวนการที่บำรุงรักษาค่อนข้างง่าย ใช้เวลาในการบำบัดน้ำมันสั้น มีประสิทธิภาพสูง และค่าใช้จ่ายต่ำ รวมทั้งยังสามารถเพิ่มค่าออกซิเจนให้น้ำเสียได้อีกทางหนึ่งด้วย (Rubio และคณะ, 2002)

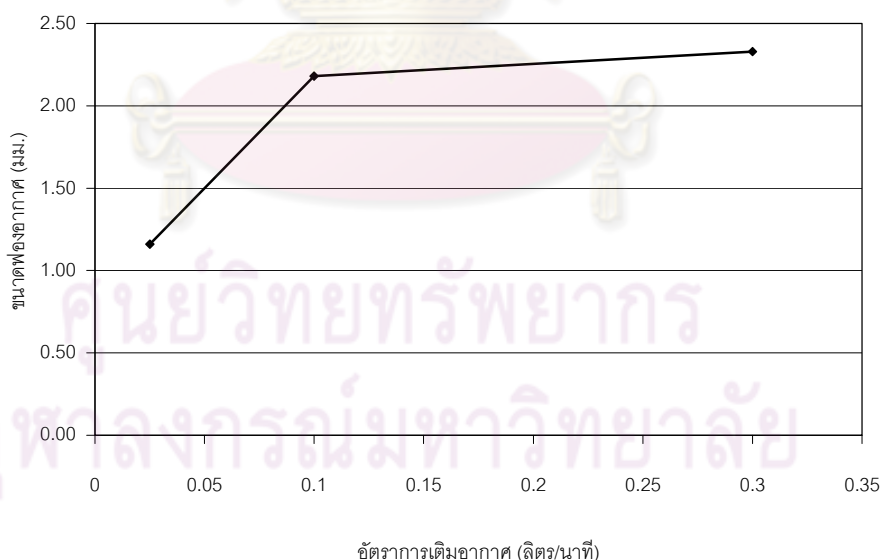
ดังนั้น การทดลองนี้จึงได้นำเอากระบวนการ IAF มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์โคเอสเสเซอร์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยทำการเติมอากาศที่อัตราการไหลของอากาศ 0.025-0.3 ลิตร/นาที โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-33



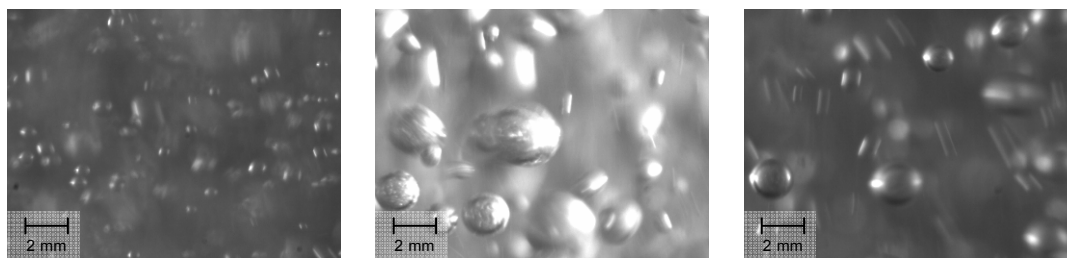
รูปที่ 4-33 ผลกระทบของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของโคเอสเสเซอร์ที่มีกระบวนการ IAF

รูปที่ 4-33 แสดงผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งพบว่า

- ที่อัตราการเติมอากาศต่ำ (0.025 ลิตร/นาที่) การประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีได้เพิ่มขึ้นประมาณ 7% โดยระยะเวลาการเติมอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้อยมาก เนื่องจากหยดน้ำมันขนาดใหญ่ถูกฟองอากาศจับและลอยขึ้นสู่ด้านบนจนเกือบหมด ส่วนน้ำมันที่เหลือในคอลัมน์โคอะเลสเซอร์ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กซึ่งยากต่อการบำบัดด้วยกระบวนการ IAF ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้เวลาในการบำบัดนาน
- เมื่ออัตราการเติมอากาศสูงขึ้น (0.1-0.3 ลิตร/นาที่) จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีจะมีค่าลดลง เนื่องจากฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของขนาดฟองอากาศตามอัตราการเติมอากาศแสดงดังรูปที่ 4-34 และตัวอย่างรูปถ่ายฟองอากาศด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (100 รูป/วินาที) แสดงดังรูปที่ 4-35 ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ขนาดด้วยโปรแกรม AutoCAD 2004 นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าการเติมอากาศด้วย อัตราการเติมอากาศ 0.3 ลิตร/นาที่เป็นเวลานานเกิน 50 นาที ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีต่ำกว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบธรรมดา แสดงว่าส่งผลให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันบริเวณชั้นน้ำมันด้านบนได้อีกด้วย (ประจักษ์, 2551)



รูปที่ 4-34 ขนาดของฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ กัน



(ก) 0.025 ลิตร/นาที่

(ข) 0.1 ลิตร/นาที่

(ค) 0.3 ลิตร/นาที่

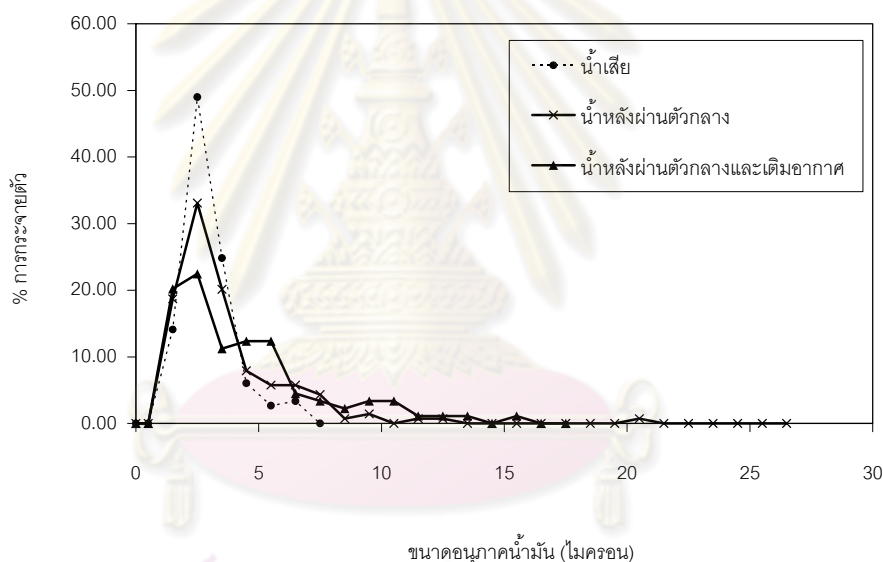
รูปที่ 4-35 รูปถ่ายฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

Moosai และ Dawe (2003) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศ พบว่ากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศจะทำงานได้ดีกับอนุภาคน้ำมันขนาด 20 ถึง 150 ไมครอน และประสิทธิภาพจะต่ำเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 3 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองคือ การประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF กับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ไม่มากนัก เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดค่อนข้างเล็กคือมีขนาด D_{32} เท่ากับ 8.42 ไมครอน

ประจักษ์ (2551) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิวิชแอโรไฟลเทชัน พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 69.28% ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตร/นาที่ นาน 30 นาที ส่วนที่อัตราการไหลอากาศ 0.025 ลิตร/นาที่ นาน 30 นาที ให้ประสิทธิภาพการบำบัด 55.63% ซึ่งมากกว่าผลการทดลองข้างต้นเล็กน้อย เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ IAF จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศต่อค่าความเร็วแกรเดียนท์ (a/G) โดย $a = f_b \cdot \frac{H_L}{U_b} \cdot \frac{S_b}{V_L}$ และ $G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการเดินระบบพบว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ทำการทดลองมีขนาดค่อนข้างเล็ก คือมีความสูงของน้ำเหนือหัวเติมอากาศเพียง 35 ซม. รวมทั้งเวลาสัมผัสของฟองอากาศน้อย ส่งผลให้ค่า a มีค่าต่ำ นอกจากนั้นยังมีปริมาตรน้ำในถังปฏิกริยาน้อย ทำให้ค่า G สูง ค่า a/G จึงต่ำมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีต่ำไปด้วย ดังนั้น ในการทดลองต่อไปในอนาคตจึงควรมีการปรับปรุงคอลัมน์ให้มีความสูงมากขึ้น เพื่อเพิ่มค่า a/G และประสิทธิภาพการบำบัดของการบำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ร่วมกับกระบวนการ IAF

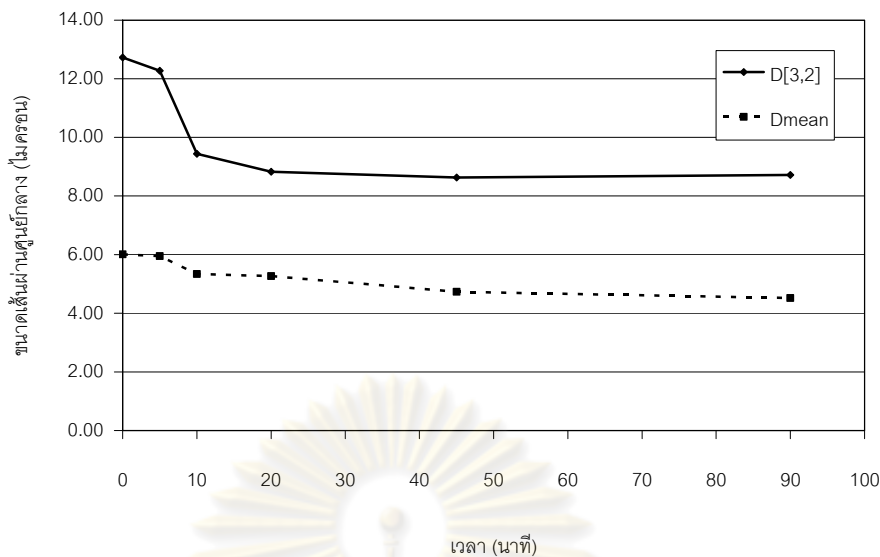
จากการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม. และทำการเติมอากาศด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.025 ลิตร/นาที่ นาน 90 นาที แสดงดังกราฟรูปที่ 4-36 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อนุภาคน้ำมันในน้ำเมื่อผ่านการเติมอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำที่ผ่านตัวกลาง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) 4.52 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบชอเทอร์ (D_{32}) 8.72 ไมครอน จึง

ส่งผลให้ค่าซีไอดีของน้ำหลังการบำบัดมีค่าลดลงค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับโคเอสเสอร์แบบทั่วไป ($D_{\text{mean}} = 3.77$ ไมครอน และ $D_{32} = 7.61$ ไมครอน) โคเอสเสอร์แบบชั้นตอน ($D_{\text{mean}} = 3.25$ ไมครอน และ $D_{32} = 7.16$ ไมครอน) และโคเอสเสอร์ที่มีการเติมสารส้ม ($D_{\text{mean}} = 2.82$ ไมครอน และ $D_{32} = 5.89$ ไมครอน) จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF มีขนาดของอนุภาคน้ำมันที่เหลืออยู่ใหญ่ที่สุด เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ลอยขึ้นด้านบนจนหมด จึงเหลือแต่อนุภาคขนาดเล็กซึ่งต้องใช้เวลาด้วย แสดงว่ากระบวนการ IAF ไม่ได้ช่วยทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน แต่เป็นการพาอนุภาคน้ำมันขึ้นไปด้วยฟองอากาศมากกว่า รวมทั้งเกิดจากค่าผลต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำกับอากาศที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความเร็วในการลอยตัวสูงขึ้น โดยในการทดลองนี้ พบว่าค่า a/G ของระบบไม่เหมาะสม ดังนั้นในการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ร่วมกับอุปกรณ์โคเอสเสอร์จึงควรพิจารณาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ รวมทั้งความปั่นป่วนของระบบเพิ่มเติมด้วย



รูปที่ 4-36 เปรอ์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางและเติมอากาศ 0.025 ลิตร/นาที่ นาน 90 นาที เปรียบเทียบกับน้ำเสียและน้ำหลังผ่านตัวกลาง

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-37 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วง 10 นาทีแรก ขนาดของน้ำมัน (D_{32}) จะลดลงอย่างรวดเร็ว จาก 12.73 ไมครอน เป็น 9.44 ไมครอน จากนั้นขนาดจะลดลงอย่างช้าๆ และมีแนวโน้มที่จะคงที่ เนื่องจากน้ำมันมีขนาดเล็กซึ่งยากต่อการบำบัดดังที่กล่าวไปข้างต้น



รูปที่ 4-37 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่เวลาต่างๆ ของโคเอสเซอร์ ที่ประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF

จากการทดลองทั้งหมดในหัวข้อที่ 4.4 สามารถทำการเปรียบเทียบและขนาดของอนุภาคน้ำมันหลังการไหลผ่านตัวกลางและหลังตั้งให้ตกตะกอน 90 นาทีได้ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ตารางสรุปขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังไหลผ่านตัวกลางและหลังตั้งให้ตกตะกอน 90 นาที

อุปกรณ์โคเอสเซอร์	หลังไหลผ่านตัวกลาง			หลังตกตะกอน		
	D _{mean}	D ₃₂	W (cm/s)	D _{mean}	D ₃₂	W (cm/s)
การตั้งทิ้งให้ตกตะกอน	-	-	-	4.15	8.38	4.10x10 ⁻⁴
โคเอสเซอร์แบบทั่วไป	3.70	8.42	4.29x10 ⁻⁴	3.77	7.61	3.50x10 ⁻⁴
โคเอสเซอร์แบบขั้นตอน	5.82	19.47	2.29x10 ⁻³	3.25	7.16	3.10x10 ⁻⁴
โคเอสเซอร์ + เติมสารส้ม	5.55	15.15	1.39x10 ⁻³	2.82	5.89	2.10x10 ⁻⁴
โคเอสเซอร์ + IAF	3.70	8.42	4.29x10 ⁻⁴	4.52	8.72	4.60x10 ⁻⁴

จากตารางที่ 4-8 จะเห็นได้ว่าอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสีย (D_{mean} = 2.90 ไมครอน และ D₃₂ = 3.69 ไมครอน) โดย

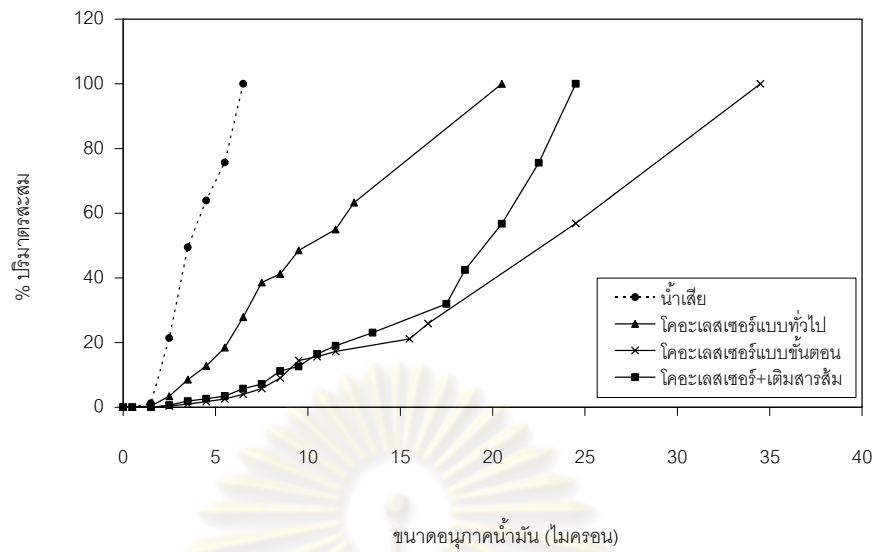
- ขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านตัวกลางแบบขั้นตอนมีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ลักษณะการวางตัวกลางแบบขั้นตอนจะช่วยให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน

ในน้ำได้มากที่สุด แต่อนุภาคน้ำมันที่ยังคงเหลือในน้ำมีขนาดไม่แตกต่างจากโคอะเลสเซอร์แบบทั่วไปมากนัก แสดงว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จะมีข้อจำกัดในการกำจัดอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กกว่า 7 ไมครอน

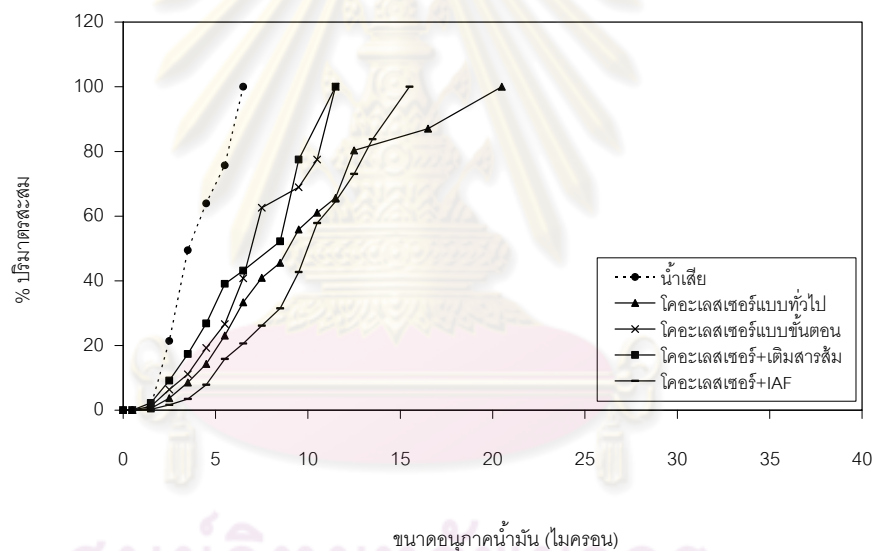
- การเติมสารส้มจะทำให้อนุภาคน้ำมันหลังผ่านตัวกลางเล็กกว่าตัวกลางแบบขั้นตอนเล็กน้อย แต่พบว่าขนาดอนุภาคน้ำมันหลังตกตะกอนเล็กที่สุด แสดงว่าในระหว่างการตกตะกอนจะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันมากที่สุด เนื่องจากอนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพด้วยสารส้ม จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด
- ส่วนการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF จะพบว่าหลังการเติมอากาศจะทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงว่าฟองอากาศไม่ได้พาอนุภาคน้ำมันขึ้นด้านบนเท่านั้น แต่จะมีส่วนหนึ่งถูกพาออกมาทางด้านท่อน้ำทิ้ง และยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับค่าซีไอดีที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- การตั้งทิ้งให้ตกตะกอน (Decantation) จะพบว่าขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำนั้นค่อนข้างใหญ่ แสดงว่าเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำเช่นกัน แต่อนุภาครวมตัวแล้วนั้นยังคงมีขนาดไม่ใหญ่พอที่จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เอง ซึ่งจะเห็นได้จากค่าความเร็วในการลอยขึ้น (W) ซึ่งมีค่าน้อยมากคือ 4.10×10^{-4} ซม./วินาที อนุภาคน้ำมันส่วนใหญ่จึงยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้ค่าซีไอดีของน้ำมีค่าสูง

นอกจากนี้ กราฟรูปที่ 4-38 แสดงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆ ในน้ำหลังผ่านตัวกลางเปรียบเทียบกับน้ำเสีย จะพบว่าการวางตัวกลางแบบขั้นตอนจะทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้นได้มากที่สุด รองลงมาคือการเติมสารส้ม และโคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ตั้งตกตะกอน 90 นาที (รูปที่ 4-39) จะเห็นได้ว่าอนุภาคน้ำมันหลังตกตะกอนจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากการรวมตัวกันหลังผ่านตัวกลาง ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำจะหมด จึงเหลือแต่อนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-38 เปรอ์เซ็นต์ปริมาตรตะขอมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆ ในน้ำหลังผ่านตัวกลาง



รูปที่ 4-39 เปรอ์เซ็นต์ปริมาตรตะขอมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆ ในน้ำหลังผ่านการตั้งตกตะกอน

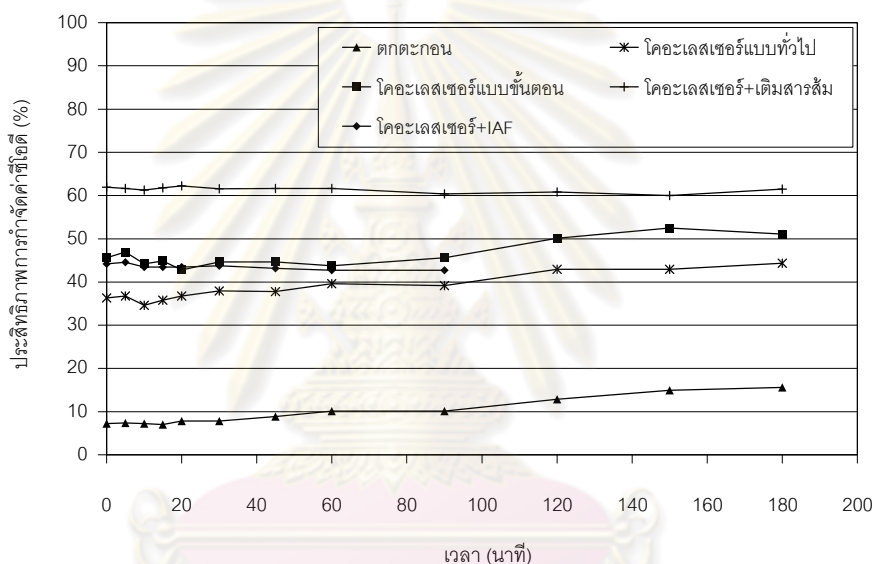
90 นาที

นอกจากนี้ สามารถสรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ดีที่สุดของ

การประยุกต์แต่ละแบบได้ดังตารางที่ 4-9 และรูปที่ 4-40

ตารางที่ 4-9 ตารางสรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของโคอะเลสเซอร์ที่ดีที่สุดของการประยุกต์แต่ละแบบ (อัตราการไหลน้ำเสีย 5 ลิตร/ชั่วโมง) และการตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 90 นาที

อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	เงื่อนไขการเดินระบบ	%การบำบัดสูงสุด
โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป	ความสูงตัวกลาง 3.5 ซม.	44.37%
โคอะเลสเซอร์แบบชั้นตอน	ความสูงตัวกลาง 3.5 ซม. 2 ชั้น	52.46%
โคอะเลสเซอร์ + เติมสารส้ม	ความเข้มข้นสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร	62.20%
โคอะเลสเซอร์ + IAF	อัตราการเติมอากาศ 0.025 ลิตร/นาที่	44.59%
การตั้งทิ้งให้ตกตะกอน		15.59%



รูปที่ 4-40 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จากการประยุกต์แต่ละแบบ

จากรูปที่ 4-40 จะเห็นได้ว่าการเติมสารส้มสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ได้มากที่สุด คือ ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีสูงขึ้น 17.83% เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของหยดน้ำมันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่มาก (รูปที่ 4-27 (ข)) จึงสามารถแยกตัวได้เร็วกว่า ส่วนการวางตัวกลางแบบชั้นตอนจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงกว่าการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF เล็กน้อย โดยการวางตัวกลางแบบชั้นตอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีได้ 8.09% และการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีได้ 0.22% ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคน้ำมันดังที่กล่าวไปข้างต้น

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ด้วยโคอะเลสเซอร์ใช้เวลาในการบำบัดค่อนข้างต่ำ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปศึกษาสำหรับการเดินระบบ

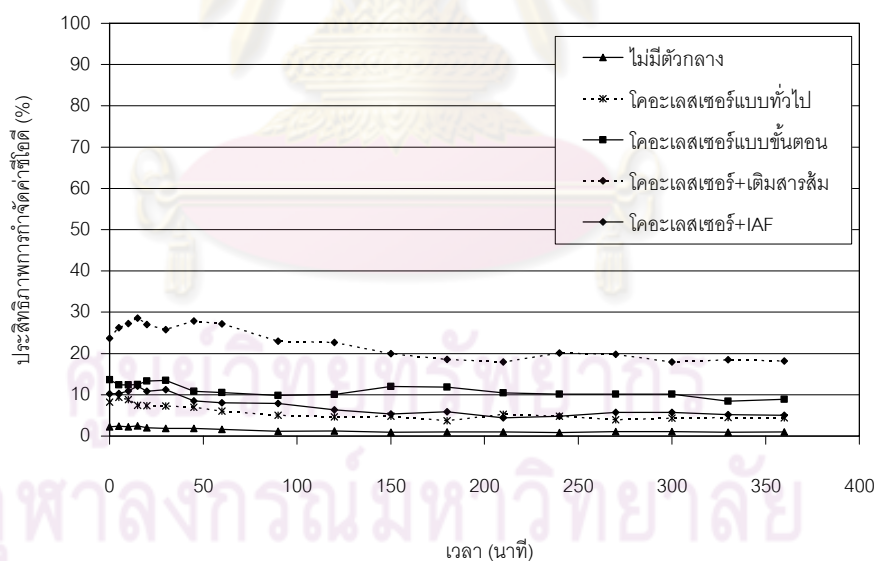
แบบต่อเนื่อง เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้จริงในทางปฏิบัติ ราคาบำบัดต่ำ และมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดี นอกจากนี้ยังอาจส่งผลดีต่อการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียและนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง

4.5 การเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลองในส่วนนี้ เป็นการนำเอาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4-9 มาทำการประยุกต์ใช้กับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง โดยจะทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยระบบที่ทำการศึกษาประกอบด้วย

1. อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป
2. อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบชั้นตอน 2 ชั้น
3. อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ร่วมกับการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร
4. อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ร่วมกับกระบวนการ IAF ที่อัตราการเติมอากาศ 0.025 ลิตร/นาที

โดยจะทำการเปรียบเทียบกับการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยไม่มีตัวกลาง หรือกระบวนการตกตะกอน (Decantation) ซึ่งผลการศึกษาดังรูปที่ 4-41



รูปที่ 4-41 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4-41 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีแบ่งพิจารณาได้เป็น 2 ช่วง คือ

- ช่วงที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีจะมีค่าสูงในช่วงแรกและลดลงเล็กน้อยตามเวลา เนื่องจากในช่วงแรกเป็นช่วงที่น้ำผ่านชั้นตัวกลางและจนกระทั่งเต็มคอลัมน์ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 7.21 นาที จึงทำให้มีหยดน้ำมันบางส่วนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำไปก่อนในช่วงแรก อีกทั้งน้ำมันบางส่วนในน้ำยังติดอยู่บนผิวตัวกลางด้วย
- ช่วงที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) โดยจะเห็นได้ว่าการเติมสารส้มยังคงให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงที่สุดคือประมาณ 19% ส่วนการวางตัวกลางแบบชั้นตอนมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีประมาณ 10% และการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF และโคอะเลสเซอร์แบบทั่วไปมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีประมาณ 6% และ 5% ตามลำดับ โดยค่าซีไอดีที่หายไปนี้คือน้ำมันที่ลอยขึ้นไปเป็นชั้นน้ำมันบนผิวน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีระบบแบบต่อเนื่องแต่ไม่มีตัวกลาง จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไปและการประยุกต์ใช้กระบวนการต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงกว่าเนื่องจากช่วยเพิ่มขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำ จึงสามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบกับกรณีระบบแบบที่ละเท (รูปที่ 4-40) จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการเดินระบบแบบต่อเนื่องจะลดลงประมาณ 30% เนื่องจากระยะเวลาของการเดินระบบแบบที่ละเทเป็นเวลาในการตั้งทิ้งให้น้ำมันแยกตัวออกจากน้ำ (ประมาณ 7 นาที) แต่การเดินระบบแบบต่อเนื่องจะมีน้ำเสียไหลเข้าคอลัมน์และไหลออกจากคอลัมน์ตลอดเวลา ซึ่งจะมีระยะเวลาให้น้ำมันแยกตัวออกจากน้ำได้เพียง 4 นาทีเท่านั้น รวมทั้งการเดินระบบแบบต่อเนื่องมีระยะเวลาในการสร้างตะกอนสำหรับการเติมสารเคมีน้อยส่งผลให้ค่า G.T น้อยตามไปด้วย ตะกอนของน้ำมันจึงมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ดังนั้น หากต้องการให้การเดินระบบแบบต่อเนื่องให้ประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกับการเดินระบบแบบที่ละเท จึงควรลดอัตราการไหลของน้ำเสียลง เพื่อให้ระยะเวลาที่น้ำสำหรับการแยกตัวของน้ำมันใกล้เคียงกับ 7 นาที

Wanichkul (2000) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดในรูปอิมัลชัน โดยใช้กระบวนการโคอะเลสเซอร์ร่วมกับกระบวนการตกตะกอน พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 50% ซึ่งค่อนข้างสูงสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยงานวิจัยนี้มีการระบายน้ำเสียบางส่วน เพื่อควบคุมระยะเวลาที่น้ำภายในถังตกตะกอน (Decantation tank) ให้มีค่าประมาณ 60 นาที จึงมีระยะเวลาสำหรับการแยกตัวของน้ำมันมากพอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงตามไปด้วย

จากลักษณะสมบัติของตัวกลาง (ตารางที่ 4-2) สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง (D_p) ได้จากสมการ Carman-Kozeny ดังสมการที่ 4-7

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150V_0\mu(1-\varepsilon)^2}{\psi^2 D_p \varepsilon^3} \quad (4-7)$$

โดย ΔP = ความดันลดในคอลัมน์
 V_0 = ความเร็ว superficial
 μ = ความหนืดของน้ำ
 ε = ความพรุนของตัวกลาง
 และ ψ = ค่า Sphericity factor ของตัวกลาง ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4-8

$$\psi = \frac{A_{Sphere}}{A_{Particle}} = \frac{(36\pi V_{Particle}^2)^{\frac{1}{3}}}{A_{Particle}} \quad (4-8)$$

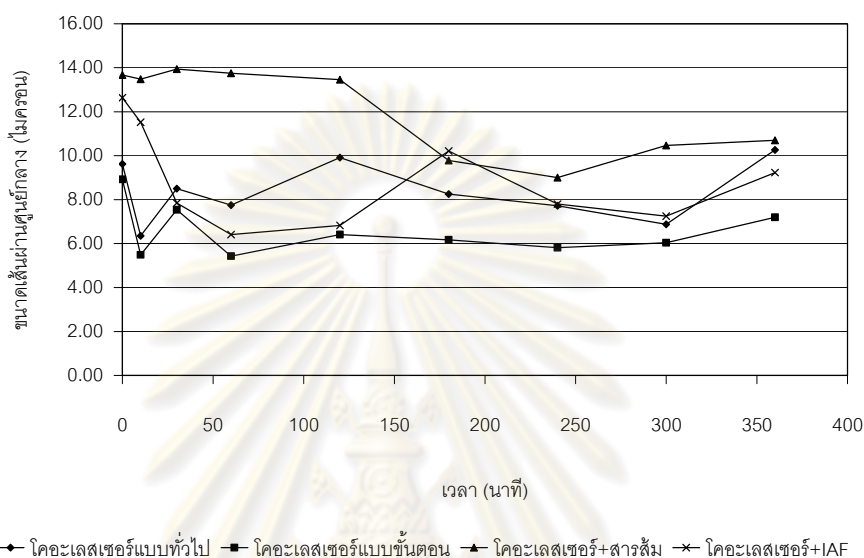
โดย $V_{Particle}$ = ปริมาตรของตัวกลาง
 $A_{Particle}$ = พื้นที่ผิวของตัวกลาง

จากสมการที่ 4-7 และสมการที่ 4-8 สามารถคำนวณหาค่า ψ และ D_p ของตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาได้เท่ากับ 0.021 และ 1.30 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อประยุกต์ใช้สมการการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันบนพื้นผิวของตัวกลาง (สมการที่ 2-18) สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ในรูปแบบของค่า $\alpha\eta_T$ ได้ โดยค่า α คือประสิทธิภาพในการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันกับพื้นผิวของตัวกลาง และค่า η_T คือค่าประสิทธิภาพการชนของอนุภาคน้ำมันกับตัวกลาง ซึ่งค่า $\alpha\eta_T$ จะบอกถึงประสิทธิภาพการชนและการเกาะติดของอนุภาคน้ำมันบนตัวกลาง โดยค่า $\alpha\eta_T$ ของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการประยุกต์แต่ละแบบ แสดงดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ค่า $\alpha\eta_T$ ของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการประยุกต์แต่ละแบบ

อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์	ค่า $\alpha\eta_T$	ประสิทธิภาพการบำบัด	ขนาดอนุภาคน้ำมัน (ไมครอน)	
			D_{mean}	D_{32}
โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป	0.0425	5%	4.03	10.26
โคอะเลสเซอร์แบบขั้นตอน	0.1461	10%	3.36	7.20
โคอะเลสเซอร์ + เต็มสารส้ม	0.1867	19%	2.97	10.70
โคอะเลสเซอร์ + IAF	0.0449	6%	4.04	9.23

จากตารางที่ 4-8 จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี คือ การเติมสารส้มให้ประสิทธิภาพสูงสุด และรองลงมาคือ โคอะเลสเซอร์แบบขั้นตอน โคอะเลสเซอร์ที่ประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF และโคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคน้ำมัน (D_{32}) ตามระยะเวลาการเดินระบบแสดงดังรูปที่ 4-42 และเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันที่เวลา 360 นาที แสดงดังรูปที่ 4-43



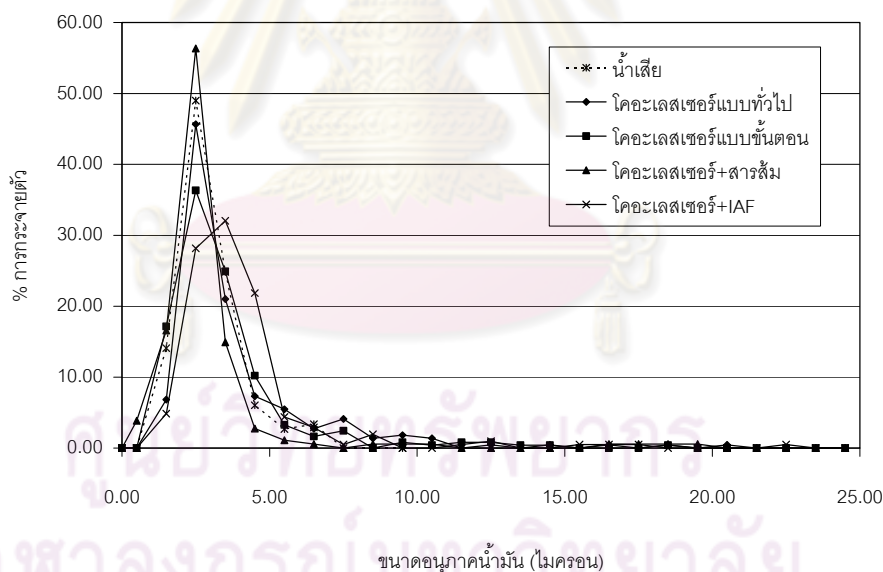
รูปที่ 4-42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่เวลาต่างๆ ของโคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4-42 จะเห็นได้ว่า

- การเติมสารส้มสามารถเพิ่มขนาดอนุภาคน้ำมันได้มากที่สุด โดยในช่วง 0-120 นาที จะพบว่าอนุภาคน้ำมันมีขนาดประมาณ 13.70 ไมครอน จากนั้นขนาดอนุภาคน้ำมันจะลดลงในช่วง 120-180 นาที หลังจากนั้นอนุภาคน้ำมันจะมีขนาดค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 10 ไมครอน เนื่องจากในช่วงแรกอนุภาคน้ำมันจะเกิดการรวมตัวกันเป็นฟลอคขนาดใหญ่และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ แต่เมื่อเดินระบบไปเรื่อยๆ จะเริ่มเกิดตะกอนสารส้มติดในชั้นตัวกลางจึงเกิดกลไกการกรองร่วมด้วย จึงเหลืออนุภาคน้ำมันขนาดเล็กที่หลุดออกมาจากตัวกลางและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ช้า ออกมากับน้ำทิ้งมากขึ้น ส่งผลให้ค่าซีไอดีของน้ำทิ้งมีค่าสูงขึ้นดังกราฟรูปที่ 4-41
- การประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ร่วมกับโคอะเลสเซอร์จะพบว่าที่เวลาเริ่มต้นขนาดอนุภาคน้ำมันจะมีขนาดใหญ่มาก หลังจากนั้นขนาดจะลดลงอย่างรวดเร็ว 0-60 นาที เนื่องจากในช่วงแรกฟองอากาศจะพาอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่ขึ้นสู่ผิวน้ำจนเหลือเพียง

อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ และในช่วง 60-120 นาทีจะพบว่าอนุภาคน้ำมันมีขนาดค่อนข้างคงที่ เพราะมีแต่อนุภาคขนาดเล็ก แต่ในช่วง 120-180 นาทีจะเห็นได้ว่าอนุภาคน้ำมันจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการที่อนุภาคน้ำมันแขวนลอยอยู่ในน้ำจึงทำให้เกิดการรวมตัวกัน และหลังจากนั้น (180-300 นาที) อนุภาคน้ำมันก็มีขนาดเล็กลงอีกครั้ง เพราะฟองอากาศพาขึ้นไปด้านบน ซึ่งหลังจาก 300 นาที ก็จะมีอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นอีก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ IAF จะเหมาะสมสำหรับอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่มากกว่า

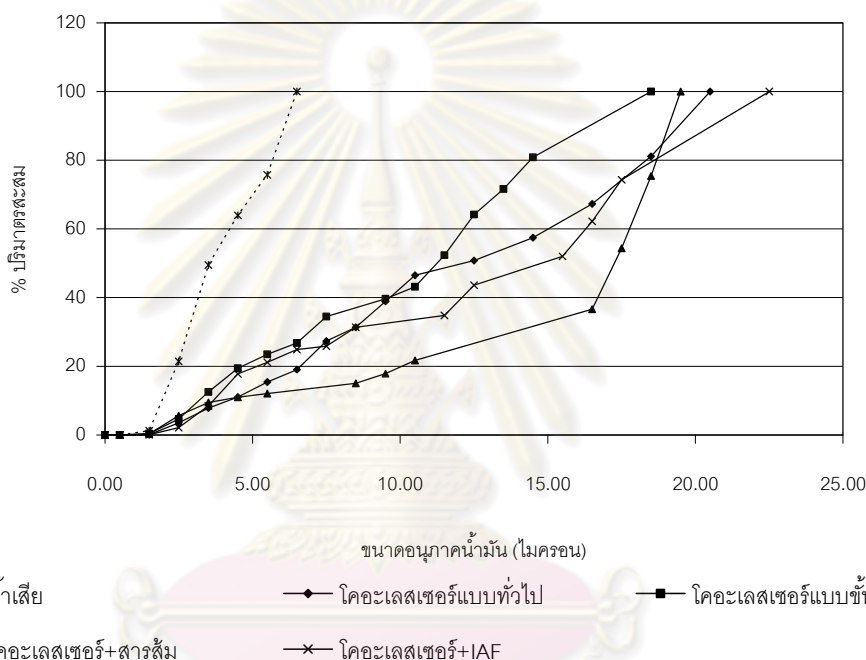
- ส่วนการวางตัวตัวกลางแบบขั้นตอน จะพบว่าที่เวลาเริ่มต้นจะมีขนาดอนุภาคน้ำมันค่อนข้างใหญ่คือประมาณ 9 ไมครอน และในช่วง 1 ชั่วโมงแรกขนาดค่อนข้างแปรผันตามเวลาโดยมีขนาดประมาณ 6-7 ไมครอน หลังจากนั้นขนาดของอนุภาคน้ำมันค่อนข้างมีขนาดคงที่ที่ประมาณ 6 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโคเอสเซอร์แบบอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่หลุดออกจากตัวกลางจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ค่อนข้างเร็วที่สุด ดังนั้นอนุภาคน้ำมันที่วัดได้จากน้ำทิ้งจึงเป็นน้ำมันที่มีขนาดเล็กและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ยาก



รูปที่ 4-43 เปอร์เซนต์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำของโคเอสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง ณ เวลา 360 นาที

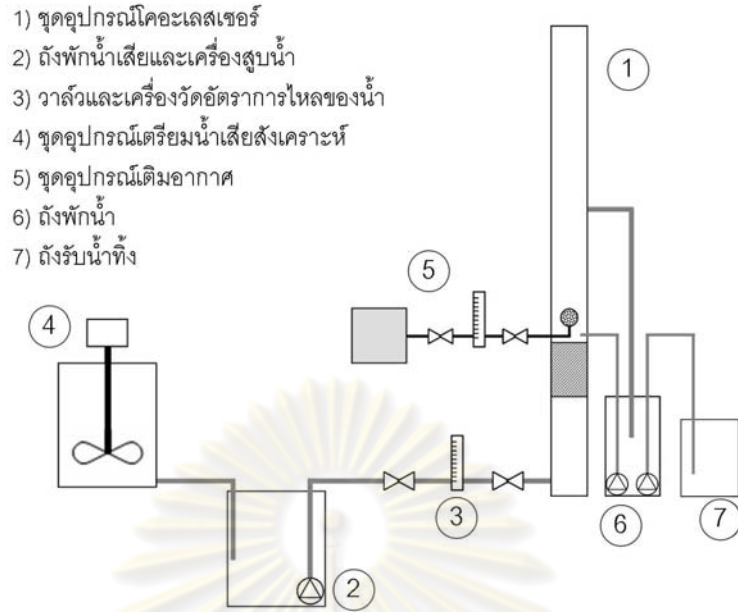
นอกจากนี้ กราฟเปอร์เซนต์ปริมาตรสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆ ในน้ำของอุปกรณ์โคเอสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง ณ เวลา 360 นาที แสดงดังรูปที่ 4-44 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์โคเอสเซอร์ช่วยเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมันได้ โดยจะพบว่าการวางตัวกลางแบบ

ขั้นตอนจะให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4-42 ซึ่งอาจเกิดจากอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่สามารถลอยขึ้นสู่อากาศได้เร็ว จึงเหลือแต่อนุภาคขนาดเล็กที่หลุดออกมากับน้ำทิ้ง ส่วนการเติมสารส้มจะพบว่าเมื่ออนุภาคน้ำมันขนาดเล็กน้อยที่สุด เนื่องจากสารส้มช่วยให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันได้มากกว่ากระบวนการอื่นๆ แต่จะพบว่าเมื่ออนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่บางส่วนหลุดออกมากับน้ำทิ้ง แต่จะพบน้อยกว่าการวางตัวกลางแบบขั้นตอน และจากการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF พบว่าจะให้อนุภาคน้ำมันใกล้เคียงกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป โดยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF จะให้ขนาดอนุภาคน้ำมันใหญ่กว่าเล็กน้อย



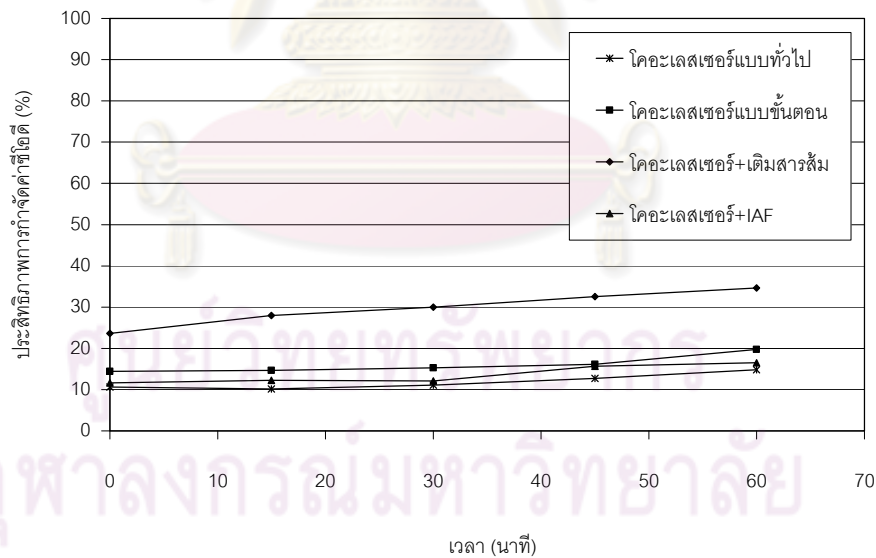
รูปที่ 4-44 เปรอเซ็นต์ปริมาตรสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆ ในน้ำของโคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง ณ เวลา 360 นาที

ทั้งนี้จากผลการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่องซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้อยกว่าการเดินระบบแบบทีละเท เนื่องจากมีระยะเวลาสำหรับการตกตะกอนน้อยกว่า ดังนั้นหากสามารถเพิ่มระยะเวลากักน้ำให้เพิ่มขึ้นอย่างเพียงพอ ก็มีแนวโน้มที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้ และแนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้คือการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่คอลัมน์โคอะเลสเซอร์อีกครั้ง ซึ่งนอกจากจะเพิ่มระยะเวลากักน้ำแล้วยังเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันของหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่กับอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กอีกด้วย โดยแผนผังการเดินระบบแสดงดังรูปที่ 4-45



รูปที่ 4-45 แผนผังการเดินระบบแบบต่อเนื่องร่วมกับการหมุนเวียนน้ำ 50%

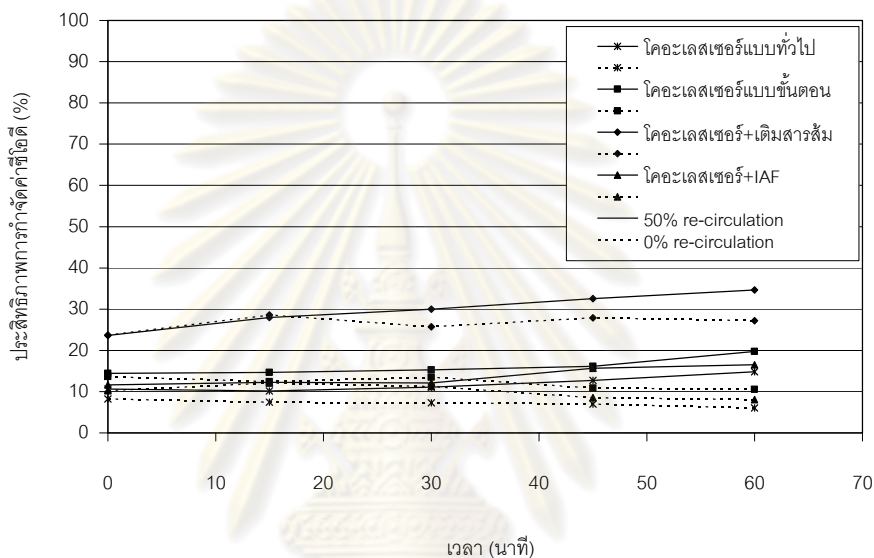
โดยผลการศึกษากการเดินระบบแบบต่อเนื่องร่วมกับการหมุนเวียนน้ำ 50% กลับเข้าสู่คอลัมน์โคอะเลสเซอร์แสดงดังรูปที่ 4-46



รูปที่ 4-46 ผลการศึกษากการหมุนเวียนน้ำ 50% กลับเข้าสู่คอลัมน์โคอะเลสเซอร์

จากการรูปที่ 4-46 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่คอลัมน์ เนื่องจากมีระยะเวลาที่น้ำเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิในน้ำมีโอกาสดับตัวกันได้มากขึ้น รวมทั้งมีระยะเวลาสำหรับการลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำมากขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็น

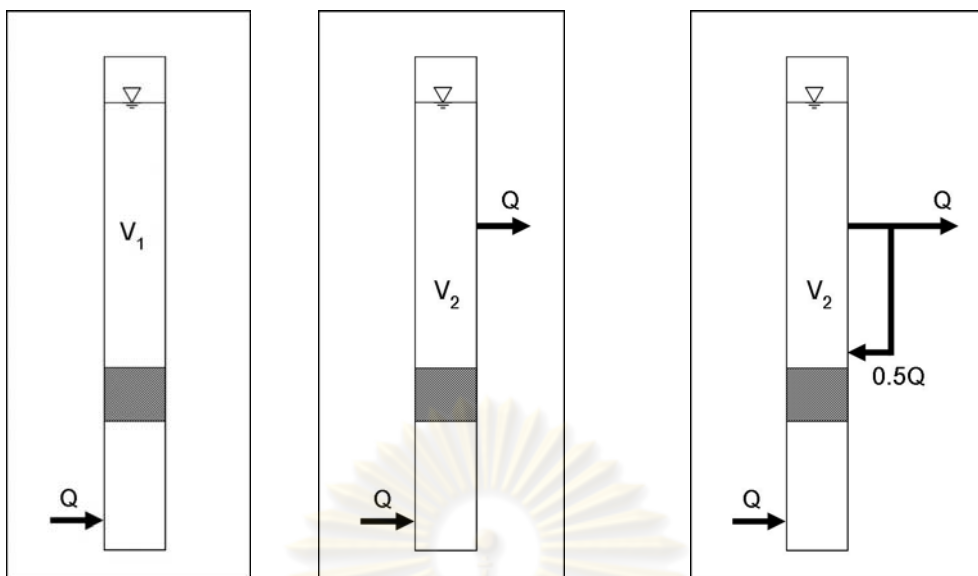
ได้อย่างชัดเจนในกรณีของการเติมสารส้ม ซึ่งการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าคอลัมน์ช่วยเพิ่มระยะเวลาสำหรับการสร้างตะกอนมากขึ้นด้วย อีกทั้งน่าจะช่วยลดปัญหาอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กได้ เนื่องจากการหมุนเวียนเอาอนุภาคน้ำมันกลับเข้าคอลัมน์จะทำให้โอกาสในการชนกันของอนุภาคน้ำมันมีมากขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังเป็นการใช้สารเคมีอย่างคุ้มค่ายิ่งขึ้นอีกด้วย เพราะมีการนำกลับเข้าระบบอีกครั้ง โดยผลการเปรียบเทียบการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าคอลัมน์ 50% กับระบบที่ไม่มีหมุนเวียนน้ำ แสดงดังรูปที่ 4-47



รูปที่ 4-47 ผลการศึกษาการหมุนเวียนน้ำ 50% เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีหมุนเวียนน้ำ

จากรูปที่ 4-47 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการเดินระบบ (15-20 นาที) ประสิทธิภาพของระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำไม่แตกต่างจากการเดินระบบแบบไม่มีหมุนเวียนน้ำมากนัก แต่เมื่อผ่านไประยะหนึ่งประสิทธิภาพของระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำจะสูงกว่าระบบที่ไม่มีหมุนเวียนน้ำ ดังนั้นแนวคิดในการเพิ่มระยะเวลากักน้ำจึงมีความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งเงื่อนไขการเดินระบบแบบต่างๆ เช่น อัตราการไหลของน้ำเสีย อัตราส่วนการหมุนเวียนน้ำเสีย รวมทั้งการพัฒนาตัวกลางที่มีประสิทธิภาพสูง จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป

จากการทดลองทั้งหมดสามารถเปรียบเทียบระบบของการเดินระบบแบบที่ละเท แบบต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่องที่มีการหมุนเวียนน้ำ 50% ได้ดังรูปที่ 4-48



(ก) แบบที่ละเท

(ข) แบบต่อเนื่อง

(ค) แบบต่อเนื่องและหมุนเวียนน้ำ 50%

รูปที่ 4-48 แผนผังเปรียบเทียบการเดินระบบแต่ละแบบ

จากรูปที่ 4-48 จะเห็นได้ว่าการเดินระบบแบบที่ละเทจะมีปริมาตรน้ำสำหรับการตกตะกอนเท่ากับ V_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 600.61 มิลลิลิตร และจะสามารถคำนวณระยะเวลาสำหรับการตกตะกอนได้จาก $T = \frac{V}{Q}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.21 นาที จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ส่วนการเดินระบบแบบต่อเนื่องนั้นจะมีปริมาตรน้ำสำหรับการตกตะกอนเท่ากับ V_2 ซึ่งมีค่าเพียง 326.91 มิลลิลิตรเท่านั้น และมีระยะเวลากักน้ำ 3.92 นาที ส่วนการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่มีการหมุนเวียนน้ำ 50% จะพบว่า มีปริมาตรน้ำเท่ากับ 326.91 มิลลิลิตรเช่นกัน แต่จะมีระยะกักน้ำเพียง 2.62 นาที เนื่องจากมีอัตราการไหลของน้ำสูงกว่าการเดินระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนน้ำ แต่เนื่องจากการหมุนเวียนน้ำจะช่วยเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคน้ำมันมากขึ้น อีกทั้งยังเกิดการแยกตัวของน้ำมันในถังพักน้ำด้วย หรือแม้กระทั่งอาจเกิดการเจือจางของน้ำเสียเนื่องจากการหมุนเวียนน้ำที่เข้าสู่ระบบ ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบแบบหมุนเวียนน้ำจึงใกล้เคียงกับระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนน้ำ

ซึ่งหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการเดินระบบแบบต่อเนื่องให้ใกล้เคียงกับระบบแบบที่ละเทจึงควรเพิ่มระยะกักน้ำให้ใกล้เคียงกัน โดยการเพิ่มความสูงของคอลัมน์ หรืออาจเปลี่ยนเป็นโคอะเลสเซอร์ที่มีการไหลของน้ำในแนวราบ (Horizontal coalescer) (Sokolović และคณะ, 2007) แต่อาจมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้ร่วมกับการเติมสารเคมีและกระบวนการ IAF

ส่วนระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำนั้น ควรมีการปรับอัตราการหมุนเวียนน้ำให้เหมาะสมกับระบบ รวมทั้งการเพิ่มความสูงของคอลัมน์น้ำจะมีความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด นอกจากนี้ การเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมความปั่นป่วนของน้ำด้านบน และการประยุกต์ใช้กระบวนการ Electro-Static coalescer เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันและน้ำกลับเอามาใช้ใหม่ ก็เป็นอีกหนึ่ง แนวทางที่มีความน่าสนใจ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาวัสดุราคาถูกลงมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ รวมทั้งการประยุกต์กระบวนการต่างๆ ได้แก่ การจัดรูปแบบการวางตัวกลางแบบชั้นตอน การเติมสารเคมี และกระบวนการอินดิวิจเออร์โฟลเทชัน (IAF) ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Sodium Dodecyl Sulphate, SDS) ที่ค่าความเข้มข้น 1 CMC (อิมัลชันน้ำมันคงตัว) สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาสมบัติของตัวกลางแบบเส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา และเส้นใยสแตนเลส พบว่า เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาไม่ชอบน้ำมากกว่าเส้นใยสแตนเลส เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำน้อยกว่า โดยค่ามุมสัมผัสของเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาต่ำกว่า 87.88 องศา ส่วนเส้นใยสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 90.97 องศา ดังนั้น เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาจึงมีความเหมาะสมสำหรับเป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ซึ่งควรจะเป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic material) มากกว่าเส้นใยสแตนเลส

5.1.2 จากการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ พบว่า การเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลางส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าลดลง เนื่องจากความสูงของตัวกลางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เกิดการรวมตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวอีกครั้ง จึงมีขนาดเล็กลงทำให้แยกตัวได้ช้าเมื่อตั้งทิ้งให้ตกตะกอน โดยค่าความสูงที่ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงสุดคือ 3.5 ซม. ซึ่งเส้นใยกรองน้ำตู้ปลามีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี 35-45% ส่วนเส้นใยสแตนเลสมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงสุด 38-46% เมื่อความสูงของชั้นตัวกลางเท่ากับ 3.5 ซม. เช่นกัน

5.1.3 จากผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย พบว่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่เหมาะสมที่สุด คือ 5 ลิตร/ชั่วโมง (ความเร็วการไหล 0.91 มิลลิเมตร/วินาที) โดยในช่วงที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่ำกว่า 5 ลิตร/ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียสูงกว่า 5 ลิตร/ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วการไหลของน้ำมีค่าสูงและเกิดการปั่นป่วน จึงทำให้อนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่กับตัวกลางหลุดออกจาก

ตัวกลางได้ง่าย และหลุดออกจากตัวกลางก่อนที่จะมีขนาดใหญ่เหมาะสม เมื่อน้ำมันที่ผ่านออกจากตัวกลางจึงมีขนาดเล็ก ส่งผลให้แยกตัวออกจากน้ำเสียได้ช้า

5.1.4 ผลการศึกษาขนาดของอนุภาคน้ำมันของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม. พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (D_{32}) เท่ากับ 8.42 ไมครอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำเสียก่อนการบำบัด (D_{32} เท่ากับ 3.69 ไมครอน) จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น 2.3 เท่า จึงส่งผลให้ความเร็วในการลอยตัวขึ้นของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้น (4.29×10^{-4} ซม./วินาที) และแยกตัวได้เร็วขึ้นตามกฎของสโตก ดังจะเห็นได้จากค่าซีโอดีของน้ำที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับที่ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน

5.1.5 จากการทดลองนำเอาการวางตัวกลางแบบชั้นตอนมาใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์พบว่า การวางตัวกลางแบบชั้นตอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ได้ โดยจำนวนชั้นของตัวกลางที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีสูงสุดที่สุด คือ 2 ชั้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีประมาณ 45-50% โดยผลการวัดขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบชั้นตอน 2 ชั้น พบว่า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (D_{32}) เท่ากับ 19.47 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย 5.3 เท่า

5.1.6 จากการศึกษาผลกระทบของการเติมสารส้มต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์พบว่า การเติมสารเคมีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ได้ โดยประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ คือประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีจะสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้ โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ได้มากถึง 95% ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 1 กรัม/ลิตร แต่การเติมสารส้มเกิน 0.4 กรัม/ลิตร จะทำให้เกิดตะกอนน้ำมันติดในชั้นตัวกลางและตกตะกอนบนตัวกลางมากกว่าที่จะทำให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถลอยขึ้นสู่น้ำเองได้ จึงไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคอะเลสเซอร์

5.1.7 จากการศึกษาการนำเอากระบวนการอินดิวิจิวแอโรไฟลเทชัน (IAF) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กมาก รวมทั้งลักษณะของคอลลิมนที่มีปริมาตรน้ำและความลึกของน้ำสำหรับกระบวนการ IAF ซึ่งส่งผลให้ค่า a/G ต่ำ จึงไม่เหมาะสมกับกระบวนการ IAF นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอัตราการเติมอากาศจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีลดลง โดยในช่วงอัตราการเติมอากาศที่ทำการศึกษาพบว่า อัตราการเติมอากาศ 0.025 ลิตร/นาที ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด คือ 44.59%

5.1.8 จากการศึกษาประสิทธิภาพของการเดินระบบแบบที่ละเทจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำการเดินระบบ

แบบต่อเนื่อง โดยระบบที่จะทำการศึกษาได้แก่ การตั้งตกตะกอน (Decantation) โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป (Conventional coalescer) ซึ่งใช้ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำดู่ปลาหนา 3.5 ซม. เปรียบเทียบกับการปรับรูปแบบการวางตัวกลางเป็นแบบขั้นตอน การเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร ใต้ตัวกลาง และการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF โดยใช้อัตราการเติมอากาศ 0.025 ลิตร/นาที่ ซึ่ง จะทำการเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตร/ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

5.1.9 ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่องของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีประมาณ 8% ในช่วง 10 นาทีแรก หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่สภาวะคงตัวประมาณ 5% ในขณะที่การเดินระบบแบบต่อเนื่องของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่วางตัวกลางแบบขั้นตอนพบว่าสอดคล้องกับ อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป โดยในช่วง 30 นาทีแรกมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีประมาณ 13% จากนั้นประสิทธิภาพของระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีประมาณ 10% ส่วนการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF กับโคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง พบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่สภาวะคงตัวเพียง 6% เท่านั้น และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในช่วง 30 นาทีแรก ประมาณ 11% และการทดลองเติมสารส้มร่วมกับโคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง พบว่า ให้มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงถึง 26% ในช่วง 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นจึงลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ประมาณ 19%

5.1.10 การเดินระบบแบบต่อเนื่องจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณ 30% จากการเดินระบบแบบที่ละเท เนื่องจากระยะเวลาของการเดินระบบแบบที่ละเทเป็นเวลานานในการตั้งทิ้งให้น้ำมันแยกตัวออกจากน้ำ (ประมาณ 7 นาที) แต่การเดินระบบแบบต่อเนื่องจะมีน้ำเสียไหลเข้าคอลัมน์และไหลออกจากคอลัมน์ตลอดเวลา ซึ่งจะมีระยะเวลาให้น้ำมันแยกตัวออกจากน้ำได้เพียง 4 นาทีเท่านั้น รวมทั้งการเดินระบบแบบต่อเนื่องมีระยะเวลาในการสร้างตะกอนสำหรับการเติมสารเคมีน้อยส่งผลให้ค่า G.T น้อยตามไปด้วย ตะกอนของน้ำมันจึงมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง

5.1.11 ผลการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่องร่วมกับการหมุนเวียนน้ำ 50% กลับเข้าคอลัมน์โคอะเลสเซอร์ พบว่าในช่วง 15-20 นาทีแรกของการหมุนเวียนน้ำ ประสิทธิภาพของระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำไม่แตกต่างจากการเดินระบบแบบไม่มีการหมุนเวียนน้ำมากนัก เนื่องจากระยะเวลาที่น้ำมีค่าใกล้เคียงกับการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำ แต่หลังจากนั้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสของอนุภาคน้ำมัน ทำให้อนุภาคน้ำมันมีโอกาสชนและรวมตัวกันมากขึ้น อนุภาคน้ำมันจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยขึ้นสู่อากาศได้เร็วขึ้นด้วย นอกจากนี้ ยังอาจเกิดการเจือจางน้ำเสียในคอลัมน์จึงส่งผลให้ค่าซีไอดีของน้ำทิ้งลดลง

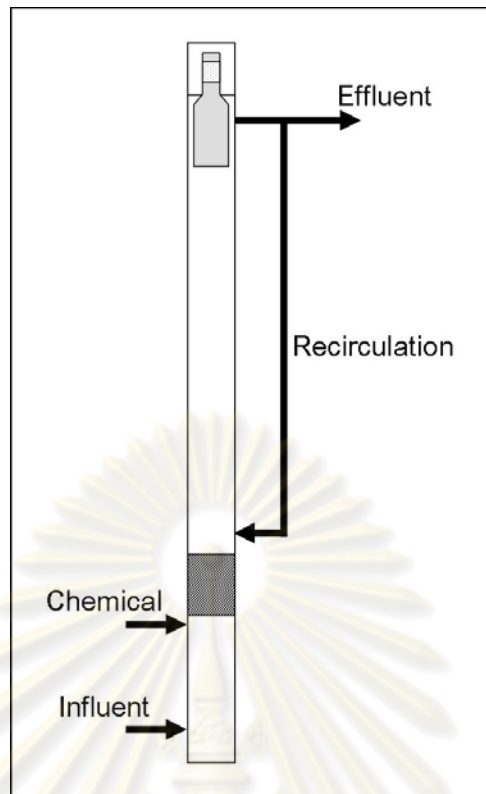
5.1.12 จากผลการศึกษาค่าจะพบว่า ระบบที่ทำการทดลองยังมีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าซีไอดีของสารลดแรงตึงผิว (SDS) ที่ใช้ในการทดลอง และไม่สามารถกำจัดออกจากร้าน้ำเสียได้ ดังนั้นหากสามารถทำการศึกษาค่าซีไอดีของสารลดแรงตึงผิวที่เหลือในน้ำก็จะสามารถหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่แท้จริงของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ได้ ซึ่งน่าจะมีความถูกต้องและมีค่ามากกว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการศึกษานี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษานำเอาวัสดุราคาถูกที่หาได้ง่ายมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์สามารถลดค่าซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ได้ถึง 45% เมื่อทำการเลือกเงื่อนไขการเดินระบบที่เหมาะสม ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำการศึกษาวัดคุณสมบัติอื่น รวมทั้งเงื่อนไขการเดินระบบที่เหมาะสมต่อไป

นอกจากนี้ จากการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ด้วยการปรับเปลี่ยนการวางตัวกลาง การเติมสารเคมี และการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไปได้ โดยการเติมสารเคมีให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีสูงที่สุดถึง 95% โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเคมี และลักษณะการเติมสารเคมี ดังนั้นการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการศึกษา ทั้งในแง่ชนิดของสารเคมี ความเข้มข้นของสารเคมี ลักษณะการเติมสารเคมี หรือแม้กระทั่งการนำเอาสารเคมีมากกว่า 2 ชนิดมาใช้งานร่วมกัน ส่วนการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก เนื่องจากมีความสูงของน้ำเหนือหัวเติมอากาศ และระยะเวลาที่น้ำต่ำ ดังนั้น หากทำการปรับเปลี่ยนความสูงของคอลัมน์ให้เหมาะสม การประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ยังเป็นแนวทางที่น่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมได้

อีกทั้ง จากการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพจะลดลงจากการเดินระบบแบบทีละเท เนื่องจากระยะเวลาสำหรับการสัมผัสของอนุภาคน้ำมันน้อยกว่า ดังนั้นแนวความคิดในการเพิ่มระยะเวลากักน้ำ เช่น การหมุนเวียนน้ำกลับเข้าคอลัมน์ การเลือกอัตราการหมุนเวียนน้ำ และการปรับอัตราการไหลของน้ำเสียให้เหมาะสม รวมทั้งการเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมความดันปวนของน้ำด้านบนจึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่มีความน่าสนใจที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้ โดยลักษณะของคอลัมน์โคอะเลสเซอร์ที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 คอลัมน์โคอะเลสเซอร์ที่นำเสนอมุ่งเน้นเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกียรติพงษ์ เจริญสุข. การกำจัดน้ำมันสำหรับน้ำเสียโรงกลั่นน้ำมันด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

ชวลีกร ชุกกลิ่น. การขจัดน้ำมันเสถียรในอิมัลชันของน้ำเสียโดยวิธีอินดิวิจแอโรโฟลเทชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ประจักษ์ ศาสตรเวช. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิวิจแอโรโฟลเทชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

มันสิน ตัณฑุลเวศน์. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

มันสิน ตัณฑุลเวศน์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัท แชน อี. 68 แล็บ จำกัด, 2546.

สุรพล สายพานิช. เทคนิคการแยกอิมัลชันด้วยวิธีโคแอกกูเลชัน. วิศวกรรมสาร ปีที่ 36 เล่มที่ 1 (กุมภาพันธ์ 2526) : 76-85.

อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545.

ภาษาอังกฤษ

Al-Shamrani, A.A., James, A. and Xiao, X. Separation of oil from water by dissolved air flotation. Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 209 (2002) : 15-26.

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.

- Aurelle, Y. Treatment of oil-containing wastewater. 1st ed. Bangkok : Chulalongkorn, 1985.
- Creative Commons Attribution-ShareAlike. Sauter mean diameter. Available from : http://en.wikipedia.org/wiki/Sauter_mean_diameter. [2009, September 1].
- 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. Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 252 (2005) : 113-119.
- Flingoh, C. and Chong, C.L. Surface tensions of palm oil, palm olein and palm stearin. Journal of ELAEIS 4(1) (June 1992) : 27-31.
- Geankoplis, C.j. Transport processes and separation process principles (includes unit operations). 4th ed. New Jersey : Prentice Hall Professional Technical Reference, 2006.
- Griskey, R.G. Transport phenomena and unit operations: A combined approach. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- Ladislav, S. Solid-Liquid Separation. 4th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000.
- Li, J. and Gu, Y. Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. Journal of Separation and Purification Technology 42 (2005) : 1-13.
- McCabe, L.W., Smith, J.C. and Harriott, P. Unit operations of chemical engineering. 6th ed. New York : Mcgraw-Hill Publ. Comp.
- Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4th ed. Singapore : McGraw-Hill, 2004.
- Meysami, B. and Kasaeian, A.B. Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation. Journal of Bioresource Technology 96 (2005) : 303–307.
- Moosai, R. and Dawe, R.A. Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup. Journal of Separation and Purification Technology 33 (2003) : 303-314.

- Rachu, S. Computer program development for oily wastewater treatment process selection, design and simulation. Doctoral dissertation Department of Environment The Institut National des Sciences Appliquées of Toulouse, 2005.
- Reynolds, T.D. and Richards, P.A. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering. 2nd ed. Boston : PWS publishing company, 1996.
- Rubio, J., Souza, M.L. and Smith, R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. Journal of Minerals Engineering 15 (2002) : 139-155.
- Sokolović, R.M.Š., Vulić, T.J. and Sokolović, S.M. Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion. Journal of Separation and Purification Technology 56 (2007) : 79-84.
- Wanichkul, B. Comparison of ultrafiltration and distillation processes for treatment of cutting oil emulsion. Doctoral dissertation Department of Industrial Process Engineering The Institut National des Sciences Appliquées of Toulouse, 2000.
- Water Quality Division Aquifer Protection Program. BADCT Guidance document for Pretreatment with oil/water separators draft. Arizona : Arizona Department of Environmental Quality, 1996.
- Yu, T., Biying, D., Jun, Y. and Yuanming, Z. Temperature effects on surface activity and application in oxidation of toluene derivatives of CTAB-SDS with KMnO_4 . J. Chem. Sci Vol. 118 No. 3 (May 2006) : 281-285.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ตารางที่ ก-1.1 ตารางผลการศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ความเข้มข้นของ SDS (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความขุ่นของน้ำเสีย (NTU)
0.002	19.15
0.004	32.65
0.006	40.86
0.008	71.08
0.010	70.79
0.020	70.23
0.040	72.93
0.060	71.25
0.080	70.96
0.100	71.35

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ตารางที่ ก-2.1 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.00
1.50	14.09
2.50	48.99
3.50	24.83
4.50	6.04
5.50	2.68
6.50	3.36
7.50	0.00
8.50	0.00
9.50	0.00
10.50	0.00
11.50	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการทิ้งให้น้ำมัน
แยกตัวด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

ตารางที่ ก-3.1 ตารางผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการทิ้งให้น้ำมัน
แยกตัวด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

เวลา (นาที)	ค่าซีไอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
0	12,493	7.25
5	12,469	7.43
10	12,493	7.25
15	12,527	6.99
20	12,410	7.86
30	12,410	7.86
45	12,274	8.88
60	12,102	10.15
90	12,102	10.15
120	11,736	12.87
150	11,455	14.95
180	11,370	15.59

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.2 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการทิ้งให้น้ำมัน
แยกตัวด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.27
1.50	20.60
2.50	24.39
3.50	18.97
4.50	8.67
5.50	7.59
6.50	4.88
7.50	3.52
8.50	3.52
9.50	2.17
10.50	1.63
11.50	1.63
12.50	0.27
13.50	0.54
14.50	1.08
15.50	0.00
16.50	0.00
17.50	0.00
18.50	0.27
19.50	0.00
20.50	0.00

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-4 ผลการศึกษาผลกระทบของความเสี่ยงของชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาและเส้นใยสแตนเลส

ตารางที่ ก-4.1 ตารางผลการศึกษาผลกระทบของความเสี่ยงของชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

เวลา (นาที)	ความเสี่ยงของชั้นตัวกลาง									
	3.5 ซม.		5.0 ซม.		7.0 ซม.		10.5 ซม.		14.0 ซม.	
	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)
0	8,576	36.32	9,783	27.36	9,968	25.99	10,350	23.15	9,158	32.01
5	8,518	36.76	9,806	27.20	9,968	25.99	10,346	23.19	9,158	32.01
10	8,809	34.60	9,726	27.79	10,246	23.93	10,541	21.74	9,158	32.01
15	8,654	35.75	9,816	27.12	9,982	25.89	10,736	20.29	9,290	31.02
20	8,518	36.76	9,795	27.28	9,968	25.99	10,677	20.73	9,442	29.90
30	8,367	37.88	9,752	27.60	9,968	25.99	10,736	20.29	9,158	32.01
45	8,383	37.76	9,632	28.49	9,775	27.43	10,541	21.74	9,404	30.18
60	8,131	39.63	9,295	30.99	9,775	27.43	10,731	20.33	8,968	33.42
90	8,189	39.20	9,158	32.01	9,582	28.86	10,541	21.74	8,778	34.82
120	7,686	42.94	9,153	32.05	9,404	30.18	10,355	23.12	8,641	35.85
150	7,686	42.94	9,077	32.61	9,389	30.29	9,970	25.98	8,399	37.64
180	7,492	44.37	8,778	34.82	9,233	31.45	9,979	25.91	8,210	39.05

ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.2 ตารางผลการศึกษามลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ตัวกลางเส้นใยสแตนเลส

เวลา (นาที)	ความสูงของชั้นตัวกลาง							
	3.5 ซม.		7.0 ซม.		10.5 ซม.		14.0 ซม.	
	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)
0	8,209	39.05	9,404	30.18	10,241	23.96	11,894	11.69
5	8,270	38.60	9,158	32.01	10,302	23.51	11,573	14.07
10	8,372	37.84	9,158	32.01	10,505	22.00	11,951	11.27
15	8,372	37.84	8,968	33.42	10,388	22.88	11,951	11.27
20	8,270	38.60	9,158	32.01	10,067	25.26	12,017	10.78
30	8,128	39.65	8,589	36.23	10,016	25.63	11,951	11.27
45	8,067	40.11	8,589	36.23	10,270	23.75	11,573	14.07
60	8,067	40.11	8,399	37.64	10,270	23.75	11,396	15.39
90	7,661	43.12	8,210	39.05	9,864	26.77	11,517	14.49
120	7,559	43.88	8,210	39.05	9,803	27.22	11,196	16.88
150	7,356	45.39	8,210	39.05	9,864	26.77	11,063	17.86
180	7,253	46.15	8,051	40.22	9,864	26.77	10,930	18.85

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.3 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา หน้า 3.5 ซม.

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.00
1.50	18.71
2.50	33.09
3.50	20.14
4.50	7.91
5.50	5.76
6.50	5.76
7.50	4.32
8.50	0.72
9.50	1.44
10.50	0.00
11.50	0.72
12.50	0.72
13.50	0.00
14.50	0.00
15.50	0.00
16.50	0.00
17.50	0.00
18.50	0.00
19.50	0.00
20.00	0.72
21.00	0.00

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.4 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย
โคอะเลสเซอร์ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม. และตกตะกอน 90 นาที

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.44
1.50	22.37
2.50	30.26
3.50	16.45
4.50	9.21
5.50	7.68
6.50	5.48
7.50	2.63
8.50	1.10
9.50	1.75
10.50	0.66
11.50	0.44
12.50	1.10
13.50	0.00
14.50	0.00
15.50	0.00
16.50	0.22
17.50	0.00
18.50	0.00
19.50	0.00
20.50	0.22
21.50	0.00
22.50	0.00

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.5 ตารางขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เส้นใยกรองน้ำ
ตู้ปลา หน้า 3.5 ซม. ที่เวลาต่างๆ

Time (min)	D ₃₂ (micron)	D _{mean} (micron)
0	14.32	4.70
5	11.18	4.45
10	8.44	4.06
20	8.05	3.68
45	8.06	3.60
90	7.61	3.77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-5 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ด้วยตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

ตารางที่ ก-5.1 ตารางผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

เวลา (นาที)	อัตราการไหลน้ำเสีย							
	2.5 ล./ชม.		5.0 ล./ชม.		9.0 ล./ชม.		18.0 ล./ชม.	
	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)
0	9,800	27.24	8,576	36.32	10,828	19.61	11,908	11.59
5	9,946	26.16	8,518	36.76	10,650	20.93	11,738	12.85
10	9,973	25.95	8,809	34.60	10,628	21.09	11,900	11.65
15	9,973	25.95	8,654	35.75	10,858	19.39	11,871	11.86
20	9,614	28.62	8,518	36.76	10,802	19.80	11,512	14.53
30	9,744	27.66	8,367	37.88	10,672	20.77	11,483	14.75
45	9,373	30.41	8,383	37.76	10,115	24.90	10,738	20.28
60	8,890	33.99	8,131	39.63	9,800	27.24	10,570	21.53
90	8,723	35.23	8,189	39.20	9,787	27.34	10,441	22.48
120	8,755	35.00	7,686	42.94	9,593	28.78	10,189	24.35
150	8,945	33.59	7,686	42.94	9,474	29.66	10,247	23.92
180	8,739	35.11	7,492	44.37	9,205	31.65	9,996	25.79

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-6 ผลการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ด้วยการวางตัวกลางแบบชั้นตอน

ตารางที่ ก-6.1 ตารางผลการศึกษาผลกระทบของจำนวนชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา

เวลา (นาที)	จำนวนชั้นของตัวกลาง							
	1 ชั้น		2 ชั้น		3 ชั้น		4 ชั้น	
	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)
0	8,576	36.32	7,331	45.57	9,173	31.90	9,531	29.24
5	8,518	36.76	7,146	46.95	9,229	31.48	9,586	28.83
10	8,809	34.60	7,517	44.19	9,173	31.90	9,623	28.55
15	8,654	35.75	7,424	44.88	8,993	33.23	9,439	29.92
20	8,518	36.76	7,702	42.81	8,986	33.29	9,660	28.28
30	8,367	37.88	7,461	44.61	8,611	36.07	9,079	32.59
45	8,383	37.76	7,461	44.61	8,855	34.26	9,310	30.88
60	8,131	39.63	7,572	43.78	8,742	35.09	8,887	34.02
90	8,189	39.20	7,331	45.57	8,649	35.79	8,850	34.29
120	7,686	42.94	6,719	50.12	8,274	38.57	8,666	35.66
150	7,686	42.94	6,403	52.46	8,062	40.14	8,427	37.43
180	7,492	44.37	6,589	51.08	7,862	41.63	8,415	37.52

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-6.2 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านตัวกลางเส้นใย
กรองน้ำตู้ปลาที่วางแบบขั้นตอน 2 ชั้น

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.00
1.50	5.06
2.50	27.85
3.50	16.46
4.50	10.13
5.50	6.33
6.50	6.33
7.50	5.06
8.50	6.33
9.50	7.59
10.50	1.27
11.50	1.27
12.50	0.00
13.50	0.00
14.50	0.00
15.50	1.27
16.50	1.27
17.50	0.00
18.50	0.00
19.50	0.00
20.50	0.00
21.50	0.00
22.50	0.00
23.50	0.00
24.50	2.53
25.50	0.00
26.50	0.00
27.50	0.00

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-6.2 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาที่วางแบบขั้นตอน 2 ชั้น (ต่อ)

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
28.50	0.00
29.50	0.00
30.50	0.00
31.50	0.00
32.50	0.00
33.50	0.00
34.50	1.27
35.50	0.00
36.50	0.00
37.50	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-6.3 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย
โคอะเลสเซอร์ที่วางแบบขั้นตอน 2 ชั้น และตกตะกอน 90 นาที

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.69
1.50	33.10
2.50	31.03
3.50	10.34
4.50	8.28
5.50	4.14
6.50	4.83
7.50	4.83
8.50	0.00
9.50	0.69
10.50	0.69
11.50	1.38
12.50	0.00
13.50	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-6.4 ตารางขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เส้นใยกรองน้ำ
ตู้ปลาที่วางแบบขั้นตอน 2 ชั้น ที่เวลาต่างๆ

Time (min)	D_{32} (micron)	D_{mean} (micron)
0	11.43	4.86
5	8.73	4.35
10	8.58	4.29
20	8.32	3.63
45	7.23	3.35
90	7.16	3.25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-7 ผลการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ด้วยการเติมสารเคมี

ตารางที่ ก-7.1 ตารางผลการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีโดยวิธีจาร์เทสต์

ความเข้มข้นของสารส้ม (กรัม/ลิตร)	ค่าซีโอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
0.1	11,069	17.82
0.2	8,917	33.80
0.4	5,783	57.06
0.6	3,756	72.11
0.8	1,687	87.48
1.0	1,144	91.51
1.2	833	93.81
1.4	1,124	91.65
1.6	1,254	90.69

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-7.2 ตารางผลการศึกษามลกระทบของตำแหน่งเดิมสารส้มความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

เวลา (นาที)	ตำแหน่งเดิมสารส้ม									
	ในถังน้ำเสียและ กวนผสม 1 นาที		ในถังน้ำเสีย		ในท่อน้ำเสียเข้า		ใต้ตัวกลาง 1 ชม.		กลางตัวกลาง	
	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)
0	1,886	86.00	1,555	88.45	765	94.32	758	94.37	952	92.93
5	1,915	85.78	1,750	87.01	674	95.00	710	94.73	1,009	92.51
10	1,944	85.57	1,750	87.01	765	94.32	818	93.92	1,085	91.94
15	1,886	86.00	1,671	87.59	707	94.75	821	93.90	952	92.93
20	2,138	84.12	1,807	86.58	765	94.32	856	93.64	1,009	92.51
30	2,138	84.12	1,879	86.05	707	94.75	902	93.30	1,090	91.91
45	2,138	84.12	2,054	84.75	707	94.75	849	93.70	1,094	91.88
60	2,586	80.80	2,532	81.20	631	95.32	868	93.56	1,075	92.02
90	2,586	80.80	2,656	80.28	631	95.32	945	92.99	1,066	92.09
120	2,657	80.27	2,573	80.90	742	94.49	982	92.71	1,018	92.44
150	2,438	81.90	2,459	81.75	682	94.94	837	93.79	994	92.62
180	2,518	81.31	2,567	80.94	674	95.00	950	92.95	974	92.77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-7.3 ตารางผลการศึกษามลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (เติมสารส้มได้ตัวกลาง 1 ซม.)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารส้ม									
	0.2 กรัม/ลิตร		0.4 กรัม/ลิตร		0.6 กรัม/ลิตร		0.8 กรัม/ลิตร		1.0 กรัม/ลิตร	
	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)
0	8,626	35.96	5,125	61.95	3,336	75.23	1,571	88.34	758	94.37
5	8,598	36.16	5,168	61.63	3,299	75.50	1,543	88.54	710	94.73
10	8,571	36.37	5,211	61.31	3,262	75.78	1,515	88.75	818	93.92
15	8,556	36.48	5,151	61.75	3,246	75.90	1,635	87.86	821	93.90
20	8,541	36.59	5,091	62.20	3,231	76.01	1,756	86.97	856	93.64
30	8,681	35.55	5,177	61.56	3,454	74.35	1,671	87.60	902	93.30
45	8,572	36.36	5,170	61.62	3,412	74.67	1,614	88.02	849	93.70
60	8,606	36.11	5,169	61.63	3,368	75.00	1,708	87.32	868	93.56
90	8,593	36.20	5,333	60.41	3,494	74.06	1,665	87.64	945	92.99
120	8,638	35.87	5,273	60.85	3,270	75.72	1,727	87.18	982	92.71
150	8,517	36.77	5,389	59.99	3,298	75.52	1,552	88.48	837	93.79
180	8,564	36.42	5,191	61.46	3,390	74.83	1,626	87.93	950	92.95

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-7.4 ตารางผลการศึกษามลกระทบของความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (เติมสารส้มกลางตัวกลาง)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารส้ม									
	0.2 กรัม/ลิตร		0.4 กรัม/ลิตร		0.6 กรัม/ลิตร		0.8 กรัม/ลิตร		1.0 กรัม/ลิตร	
	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)	COD (mg/l)	การ บำบัด (%)
0	8,798	34.68	5,346	60.31	3,550	73.65	1,628	87.91	952	92.93
5	8,770	34.89	5,428	59.70	3,498	74.03	1,641	87.81	1,009	92.51
10	8,742	35.10	5,510	59.09	3,446	74.42	1,654	87.72	1,085	91.94
15	8,830	34.44	5,468	59.40	3,510	73.94	1,852	86.25	952	92.93
20	8,918	33.79	5,426	59.71	3,574	73.46	2,050	84.78	1,009	92.51
30	9,006	33.14	5,514	59.06	3,558	73.59	2,110	84.34	1,090	91.91
45	8,842	34.35	5,528	58.96	3,657	72.85	1,859	86.20	1,094	91.88
60	8,799	34.67	5,410	59.83	3,575	73.46	1,916	85.78	1,075	92.02
90	8,642	35.84	5,590	58.50	3,615	73.16	1,886	86.00	1,066	92.09
120	8,809	34.60	5,475	59.35	3,440	74.46	1,863	86.17	1,018	92.44
150	8,894	33.97	5,435	59.65	3,455	74.35	1,709	87.31	994	92.62
180	8,720	35.26	5,351	60.27	3,515	73.91	1,784	86.76	974	92.77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-7.5 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่
มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.00
1.50	2.74
2.50	32.88
3.50	24.66
4.50	6.85
5.50	4.11
6.50	6.85
7.50	2.74
8.50	5.48
9.50	1.37
10.50	2.74
11.50	1.37
12.50	0.00
13.50	1.37
14.50	0.00
15.50	0.00
16.50	0.00
17.50	1.37
18.50	1.37
19.50	0.00
20.50	1.37
21.50	0.00
22.50	1.37
23.50	0.00
24.50	1.37
25.50	0.00
26.50	0.00

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-7.6 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วย
โคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร และตกตะกอน 90 นาที

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.00
1.50	42.86
2.50	28.57
3.50	12.38
4.50	6.67
5.50	4.76
6.50	0.95
7.50	0.00
8.50	0.95
9.50	1.90
10.50	0.00
11.50	0.95
12.50	0.00
13.50	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-8 ผลการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ ด้วยกระบวนการอินดิวิจแอริโพลเทชัน (IAF)

ตารางที่ ก-8.1 ตารางผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF

เวลา (นาที)	อัตราการเติมอากาศ					
	0.025 (ลิตร/นาที)		0.1 (ลิตร/นาที)		0.3 (ลิตร/นาที)	
	COD (mg/l)	การบำบัด (%)	COD (mg/l)	การบำบัด (%)	COD (mg/l)	การบำบัด (%)
0	7,521	44.16	8,225	38.94	8,318	38.24
5	7,464	44.59	8,131	39.63	8,286	38.48
10	7,616	43.46	8,131	39.63	8,383	37.76
15	7,616	43.46	8,034	40.35	8,267	38.62
20	7,616	43.46	7,996	40.64	8,383	37.76
30	7,578	43.74	8,073	40.06	8,273	38.58
45	7,654	43.17	7,938	41.07	8,267	38.62
60	7,711	42.75	7,938	41.07	8,325	38.19
90	7,711	42.75	7,970	40.83	8,131	39.63

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-8.2 ตารางผลการศึกษขนาดของฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

อัตราการเติมอากาศ (ลิตร/นาที่)	ขนาดของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
0.025	1.16
0.1	2.18
0.3	2.33



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-8.3 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วย
โคอะเลสเซอร์ที่มีการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF นาน 90 นาที

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)
0.00	0.00
0.50	0.00
1.50	20.22
2.50	22.47
3.50	11.24
4.50	12.36
5.50	12.36
6.50	4.49
7.50	3.37
8.50	2.25
9.50	3.37
10.50	3.37
11.50	1.12
12.50	1.12
13.50	1.12
14.50	0.00
15.50	1.12
16.50	0.00
17.50	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-8.4 ตารางขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เส้นใยกรองน้ำ
ตู้ปลาที่มีการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ที่เวลาต่างๆ

Time (min)	D_{32} (micron)	D_{mean} (micron)
0	12.73	6.01
5	12.27	5.95
10	9.44	5.34
20	8.83	5.27
45	8.63	4.73
90	8.72	4.52

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-9 ผลการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ ก-9.1 ตารางผลการศึกษาผลกระทบของการเดินระบบแบบต่อเนื่องต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี

Time (min)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
	ตั้งตกตะกอน	โคอะเลสเซอร์	วางตัวกลาง แบบขั้นตอน 2 ชั้น	เติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร	IAF 0.025 ลิตร/นาที
0	2.25	8.18	13.61	23.70	10.25
5	2.43	9.33	12.41	26.27	10.27
10	2.25	8.83	12.35	27.27	10.94
15	2.49	7.45	12.43	28.57	12.06
20	1.99	7.33	13.31	27.01	10.85
30	1.86	7.27	13.44	25.74	11.26
45	1.88	7.00	10.81	27.85	8.55
60	1.65	6.01	10.55	27.20	8.04
90	1.15	5.01	9.85	22.96	7.93
120	1.23	4.61	10.04	22.70	6.37
150	0.95	4.82	12.03	19.97	5.32
180	1.04	3.69	11.84	18.59	5.88
210	0.97	5.29	10.47	17.92	4.42
240	0.88	4.81	10.11	20.16	4.82
270	1.08	3.98	10.13	19.84	5.76
300	1.10	4.33	10.14	17.97	5.72
330	0.95	4.50	8.45	18.46	5.16
360	0.98	4.38	8.90	18.18	5.05

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-9.2 ตารางขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่เวลาต่างๆ

Time (min)	โคอะเลสเซอร์		วางตัวกลาง แบบชั้นตอน 2 ชั้น		เติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร		IAF 0.025 ลิตร/นาที	
	D ₃₂ (micron)	D _{mean} (micron)	D ₃₂ (micron)	D _{mean} (micron)	D ₃₂ (micron)	D _{mean} (micron)	D ₃₂ (micron)	D _{mean} (micron)
0	9.62	3.05	8.92	3.13	13.67	3.93	12.63	4.87
10	6.35	2.78	5.49	2.89	13.48	3.38	11.52	4.05
30	8.50	3.23	7.54	4.16	13.94	2.85	7.84	4.56
60	7.75	3.87	5.43	3.51	13.75	3.25	6.41	3.28
120	9.91	4.41	6.41	2.73	13.46	3.08	6.83	3.10
180	8.25	2.69	6.17	3.67	9.78	2.88	10.21	3.82
240	7.72	3.15	5.81	3.89	9.00	3.38	7.80	3.41
300	6.88	2.62	6.04	3.88	10.46	3.57	7.25	3.26
360	10.26	4.03	7.20	3.36	10.70	2.97	9.23	4.04

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-9.3 ตารางเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วย
โคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน (%)			
	โคอะเลสเซอร์	วางตัวกลาง แบบชั้นตอน 2 ชั้น	เติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร	IAF 0.025 ลิตร/นาที่
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.00	0.00	3.87	0.00
1.50	6.85	17.14	16.57	4.85
2.50	45.66	36.33	56.35	28.16
3.50	21.00	24.90	14.92	32.04
4.50	7.31	10.20	2.76	21.84
5.50	5.48	3.27	1.10	4.37
6.50	2.74	1.63	0.55	2.91
7.50	4.11	2.45	0.00	0.49
8.50	1.37	0.00	0.55	1.94
9.50	1.83	0.82	0.55	0.00
10.50	1.37	0.41	0.55	0.00
11.50	0.00	0.82	0.00	0.49
12.50	0.46	0.82	0.00	0.97
13.50	0.00	0.41	0.00	0.00
14.50	0.46	0.41	0.00	0.00
15.50	0.00	0.00	0.00	0.49
16.50	0.46	0.00	0.55	0.49
17.50	0.00	0.00	0.55	0.49
18.50	0.46	0.41	0.55	0.00
19.50	0.00	0.00	0.55	0.00
20.50	0.46	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.49
23.50	0.00	0.00	0.00	0.00
24.50	0.00	0.00	0.00	0.00

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-9.4 ตารางผลการศึกษามลกระทบของการหมุนเวียนเข้า 50% กลับเข้าระบบต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Time (min)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โคอะเลสเซอร์	วางตัวกลาง แบบชั้นตอน 2 ชั้น	เติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร	IAF 0.025 ลิตร/นาที่
0	10.63	14.38	23.63	11.60
15	10.18	14.63	27.96	12.27
30	11.11	15.25	29.95	12.05
45	12.70	16.09	32.52	15.66
60	14.76	19.73	34.60	16.51

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

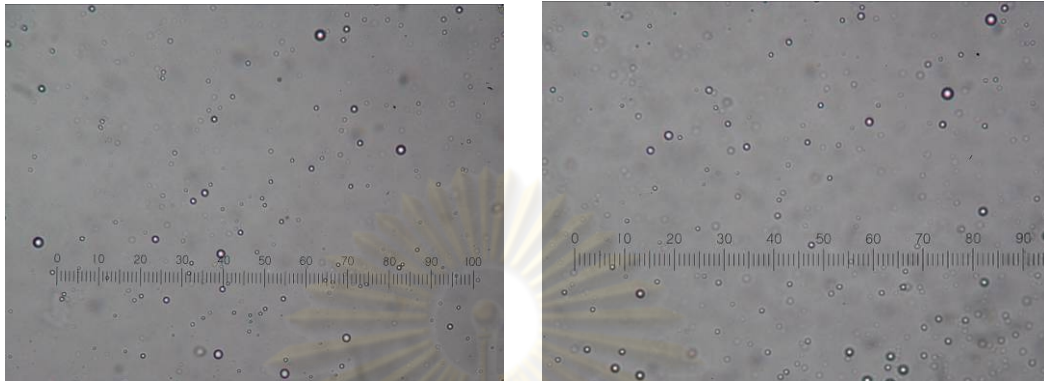


ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

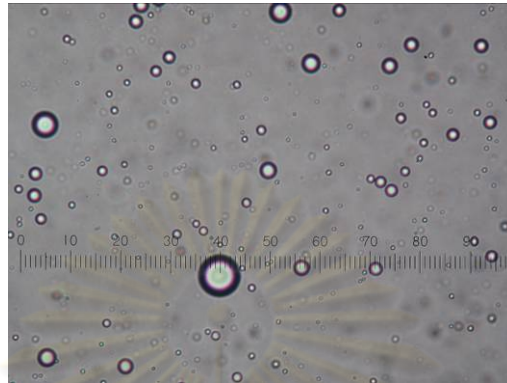
ภาคผนวก ข-1 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย



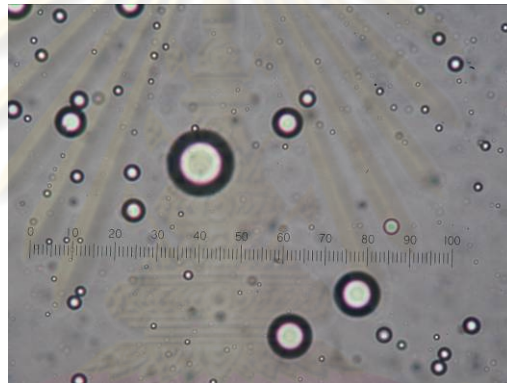
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

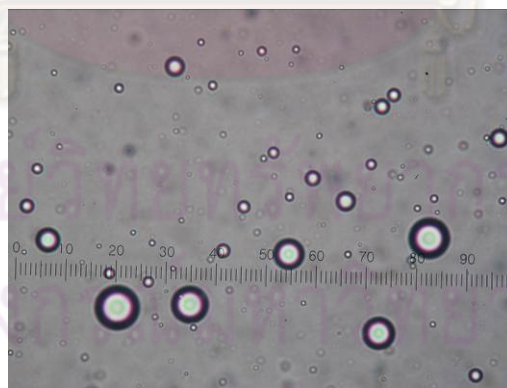
ภาคผนวก ข-2 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลาง



(ก) โคอะเลสเซอร์แบบทั่วไป



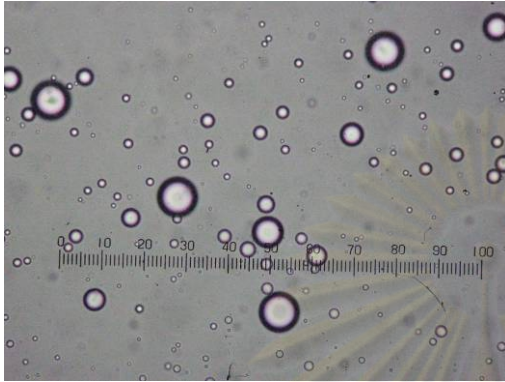
(ข) โคอะเลสเซอร์แบบขั้นตอน



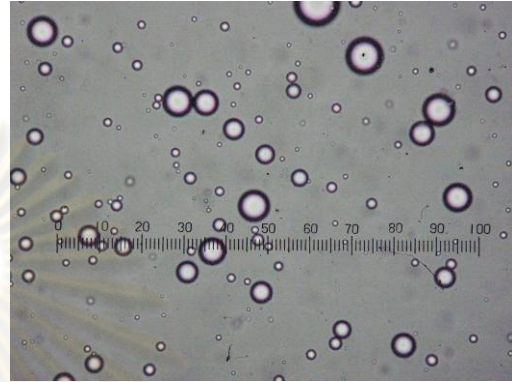
(ค) โคอะเลสเซอร์แบบเติมสารเคมี

ภาคผนวก ข (ต่อ)

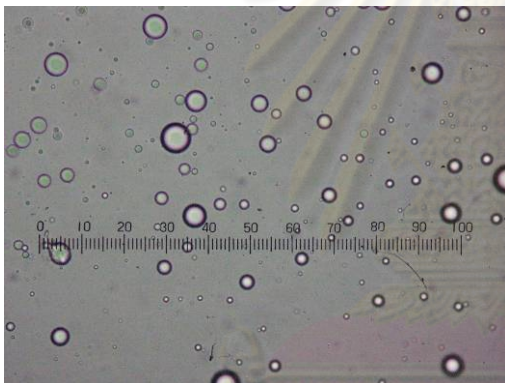
ภาคผนวก ข-3 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา หน้า 3.5 ซม. ที่เวลาต่างๆ



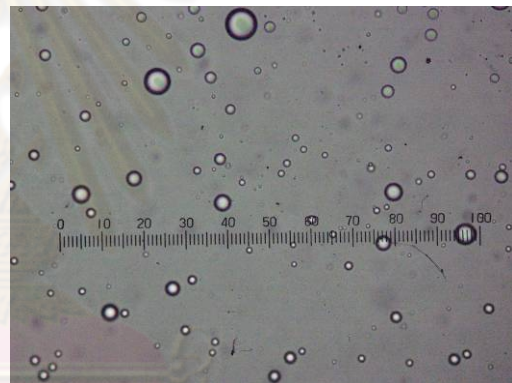
(ก) 0 นาที



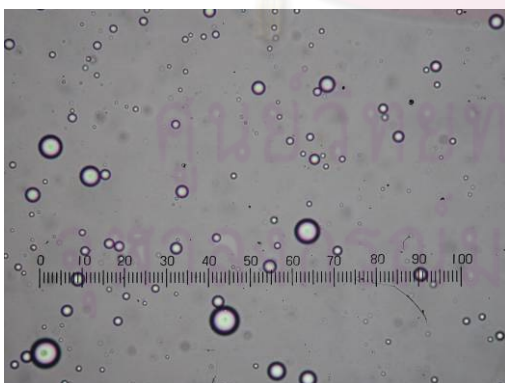
(ข) 5 นาที



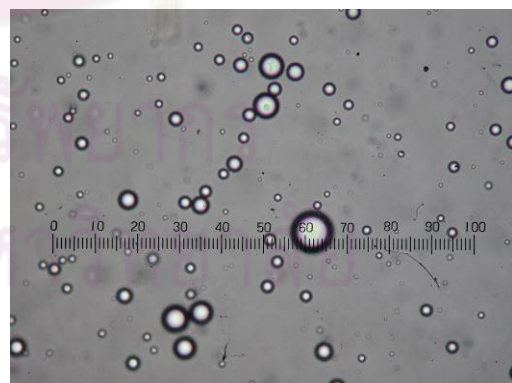
(ค) 10 นาที



(ง) 20 นาที



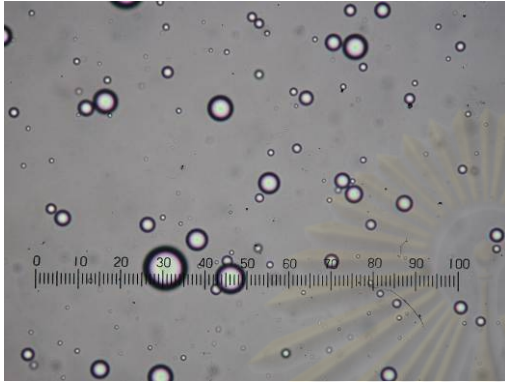
(จ) 45 นาที



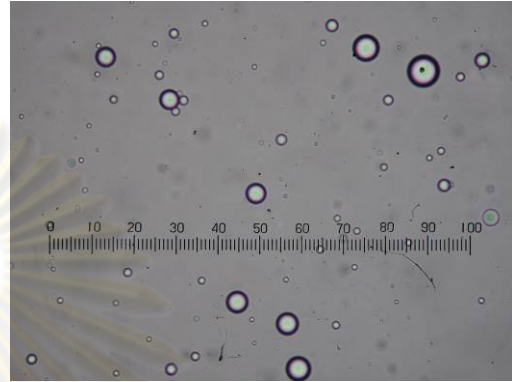
(ฉ) 90 นาที

ภาคผนวก ข (ต่อ)

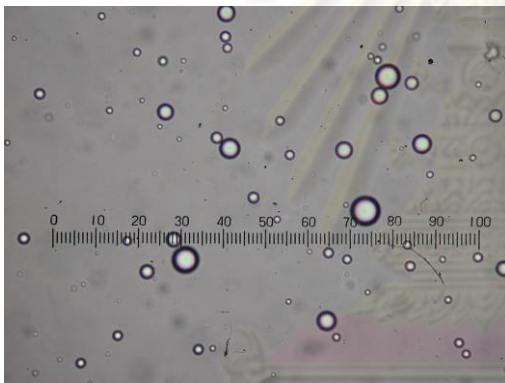
ภาคผนวก ข-4 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาที่วางแบบขั้นตอน 2 ชั้น ที่เวลาต่างๆ



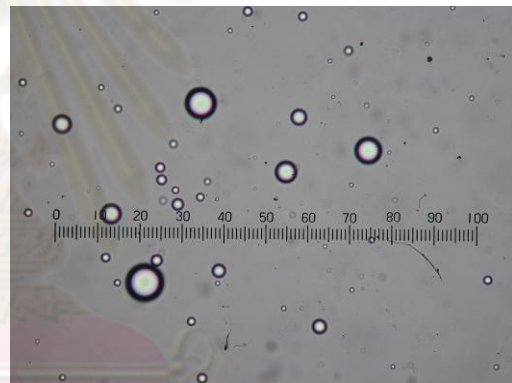
(ก) 0 นาที



(ข) 5 นาที



(ค) 10 นาที



(ง) 20 นาที



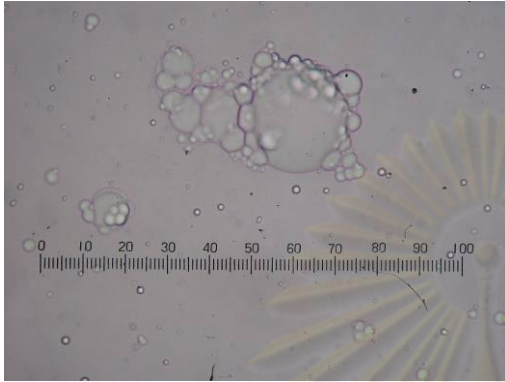
(จ) 45 นาที



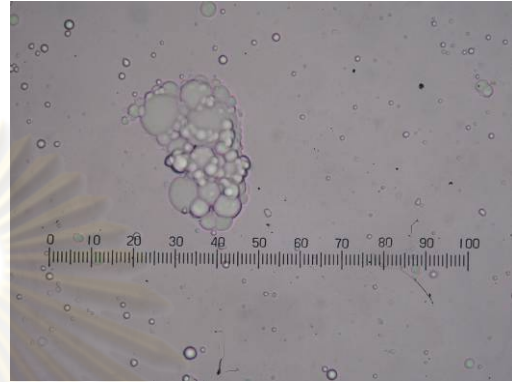
(ฉ) 90 นาที

ภาคผนวก ข (ต่อ)

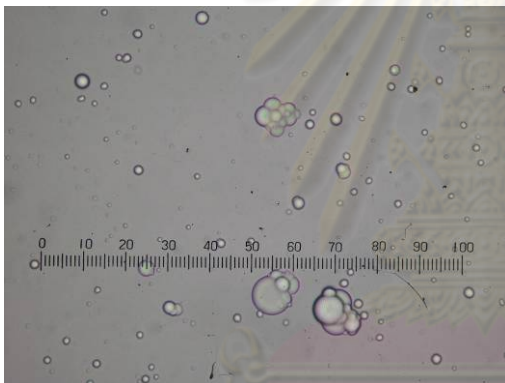
ภาคผนวก ข-5 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร ที่เวลาต่างๆ



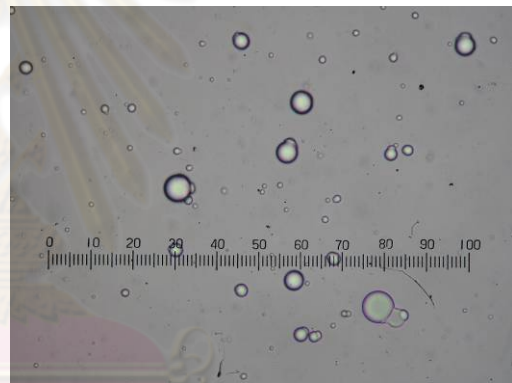
(ก) 0 นาที



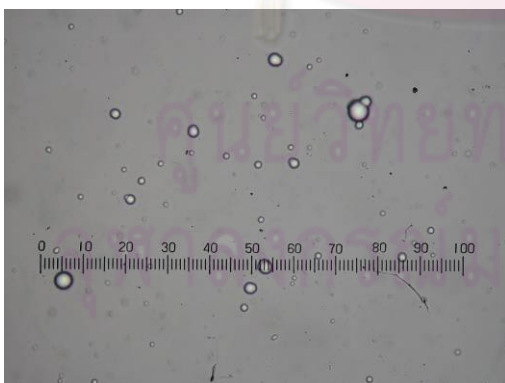
(ข) 5 นาที



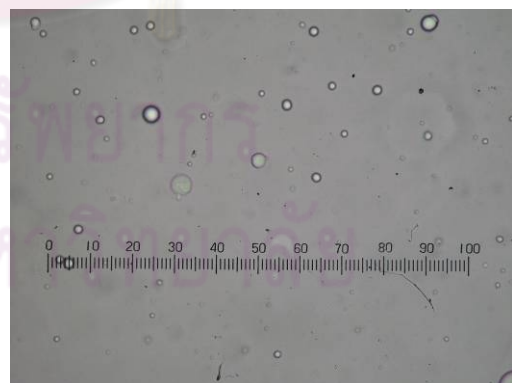
(ค) 10 นาที



(ง) 20 นาที



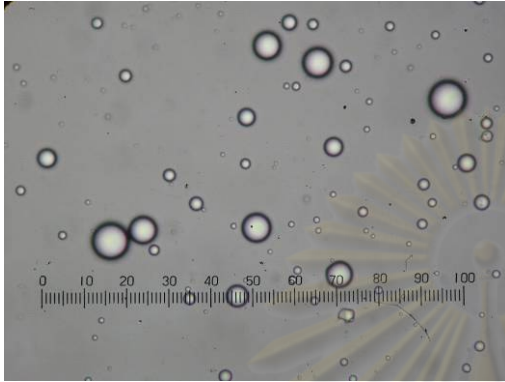
(จ) 45 นาที



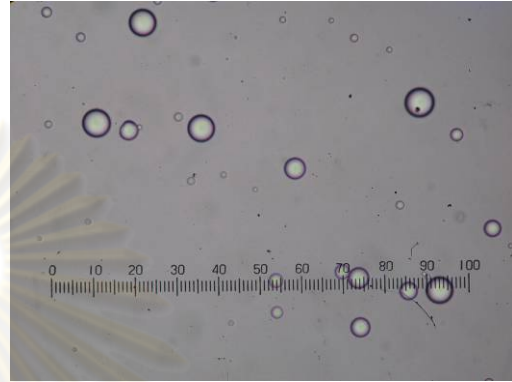
(ฉ) 90 นาที

ภาคผนวก ข (ต่อ)

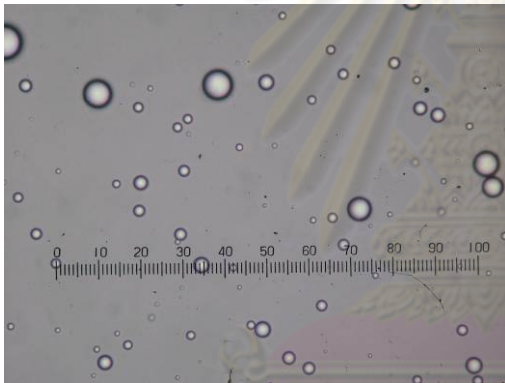
ภาคผนวก ข-6 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เส้นใยกรองน้ำตู้ปลาที่มีการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ที่เวลาต่างๆ



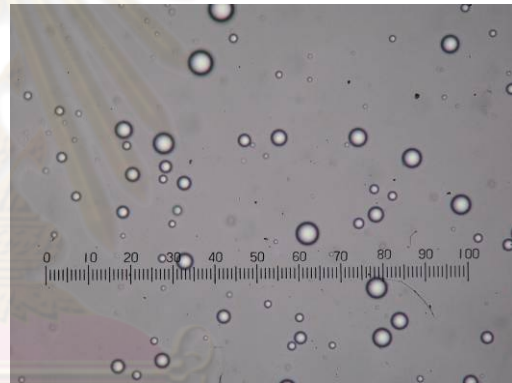
(ก) 0 นาที



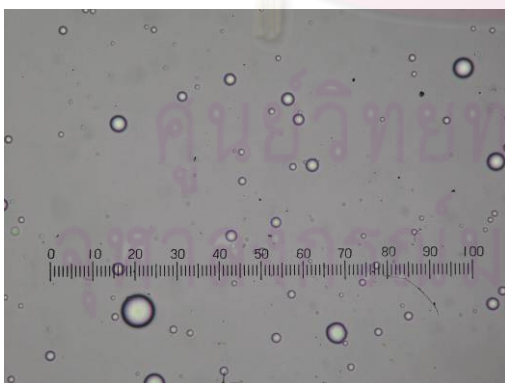
(ข) 5 นาที



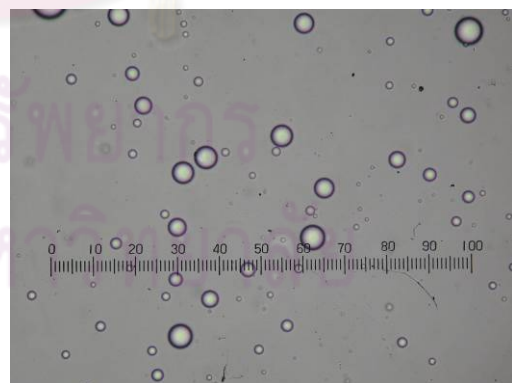
(ค) 10 นาที



(ง) 20 นาที



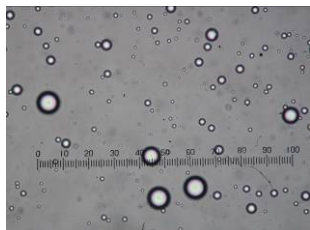
(จ) 45 นาที



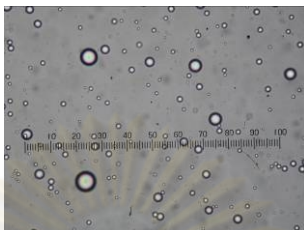
(ฉ) 90 นาที

ภาคผนวก ข (ต่อ)

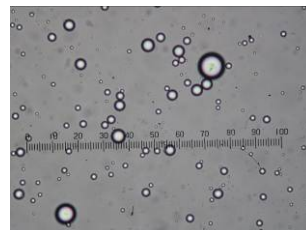
ภาคผนวก ข-7 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่เวลาต่างๆ



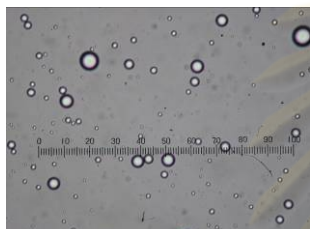
(ก) 0 นาที



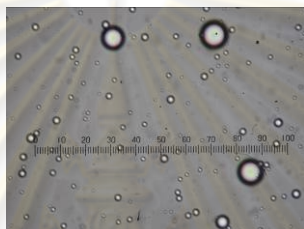
(ข) 10 นาที



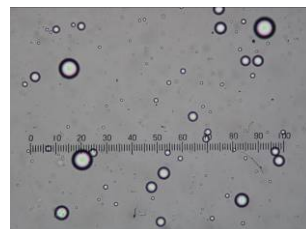
(ค) 30 นาที



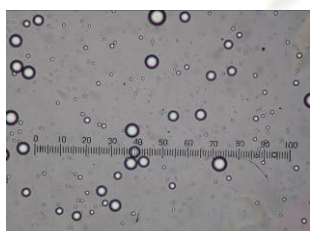
(ง) 60 นาที



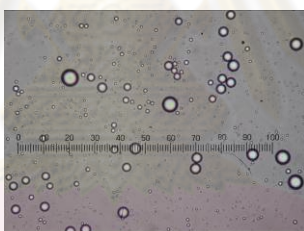
(จ) 120 นาที



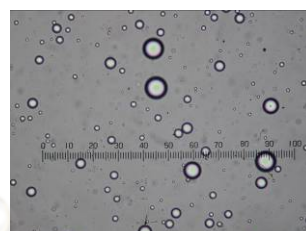
(ฉ) 180 นาที



(ช) 240 นาที



(ซ) 300 นาที

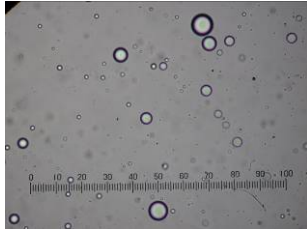


(ฅ) 360 นาที

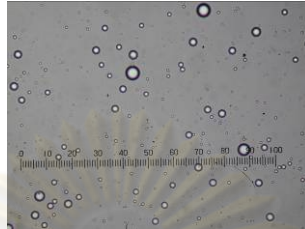
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

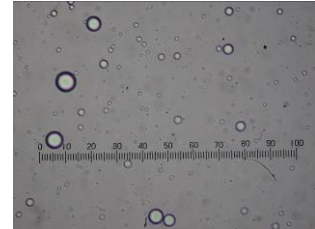
ภาคผนวก ข-8 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบ
ชั้นตอน 2 ชั้น และเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่เวลาต่างๆ



(ก) 0 นาที



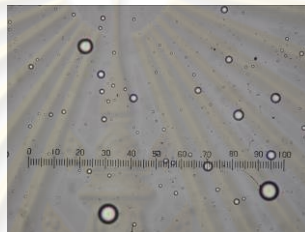
(ข) 10 นาที



(ค) 30 นาที



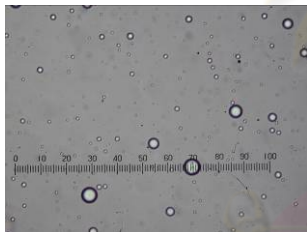
(ง) 60 นาที



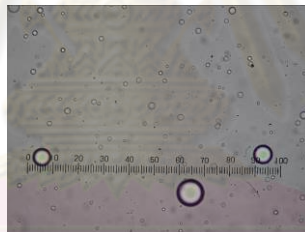
(จ) 120 นาที



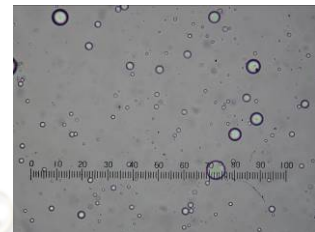
(ฉ) 180 นาที



(ช) 240 นาที



(ซ) 300 นาที

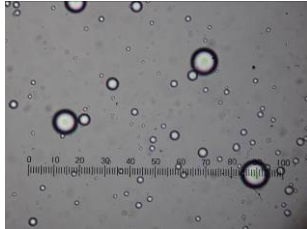


(ฌ) 360 นาที

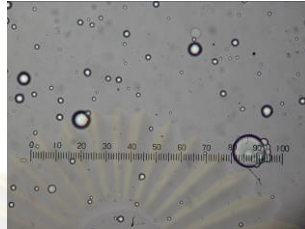
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ภาคผนวก ข-9 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร และเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่เวลาต่างๆ



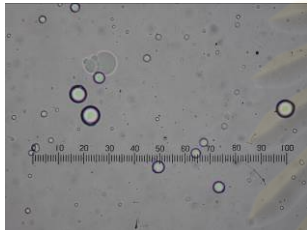
(ก) 0 นาที



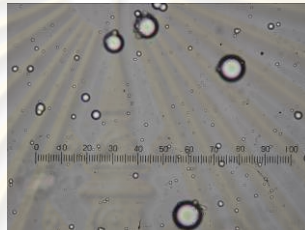
(ข) 10 นาที



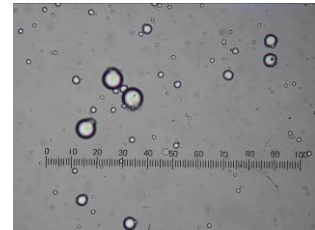
(ค) 30 นาที



(ง) 60 นาที



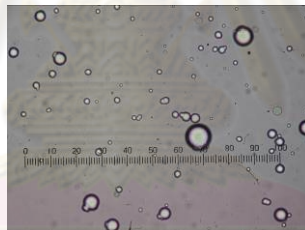
(จ) 120 นาที



(ฉ) 180 นาที



(ช) 240 นาที



(ซ) 300 นาที

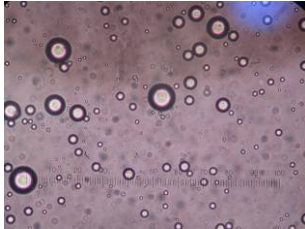


(ณ) 360 นาที

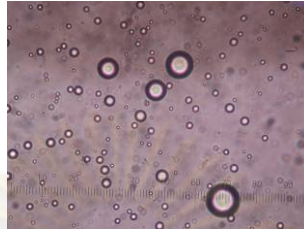
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

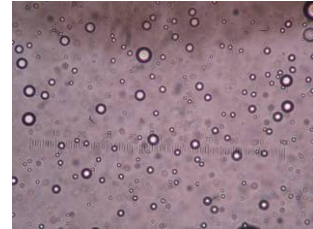
ภาคผนวก ข-10 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันในน้ำที่บำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF และเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่เวลาต่างๆ



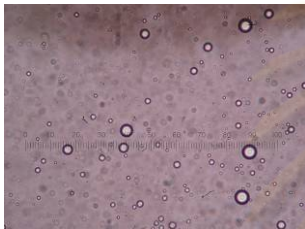
(ก) 0 นาที



(ข) 10 นาที



(ค) 30 นาที



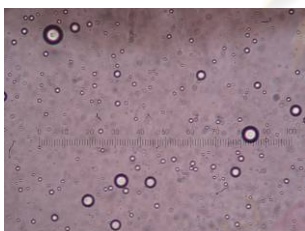
(ง) 60 นาที



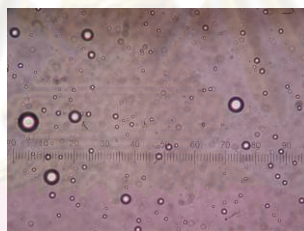
(จ) 120 นาที



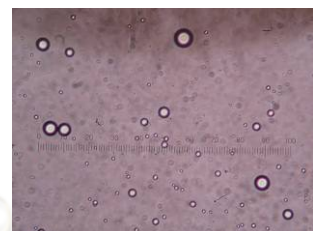
(ฉ) 180 นาที



(ช) 240 นาที



(ซ) 300 นาที



(ฌ) 360 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

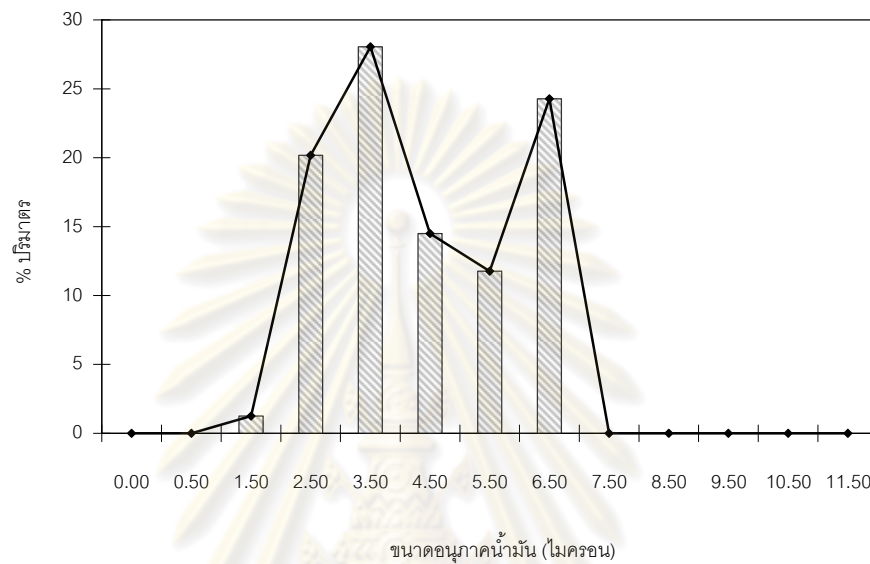


ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

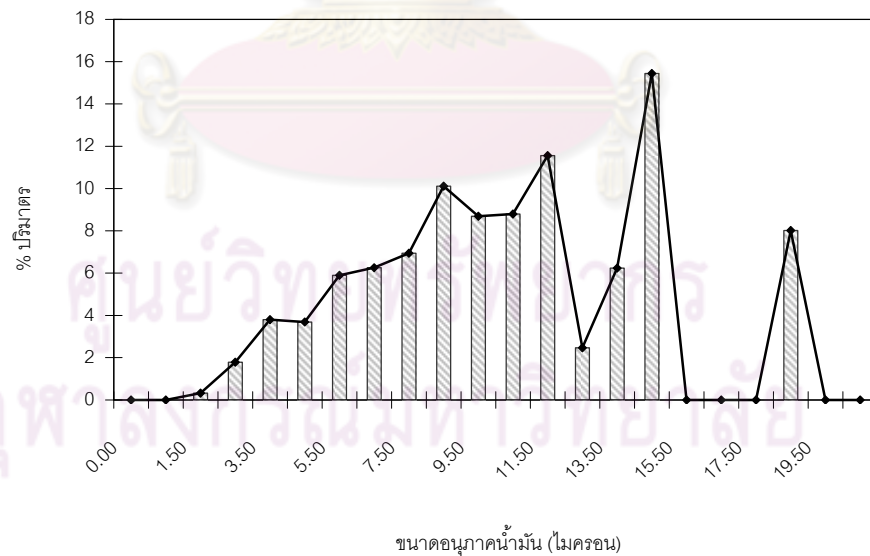
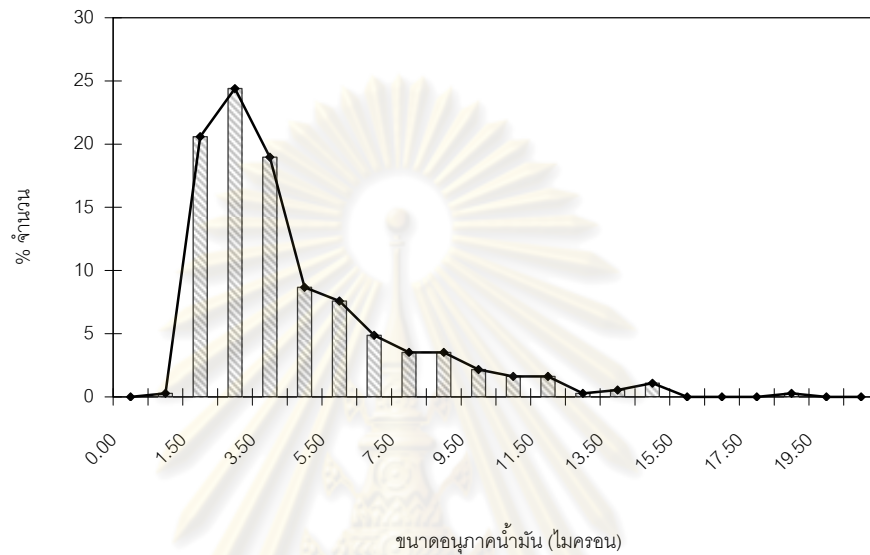
ภาคผนวก ค-1 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยปริมาตรของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย
สังเคราะห์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

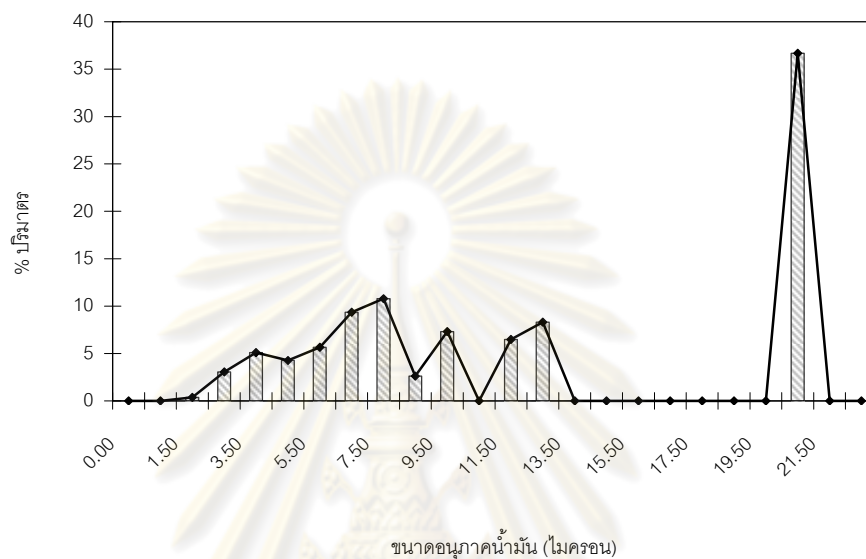
ภาคผนวก ค (ต่อ)

ภาคผนวก ค-2 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยจำนวน และโดยปริมาตรของขนาดอนุภาค
น้ำมันในน้ำหลังตกตะกอน (ไม่ผ่านตัวกลาง)



ภาคผนวก ค (ต่อ)

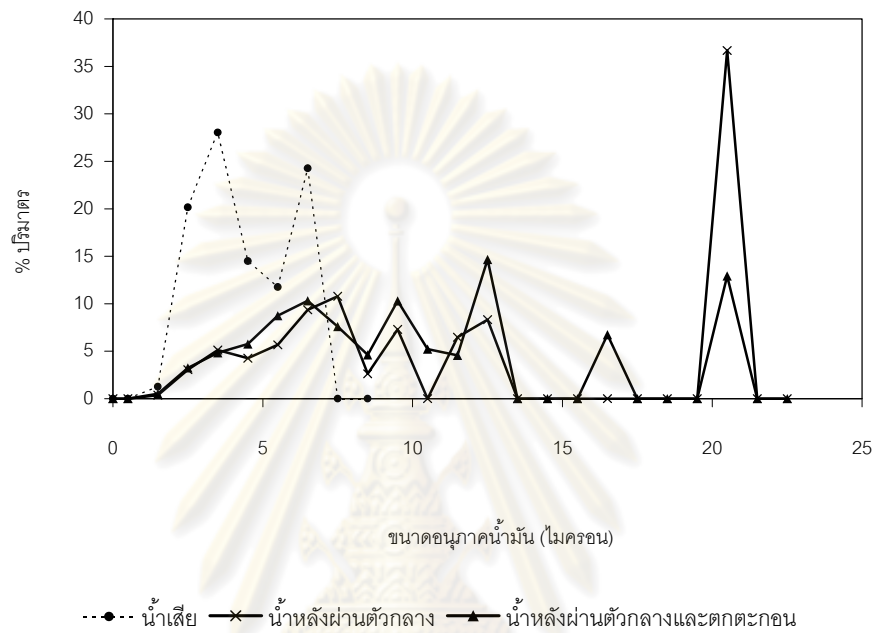
ภาคผนวก ค-3 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยปริมาตรของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค (ต่อ)

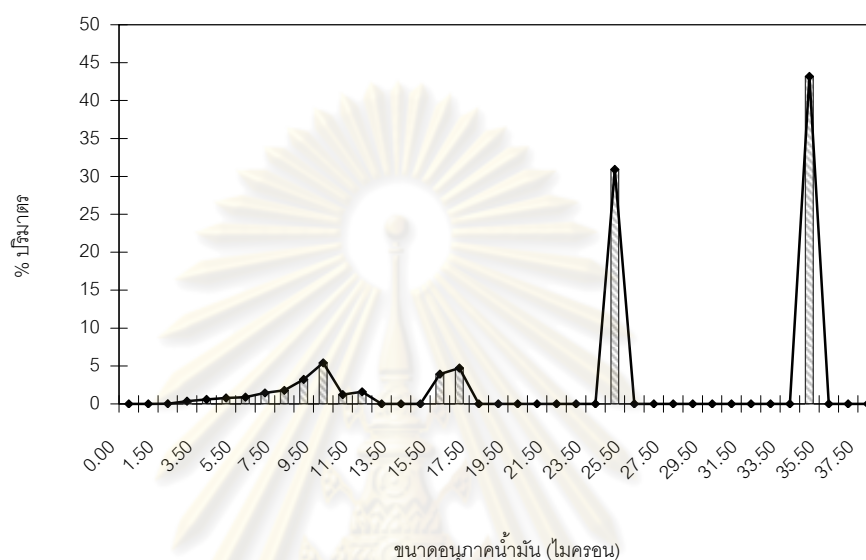
ภาคผนวก ค-4 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยปริมาตรของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลาหนา 3.5 ซม. และตกตะกอน 90 นาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค (ต่อ)

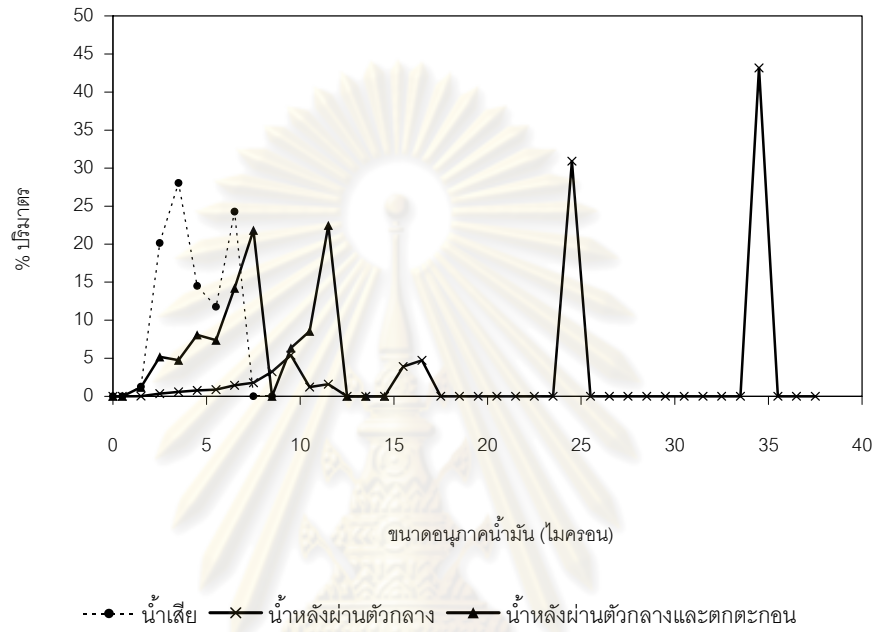
ภาคผนวก ค-5 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยปริมาตรของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค (ต่อ)

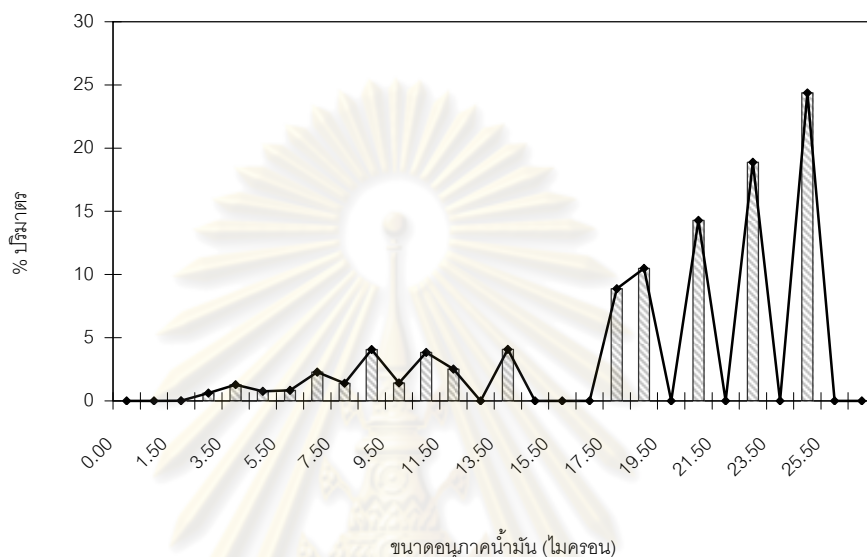
ภาคผนวก ค-6 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยปริมาตรของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลางแบบขั้นตอน 2 ชั้น และตกตะกอน 90 นาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค (ต่อ)

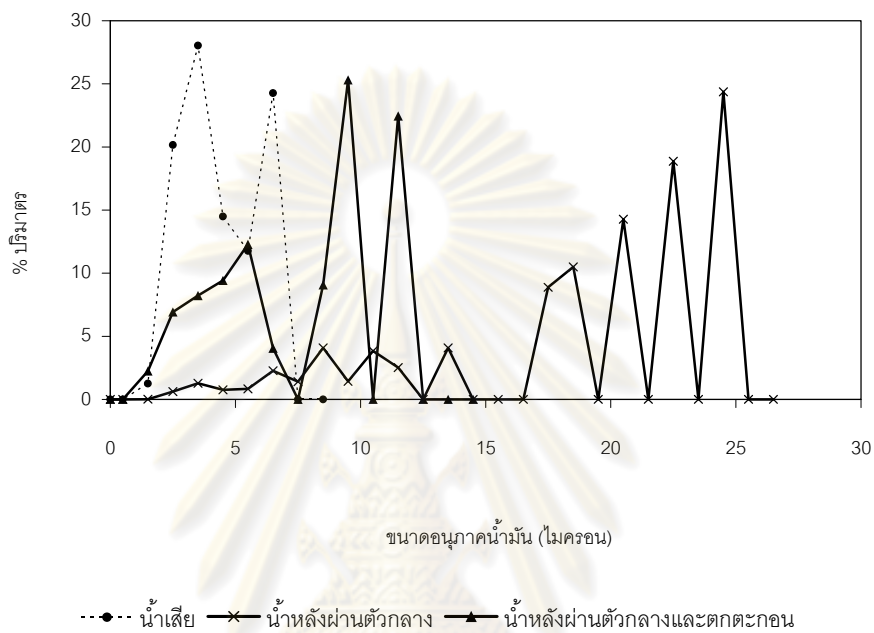
ภาคผนวก ค-7 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยปริมาตรของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค (ต่อ)

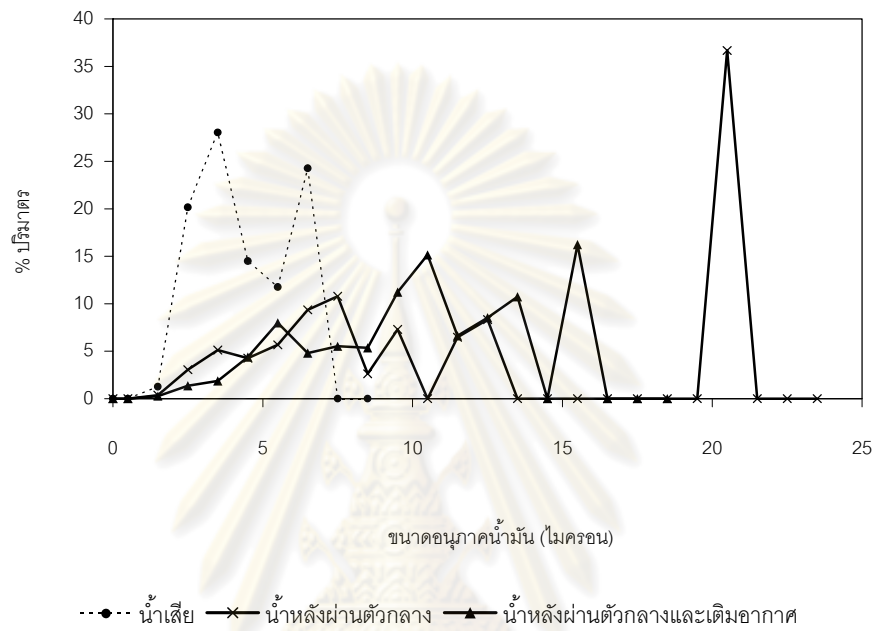
ภาคผนวก ค-8 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยปริมาตรของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านโคอะเลสเซอร์ที่มีการเติมสารส้ม 0.4 กรัม/ลิตร และตกตะกอน 90 นาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ภาคผนวก ค-9 กราฟเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวโดยปริมาตรของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำหลังผ่านตัวกลาง และเติมอากาศ 0.025 ลิตร/นาที นาน 90 นาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชกร ก้องกังวาลย์ เกิดวันที่ 16 กรกฎาคม 2524 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2547 หลังจากนั้นทำงานในตำแหน่งวิศวกรชลศาสตร์เป็นเวลา 2 ปี ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย