

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยา
แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก



นายนวนตล ทองตาล่วง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Treatment of oily wastewater by electrocoagulation-flotation process in bubble
column reactor and airlift reactor

Mr. Nawadol Thongtaluang



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการรวม
ตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบ
ฟองอากาศและแบบอากาศยก

โดย

นายนวดล ทองตาล่วง

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. ญัฐวิญญ์ ขวเลิศพรศิยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิขิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. ญัฐวิญญ์ ขวเลิศพรศิยา)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. มรุตพัชร จำนงค์วงศ์)

นวดล ทองตาล่วง : การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก (Treatment of oily wastewater by electrocoagulation-flotation process in bubble column reactor and airlift reactor) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ญัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา, 192 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้า ได้แก่ รูปแบบของขั้วไฟฟ้า (แผ่น แผ่นเจาะรู แท่ง และเกลียว) ชนิดของขั้วไฟฟ้า (อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และไทเทเนียม) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (1, 2 และ 3 เซนติเมตร) ค่ากระแสไฟฟ้า (0.75, 1.00 และ 1.25 แอมแปร์) และรูปแบบถังปฏิกริยาที่เหมาะสมระหว่างถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble Column Reactor, BCR) และถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air-Lift Reactor, ALR) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร โดยการเดินระบบแบบทีละเท และนำสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมไปทดสอบในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง จากการทดลองพบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสมคือ ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอะลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น วางขั้วไฟฟ้าห่างกัน 2 เซนติเมตร เดินระบบที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เนื่องจากให้อัตราการไหลของฟองอากาศสูงที่สุด 0.82 มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 120 นาที จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดในถังปฏิกริยาแบบ BCR และ ALR พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดีที่ใกล้เคียงกัน (ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์) ในทุกความเข้มข้นของน้ำมัน โดยถังปฏิกริยาแบบ ALR ใช้เวลาในการบำบัดมากกว่าถังปฏิกริยาแบบ BCR เนื่องจากในถังปฏิกริยาแบบ ALR มีปริมาตรน้ำเสียมากกว่า โดยมีปริมาตร 28 ลิตร ขณะที่ถังปฏิกริยาแบบ BCR มีปริมาตร 25 ลิตร จึงต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น จากการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องและรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัด เวลาพัก และรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ ไม่แตกต่างกัน โดยมีรูปแบบการไหลตามแนวท่อต่ออนุกรมกับการไหลแบบที่มีการกวนสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามถังปฏิกริยาแบบ ALR มีข้อได้เปรียบจากตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่า จึงมีแนวโน้มในการประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับกำจัดตะกอนหากนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ณัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้โอกาสคำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จจุล่งด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล รองศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และ ดร. มรุตพร จำนงค์วงศ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ และตรวจสอบเพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาอบรมและถ่ายทอดความรู้อันมีคุณค่ายิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการให้ความรู้ คำปรึกษา กำลังใจ รวมไปถึงความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนงานวิจัยสามารถสำเร็จจุล่งด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ที่ดูแล สนับสนุน และให้โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การจำแนกประเภทน้ำมันและไขมัน	5
2.1.1 ไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา (Light hydrocarbon)	5
2.1.2 ไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก (Heavy hydrocarbon)	5
2.1.3 น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันหล่อเย็น (Cutting fluid).....	5
2.1.4 น้ำมันและไขมันจากพืชและสัตว์.....	5
2.2 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ.....	5
2.2.1 น้ำมันละลายน้ำ.....	5
2.2.2 น้ำมันเป็นชั้นฟิล์มลอยบนผิวน้ำ	6
2.2.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว	6
2.2.4 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว	7

2.3 สารลดแรงตึงผิว	8
2.3.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactants)	9
2.3.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactants).....	9
2.3.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactants).....	9
2.3.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric surfactants)	9
2.4 อิมัลชัน (Emulsion).....	10
2.4.1 อิมัลชันตรง (Direct emulsion)	10
2.4.2 อิมัลชันผกผัน (Inverse emulsion)	10
2.5 น้ำมันตัด (Cutting oil)	11
2.5.1 ประเภทผสมกับน้ำ (Emulsifiable cutting oils).....	12
2.5.2 ประเภทน้ำมันล้วน หรือน้ำมัน 100% (Neat cutting oils).....	12
2.6 กระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย	13
2.6.1 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological processes).....	13
2.6.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical processes).....	13
2.6.3 กระบวนการทางกายภาพเคมี (Physico-Chemical processes).....	13
2.6.4 กระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemistry processes).....	15
2.7 โคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and Flocculation).....	15
2.7.1 โคแอกกูเลชัน (Coagulation).....	15
2.7.2 ฟล็อกคูเลชัน (Flocculation).....	17
2.7.3 การทดลองจาร์เทสต์ (Jar test)	18
2.8 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation).....	18
2.8.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	19
2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	20

2.9	ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยาน (Airlift reactor).....	22
2.9.1	ประเภทของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยาน	23
2.9.2	ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics).....	24
2.10	การศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution, RTD).....	27
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
2.11.1	กระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	29
2.11.2	กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า.....	31
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	43
3.1.1	การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง.....	43
3.1.2	วัสดุอุปกรณ์.....	45
3.1.3	รายการสารเคมี.....	46
3.2	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์.....	47
3.3	วิธีดำเนินการวิจัย	48
3.3.1	ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นและความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยสารโคแอกกูแลนต์โดยวิธีจาร์เทสต์	50
3.3.2	ศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการไหลของอากาศ.....	52
3.3.3	ศึกษารูปแบบถังปฏิกรณ์ต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า.....	57
3.3.4	ศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์.....	58
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์.....	61
4.1	การศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นและความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยสารโคแอกกูแลนต์โดยวิธีจาร์เทสต์.....	61
4.1.1	ลักษณะและองค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและ น้ำมันปาล์ม.....	61

4.1.2	ศึกษาความสามารถในการทำลายเสถียรภาพโดยวิธีจาร์เทสต์	63
4.2	การศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองต่ออัตราการไหลของอากาศ.....	66
4.2.1	การคัดกรองรูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม	66
4.2.1.1	ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่น	66
4.2.1.2	ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรู.....	67
4.2.1.3	ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแท่ง.....	70
4.2.1.4	ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบเกลียว	70
4.2.2	ศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟองอากาศระหว่างเดินระบบและชนิดของขั้วไฟฟ้า.....	73
4.2.2.1	พฤติกรรมการเกิดฟองอากาศ	73
4.2.2.2	ชนิดของขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการไหลของอากาศ	76
4.3	การศึกษารูปแบบถังปฏิกิริยาต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า	78
4.3.1	รูปแบบของถังปฏิกิริยาที่เหมาะสม.....	78
4.3.1.1	กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบ ฟองอากาศ	78
4.3.1.2	กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบ อากาศยก 85	
4.3.1.3	การเปรียบเทียบกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถัง ปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก	91
4.4	การเดินระบบแบบต่อเนื่องและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยา	102
4.4.1	การเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	102
	ในการทดลองนี้เลือกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดเป็นตัวแทนในการ	102
4.4.2	ศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยา	107
	ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบ อากาศยกจากการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	107

4.4.2.1 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศ.....	107
4.4.2.2 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก.....	110
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	117
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	117
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	119
รายการอ้างอิง.....	121
ภาคผนวก.....	126
ภาคผนวก ก การศึกษาความสามารถในการทำลายเสถียรภาพด้วยวิธีจาร์เทสต์.....	127
ภาคผนวก ข การศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองต่ออัตราการไหลของอากาศ.....	131
ภาคผนวก ค การศึกษารูปแบบถังปฏิกรณ์ต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า.....	144
ภาคผนวก ง การเดินระบบแบบต่อเนื่องและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์.....	181
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	192

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 การจำแนกอิมัลชันตามขนาดของสารกระจาย (อนุภาคน้ำมัน).....	11
ตารางที่ 2-2 สภาพความเป็นกรดต่างของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	21
ตารางที่ 2-3 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	21
ตารางที่ 2-4 ข้อดีและข้อเสียของถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก	23
ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาระบบการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา	40
ตารางที่ 3-1 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีการวิเคราะห์.....	47
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน....	50
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรในการศึกษาปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม.....	51
ตารางที่ 3-4 พื้นที่ทำปฏิกิริยาและพื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นเจาะรู	53
ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม	54
ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	56
ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบของถังปฏิกิริยาที่เหมาะสม	57
ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง	58
ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยา.....	60
ตารางที่ 4-1 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม.....	62
ตารางที่ 4-2 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจากการเติมสารส้มในปริมาณที่เหมาะสมของชุดการทดลองน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม	65
ตารางที่ 4-3 พื้นที่ทำปฏิกิริยาและพื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นเจาะรู	69
ตารางที่ 4-4 อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด	72
ตารางที่ 4-5 ค่าพีเอชของน้ำในระบบและอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ หลังจากการเดินระบบ 120 นาที	75

ตารางที่ 4-6 ค่าพีเอชของน้ำในระบบและอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียม แกรไฟต์ และไทเทเนียมรูปแบบต่างๆ หลังจากการเดินระบบ 120 นาที่.....	77
ตารางที่ 4-7 ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) และระยะเวลาในการบำบัด (t_{rxn}) ที่น้ำมันตัดความเข้มข้น ต่างๆ.....	82
ตารางที่ 4-8 ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) และระยะเวลาในการบำบัด (trxn) ที่น้ำมันตัดความเข้มข้น ต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก.....	89
ตารางที่ 4-9 เปรียบเทียบค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) และระยะเวลาในการบำบัด (trxn) ที่น้ำมันตัด ความเข้มข้นต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก	96
ตารางที่ 4-10 อัตราการไหลของน้ำขาเข้าของถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกจาก การคำนวณด้วยระยะเวลาที่ความเข้มข้นน้ำมันต่าง ๆ.....	102
ตารางที่ 4-11 ปริมาณน้ำมันที่เข้าระบบต่อชั่วโมง (Oil loading) ที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า และความเข้มข้นของน้ำมันตัดต่างๆ.....	104
ตารางที่ 4-12 ปริมาณและอัตราการเกิดตะกอนในระบบของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 รูปแบบ ที่ความ เข้มข้นน้ำมันตัดต่าง ๆ	106
ตารางที่ 4-13 ระยะเวลาที่กักเฉลี่ยและระยะเวลาที่กักจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน น้ำมันของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 รูปแบบ	115
ตารางที่ 4-14 ตัวแปรการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวม ตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก ปริมาตร 28 ลิตร.....	116
ตารางที่ 5-1 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสีย ปนเปื้อนน้ำมัน.....	118

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 การผลักรันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากผลของสารลดแรงตึงผิว.....	7
รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ	7
รูปที่ 2-3 การเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม.....	8
รูปที่ 2-4 โครงสร้างพื้นฐานของสารลดแรงตึงผิว	8
รูปที่ 2-5 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวจำแนกตามประจุของส่วนหัว (Hydrophilic).....	9
รูปที่ 2-6 ลักษณะของอิมัลชัน	10
รูปที่ 2-7 ประเภทของอิมัลชัน.....	10
รูปที่ 2-8 การใช้น้ำมันตัดในอุตสาหกรรมตัดกลึงโลหะ	11
รูปที่ 2-9 ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด.....	12
รูปที่ 2-10 ผลของการเติมอ็อกซิเจนที่มีประจุบวกให้กับคอลลอยด์ ก่อนเติมอ็อกซิเจน (ก) และหลังเติม อ็อกซิเจน (ข).....	16
รูปที่ 2-11 กลไกการบำบัดมลสารด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	19
รูปที่ 2-12 บริเวณภายในของถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก	22
รูปที่ 2-13 ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายใน (ก) และถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก ที่มีการไหลเวียนภายนอก (ข).....	23
รูปที่ 2-14 ขอบเขตการไหลจากการพิจารณาหลักการเกิดของฟองอากาศ	26
รูปที่ 2-15 รูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาที่มีการไหลแบบอุดมคติ (ก) และการไหลตามความเป็น จริง (ข).....	27
รูปที่ 2-16 รูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาเนื่องจากการเกิด Dead zone (ก) Short circuit (ข) Channeling (ค) และ Recirculation (ง).....	27
รูปที่ 2-17 วิธีการวิเคราะห์การกระจายตัวของเวลากักของเหลว.....	28
รูปที่ 2-18 ชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์ปีกโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วย ไฟฟ้า.....	31

รูปที่ 2-19 ชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	33
รูปที่ 2-20 ชุดการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นเจาะรู	34
รูปที่ 2-21 ชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นปิโตรเลียมโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 2-22 ชุดการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบแท่ง	37
รูปที่ 2-23 ชุดการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก ที่มี การไหลเวียนภายนอก	38
รูปที่ 2-24 ชุดการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเกลียว-แท่ง.....	39
รูปที่ 3-1 แผนผังแสดงการจัดเตรียมชุดอุปกรณ์ในการศึกษาผลของขั้วไฟฟ้า ต่อตัวแปรทาง อุทกพลศาสตร์	43
รูปที่ 3-2 แผนผังแสดงการจัดเตรียมชุดอุปกรณ์ในการทดลองกระบวนการรวมตะกอนและการ ทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (ก) และแบบอากาศยก (ข).....	44
รูปที่ 3-3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	49
รูปที่ 3-4 แผนผังการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน น้ำมัน	50
รูปที่ 3-5 แผนผังการศึกษาปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ.....	51
รูปที่ 3-6 การออกแบบขั้วไฟฟ้า	52
รูปที่ 3-7 แผ่นเจาะรูที่ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร (ก) 1.5 เซนติเมตร (ข) และ 3 เซนติเมตร (ค).....	52
รูปที่ 3-8 ขั้วไฟฟ้าแบบแท่งที่ใช้ในการทดลอง	53
รูปที่ 3-9 ขั้วไฟฟ้าแบบเกลียวที่ความยาว 68 เซนติเมตร (ก) และ 53 เซนติเมตร (ข).....	54
รูปที่ 3-10 แผนผังการศึกษารูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม ต่ออัตราการ ไหลของอากาศ	55
รูปที่ 3-11 แผนผังการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการไหลของอากาศ	57

รูปที่ 3-12 แผนผังการศึกษาารูปแบบของถังปฏิกริยาที่เหมาะสม ต่อกระบวนการรวมตะกอนและ ทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า.....	58
รูปที่ 3-13 แผนผังการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องของกระบวนการรวมตะกอน และทำให้ ลอยด้วยไฟฟ้า	59
รูปที่ 3-14 แผนผังการศึกษาารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศ ยก	60
รูปที่ 4-1 ขนาดอนุภาคน้ำมันตัด (ก) และน้ำมันปาล์ม (ข) ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น	62
รูปที่ 4-2 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสีย ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัม ต่อลิตร (ค)	64
รูปที่ 4-3 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้าารูปแบบแผ่นภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ	66
รูปที่ 4-4 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้าารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร (ก) 2 เซนติเมตร (ข) และ 3 เซนติเมตร (ค) ภายใต้สภาวะการทดลอง ต่างๆ	68
รูปที่ 4-5 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้าารูปแบบแท่งภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ.....	70
รูปที่ 4-6 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้าารูปแบบเกลียว (แคโทด) และรูปแบบแท่ง (แอโนด) ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร (ก) และ 2 เซนติเมตร (ข) ภายใต้ สภาวะการทดลองต่าง ๆ	71
รูปที่ 4-7 อัตราการไหลของอากาศ (ก) อุณหภูมิของน้ำในระบบเมื่อทำการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้า รูปแบบต่างๆ (ข) และความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลว (ค)	74
รูปที่ 4-8 อัตราการไหลของอากาศ (ก) และอุณหภูมิของน้ำในระบบ เมื่อทำการทดลองด้วย ขั้วไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ (ข).....	76
รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการ รวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศที่ความเข้มข้น น้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)	79

รูปที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค).....	80
รูปที่ 4-11 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) ของปฏิกรณ์อันดับหนึ่ง	81
รูปที่ 4-12 ความหนาของชั้นตะกอนระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค).....	83
รูปที่ 4-13 ค่าพีเอชของน้ำในระบบระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก)..	85
รูปที่ 4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)	86
รูปที่ 4-15 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค).....	87
รูปที่ 4-16 ความหนาของชั้นตะกอนระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค).....	90
รูปที่ 4-17 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศและแบบพองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค).....	93
รูปที่ 4-18 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศและแบบพองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค).....	94

รูปที่ 4-19 ความหนาของชั้นตะกอนระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)	98
รูปที่ 4-20 อัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้าหลังการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่ความเข้มข้นน้ำมัน ..	100
รูปที่ 4-21 การเปลี่ยนแปลงความใสของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันและชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเริ่มต้นเดินระบบ (ก) ระหว่างการเดินระบบ (ข) และสิ้นสุดการเดินระบบ (ค).....	101
รูปที่ 4-22 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค).....	103
รูปที่ 4-23 การเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นน้ำมันและอัตราการไหลของน้ำขาเข้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดและระยะเวลาที่ที่เหมาะสม ที่ปริมาณน้ำมันเข้าระบบประมาณ 10 กรัมต่อชั่วโมง.....	105
รูปที่ 4-24 ตำแหน่งการติดตามค่าความนำไฟฟ้าบริเวณ (ก) ทางน้ำเข้าและ (ข) ทางน้ำออก	107
รูปที่ 4-25 สัดส่วนความเข้มข้นของสารติดตาม หรือ E(t) ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 15 ลิตรต่อชั่วโมง (ก) และ 25 ลิตรต่อชั่วโมง (ข).....	109
รูปที่ 4-26 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศขณะเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า	110
รูปที่ 4-27 ตำแหน่งการติดตามค่าความนำไฟฟ้าบริเวณทางน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ (ก)	111
รูปที่ 4-28 สัดส่วนความเข้มข้นของสารติดตาม หรือ E(t) ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 14 ลิตรต่อชั่วโมง (ก) และ 21 ลิตรต่อชั่วโมง (ข).....	113
รูปที่ 4-29 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกขณะเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า.....	114

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมที่ทวีความรุนแรงขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งสามารถจำแนกแหล่งกำเนิดของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ 2 แหล่ง คือ จากภาคอุตสาหกรรม เช่น ในขั้นตอนการตัด หล่อเย็น และขึ้นรูปโลหะโดยใช้น้ำมันตัด (Cutting oil) ซึ่งเป็นน้ำมันที่ใช้ในการหล่อลื่น หรือเพื่อลดความร้อนและการเสียดทานขณะการตัดเฉือนโลหะ โดยมีสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบในการช่วยผสมน้ำมันให้เข้ากับน้ำจึงทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก (1-2 ไมครอน) และมีความคงตัวสูงเพื่อให้แทรกซึมเข้าสู่ผิวโลหะได้ดี และจากภาคชุมชน เช่น กิจกรรมซักล้างภายในครัวเรือน หรือการประกอบอาหารโดยใช้น้ำมันปาล์ม (Palm oil) ซึ่งผลิตมาจากน้ำมันที่สกัดได้จากเนื้อปาล์ม (Mesocarp) มีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวมากกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ราคาถูกและหาได้ง่ายจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งก่อให้เกิดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีลักษณะเป็นอิมัลชัน และแยกออกจากน้ำได้ยาก ถ้าหากไม่มีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อทัศนียภาพและระบบนิเวศของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้

แนวทางในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียมีหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางเคมี กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เช่น กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation-flotation) เป็นหนึ่งในวิธีการแยกน้ำมันด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากดำเนินการง่าย ใช้พื้นที่น้อย และให้ประสิทธิภาพสูงโดยไม่ต้องเติมสารเคมี ซึ่งกระบวนการนี้อาศัยการให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าโดยจะเกิดการสึกกร่อนในขั้วแอโนด (Anode) เกิดเป็นไอออนโลหะไปทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน เพื่อให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำโดยการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากขั้วแคโทด (Cathode)

กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าสามารถดำเนินการได้ในถังปฏิริยาหลากหลายรูปแบบ เช่น ถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column reactor, BCR) และถังปฏิริยาแบบอากาศยก (Airlift reactor, ALR) ซึ่งเป็นถังปฏิริยาระหว่างก๊าซและของเหลวที่อาศัยการกวนผสมโดยการอัดอากาศที่เพียงพอเข้าไปในถังปฏิริยา โดยพื้นที่ภายในถังปฏิริยาแบบอากาศยกถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณที่แตกต่างกัน คือบริเวณที่มีการเติมอากาศและบริเวณที่ไม่มีการเติมอากาศ สัดส่วนของแก๊สที่แตกต่างกันระหว่าง 2 บริเวณ ส่งผลให้ความหนาแน่นของน้ำในแต่ละบริเวณแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำภายในถังปฏิริยา ซึ่งบริเวณที่น้ำและแก๊สมีการ

ไหลในทิศขึ้น เรียกว่าบริเวณไรเซอร์ (Riser) ในขณะที่บริเวณที่น้ำมีการไหลในทิศลง เรียกว่าบริเวณดาวนคัมเมอร์ (Downcomer) ถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายใน (Internal loop airlift reactor, ILALR) และถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายนอก (External loop airlift reactor, ELALR) ซึ่งมีข้อดีคือ โครงสร้างไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายต่อการออกแบบและดูแลรักษา ใช้พลังงานต่ำเนื่องจากใช้การอัดอากาศแทนการใช้ใบพัดในการกวนผสม เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการบำบัดของกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสีย เนื่องจากต้องใช้ปริมาณอ็อกซิเจนที่ละลายออกมาจากขั้วแอโนดจำนวนมากพอต่อปริมาณมลสารที่ต้องการกำจัด (สมพงษ์ ทิรัญมาศสุวรรณ, 2551) นอกจากนี้ปริมาณการเกิดฟองอากาศไฮโดรเจนที่จำกัดจากขั้วแคโทดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งฟองอากาศดังกล่าวจะช่วยทำให้มลสารที่รวมตัวเป็นตะกอนลอยตัวขึ้นสู่น้ำทำให้ง่ายต่อการกำจัด โดยในงานวิจัยของ Bensadok และคณะ (2008) ใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันตัดเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและความขุ่นของระบบลดลง และงานวิจัยของ Muftah และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียโดยเฉพาะความเข้มข้นของค่าซีโอดีมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับขั้วไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) ในการออกแบบขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการเดินระบบ เช่น เส้นรอบรูป การเจาะรู และจำนวนแผ่นของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา จำนวนฟองอากาศไฮโดรเจน และอัตราการไหลของก๊าซ

การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการศึกษาผลของปัจจัย (Factor) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) โดยการปรับตั้งค่าหรือเปลี่ยนระดับของปัจจัยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและประหยัดทรัพยากร โดยอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (บรรหาญ ลิลา, 2554) ซึ่งมีข้อดีคือ มีความรวดเร็วในการดำเนินการโดยสามารถศึกษาผลของหลายปัจจัยได้พร้อมกันในคราวเดียวด้วยวิธีการที่ใช้จำนวนในการทดลองน้อยกว่าการศึกษาที่ละปัจจัย มีความแม่นยำ และความถูกต้องสูงในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษากระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column reactor, BCR) ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์รูปแบบทั่วไป และถึงปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Airlift reactor, ALR) ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ทางเลือก โดยใช้รูปแบบชั่วไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียและเป็นกระบวนการทางเลือกใหม่สำหรับการประยุกต์ใช้น้ำเสียจริงในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของชั่วไฟฟ้าและสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมต่ออัตราการไหลของฟองอากาศ

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์เพื่ออธิบายกลไกที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยดำเนินงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มปนกวานกับน้ำประปา โดยมีความเข้มข้นของน้ำมัน 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร

1.3.2 ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ทำจากอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นคอลัมน์ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร และสูง 180 เซนติเมตร โดยเดินระบบแบบที่ละเท (Mongkolnauwarat, 2014)

1.3.3 กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าใช้ชนิดของชั่วไฟฟ้า 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม แกรไฟต์ และไทเทเนียม

1.3.4 รูปแบบของชั่วไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา 4 รูปแบบ คือ แบบแผ่น แบบแผ่นเจาะรู แบบแท่ง และแบบเกลียว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รูปแบบขั้วไฟฟ้าและถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

1.4.2 สามารถเข้าใจกลไกของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

1.4.3 ทราบความเป็นไปได้ที่จะนำกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

1.4.4 กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าจะเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การจำแนกประเภทน้ำมันและไขมัน

2.1.1 ไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา (Light hydrocarbon)

น้ำมันประเภทนี้ส่วนใหญ่มักพบในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ได้แก่

- น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดเบา เช่น น้ำมันเบนซิน และน้ำมันเครื่องบิน
- ตัวทำละลายในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม เช่น คลอโรฟอร์ม

(Chloroform) หรือเฮกเซน (Hexane) เป็นต้น

2.1.2 ไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก (Heavy hydrocarbon)

น้ำมันประเภทนี้ประกอบด้วยน้ำมันดิบ น้ำมันดีเซล หรือน้ำมันแอสฟัลท์ที่ใช้ในการลาดถนน เป็นต้น

2.1.3 น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันหล่อเย็น (Cutting fluid)

น้ำมันประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

- น้ำมันอิสระ เช่น น้ำมันหล่อลื่นและไขมันหล่อลื่นชนิดต่างๆ
- น้ำมันที่กลายเป็นอิมัลชันได้ เช่น น้ำมันตัด (Cutting oil) สบู่ และไขมัน

ต่างๆ

2.1.4 น้ำมันและไขมันจากพืชและสัตว์

น้ำมันและไขมันประเภทนี้ส่วนใหญ่มักพบในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตอาหารและวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันปลา หรือผลิตภัณฑ์เนย เป็นต้น

2.2 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ

2.2.1 น้ำมันละลายน้ำ

น้ำมันมีความสามารถในการละลายน้ำได้ ขึ้นอยู่กับ

- ค่าความเป็นขั้ว (Polarity) โดยน้ำมันสามารถละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อโมเลกุลมีความเป็นขั้วสูงขึ้น (Polarity) ทำให้ความไม่อิมิตัวสูงขึ้น น้ำมันจึงละลายน้ำได้ดีขึ้น

- น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) น้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ หรือ น้ำมันชนิดเบา จะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่าน้ำมันชนิดหนัก
 - ความสามารถในการระเหย (Volatility) น้ำมันสามารถระเหยได้ง่ายขึ้น เมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นด้วย
- จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่าน้ำมันชนิดเบา หรือน้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีความสามารถในการระเหยและละลายน้ำได้ดีกว่าน้ำมันชนิดหนัก

2.2.2 น้ำมันเป็นชั้นฟิล์มลอยบนผิวน้ำ

น้ำมันหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าน้ำ จึงทำให้น้ำมันลอยแยกชั้นเป็นลักษณะฟิล์มบางเหนือผิวน้ำ โดยฟิล์มเหล่านี้มีการเรียงตัวแบบโมเลกุลเดี่ยว (Monolayer) ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและการส่องผ่านของแสงไปยังน้ำ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของสัตว์น้ำ และการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ เป็นต้น

2.2.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิวจัดเป็นรูปแบบของอิมัลชันที่ไม่คงตัว (Non stabilized emulsion) คืออนุภาคอิมัลชันสามารถรวมตัวกันได้เองจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกัน และมีแนวโน้มที่จะกลับมาแยกชั้นอีกครั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการกระจาย (Degree of dispersion) หรือขนาดของอนุภาคน้ำมัน ดังนี้

- ถ้าอนุภาคน้ำมันลอยและกระจายตัวอยู่ในน้ำเป็นเวลานาน แสดงว่าอิมัลชันมีความคงตัว หรือมีเสถียรภาพสูง
- อนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กจะใช้เวลาในการรวมตัว และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำนานกว่าอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่

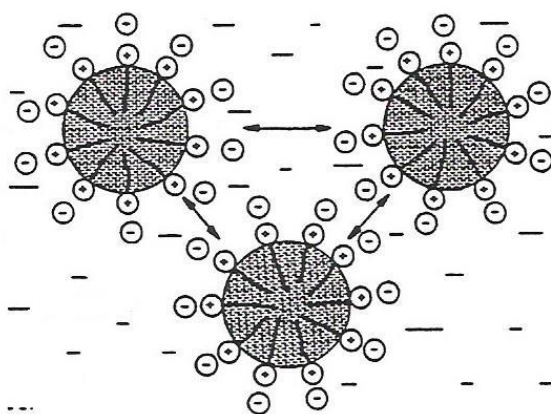
โดยพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันกับน้ำ ขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ และแรงบดอัด หรือพลังงานกลที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนจากการกวนผสม ดังสมการ

$$A_{O/W} = \frac{W_A}{\gamma_{O/W}} \quad (2-1)$$

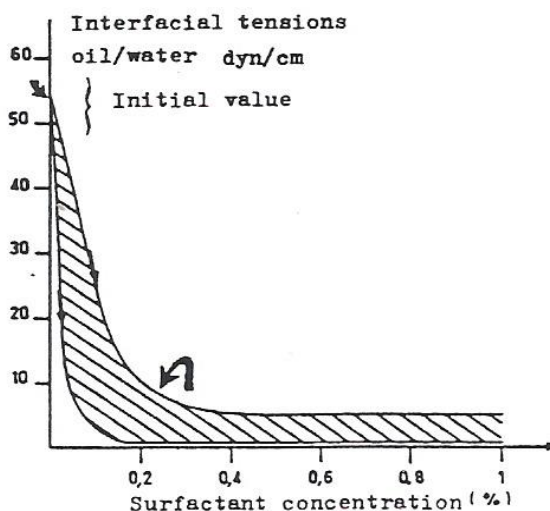
เมื่อ	W_A	=	พลังงานกลที่ใช้ในการกวนผสม (ergs/cm ³)
	$A_{O/W}$	=	พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันกับน้ำ (cm ² /cm ³)
	$\gamma_{O/W}$	=	แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (ergs/cm ² หรือ dyne/cm)

2.2.4 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวจัดเป็นรูปแบบของอิมัลชันที่มีความคงตัวสูง (Stabilized emulsion) เนื่องจากมีสารลดแรงตึงผิวละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำและชอบน้ำมันอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ทำให้อนุภาคน้ำมันมีประจุชนิดเดียวกัน (รูปที่ 2-1) โดยสารลดแรงตึงผิวจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมัน และช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน (รูปที่ 2-2) ทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กลงมาก จึงแยกออกจากน้ำเสียได้ยาก



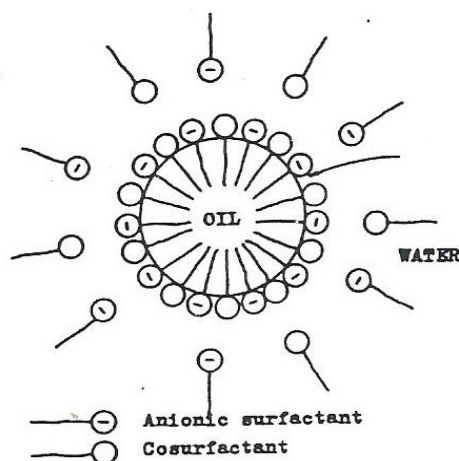
รูปที่ 2-1 การผลึกกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากผลของสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)



รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ (Aurelle, 1985)

นอกจากนี้หากพบการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวร่วม (Cosurfactants) ในน้ำเสีย ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว และจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมัน เช่นเดียวกัน ส่งผลให้อิมัลชันมีความคงตัวสูงขึ้น เนื่องจากส่วนที่มีคุณสมบัติชอบน้ำของสารลดแรง

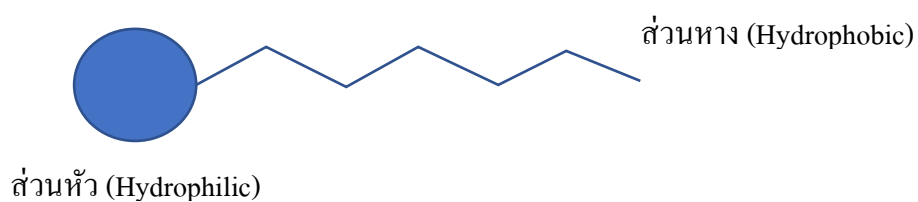
ตั้งผิวร่วมเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว (รูปที่ 2-3) ทำให้ขนาดของอนุภาคน้ำมันเล็กลงมาก โดยจะมีขนาดประมาณ 100-600 อังสตรอม



รูปที่ 2-3 การเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle, 1985)

2.3 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) เป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาดที่ใช้กันทั่วไป จึงสามารถพบการปนเปื้อนได้ทั้งในน้ำเสียชุมชน และน้ำเสียจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งมีคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิวระหว่างของเหลว 2 ชนิด และช่วยให้การกระจายตัวของของเหลวดีขึ้น (Rosen, 1989) โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัว มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนหาง มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ หรือชอบน้ำมัน (Hydrophobic) ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 โครงสร้างพื้นฐานของสารลดแรงตึงผิว

นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามประจุของส่วนหัว (รูปที่ 2-5) ได้แก่

2.3.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactants)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหัว (Hydrophilic) เป็นประจุลบ มีคุณสมบัติในการชำระล้างได้ดี จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน หรือผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เป็นต้น โดยคิดเป็นสัดส่วนในการผลิตประมาณ 50% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวประจุลบที่นิยมใช้ ได้แก่ Alkylbenzene sulfonates (สารซักล้าง) Lauryl sulfate (สบู่) หรือ Di-alkyl sulfosuccinate (สารช่วยเปียก) เป็นต้น (Salager, 2002)

2.3.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactants)

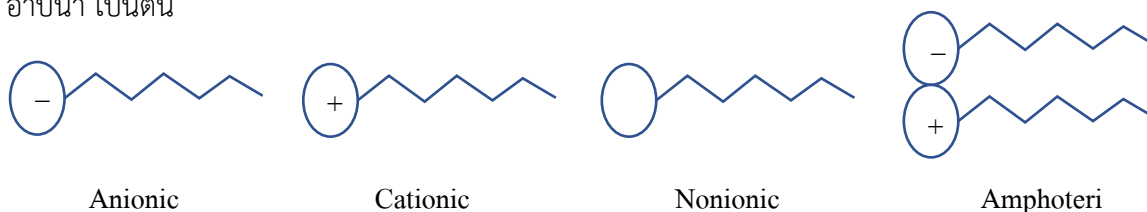
เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหัว (Hydrophilic) เป็นประจุบวก ส่วนมากจะเป็นกลุ่มของสารประกอบไนโตรเจน เช่น Quaternary ammoniums ซึ่งมีความเป็นพิษ ก่อให้เกิดการระคายเคืองได้ง่าย จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อ หรือสารกันเสีย เป็นต้น

2.3.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactants)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีการผลิตรองลงมาจกสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ โดยมีสัดส่วนการผลิตประมาณ 45% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด (Salager, 2002) โดยโครงสร้างส่วนหัว (Hydrophilic) ไม่มีประจุ แต่สามารถพบกลุ่มที่มีความสามารถคล้ายกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกได้ เช่น Polyether หรือ Polyhydroxyl ซึ่งใช้ในการผลิตผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

2.3.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric surfactants)

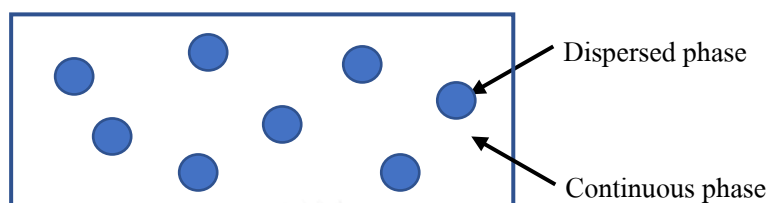
เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหัว (Hydrophilic) เป็นได้ทั้งประจุบวกและลบ ขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ของสภาวะแวดล้อม โดยจะแสดงประจุบวกเมื่ออยู่ในสภาวะเป็นกรด ($\text{pH} < 7$) แสดงประจุลบเมื่ออยู่ในสภาวะเป็นด่าง ($\text{pH} > 7$) และไม่เกิดประจุไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสภาวะเป็นกลาง โดยสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้มีความอ่อนโยนต่อผิวหนัง จึงนิยมใช้ในการผลิต สบู่ หรือครีมอาบน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2-5 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวจำแนกตามประจุของส่วนหัว (Hydrophilic)

2.4 อิมัลชัน (Emulsion)

อิมัลชัน คือของผสมระหว่างของเหลว 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งปกติไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยของเหลวส่วนหนึ่งแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ เรียกว่า วัฏภาคภายใน หรือสารกระจาย (Internal or dispersed phase) ซึ่งจะกระจายตัวแทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิด ที่เรียกว่า วัฏภาคภายนอก หรือสารต่อเนื่อง (external or continuous phase) ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 ลักษณะของอิมัลชัน

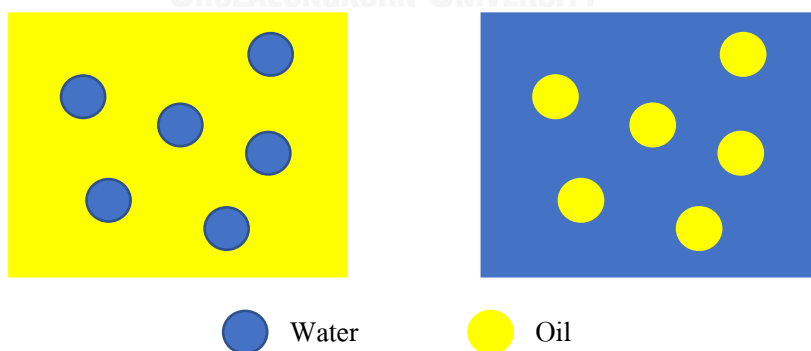
อิมัลชันสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก (รูปที่ 2-7) ได้แก่

2.4.1 อิมัลชันตรง (Direct emulsion)

อิมัลชันตรง หรือ อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in water emulsion, O/W) มีน้ำมันเป็นสารกระจาย และน้ำเป็นสารต่อเนื่อง

2.4.2 อิมัลชันผกผัน (Inverse emulsion)

อิมัลชันผกผัน หรือ อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (Water in oil emulsion, W/O) มีน้ำเป็นสารกระจาย และน้ำมันเป็นสารต่อเนื่อง



รูปที่ 2-7 ประเภทของอิมัลชัน

ทั้งนี้การแบ่งประเภทของอิมัลชันในน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน มักใช้ขนาดของอนุภาคน้ำมัน เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามตารางที่ 2-1 (Rachu, 2005)

ตารางที่ 2-1 การจำแนกอิมัลชันตามขนาดของสารกระจาย (อนุภาคน้ำมัน)

ประเภทของอิมัลชัน	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน (ไมครอน)
อิมัลชันขั้นแรก (Primary emulsion)	≥ 100
อิมัลชันขั้นที่สอง (Secondary emulsion)	< 20
แมโครอิมัลชัน (Macro emulsion)	0.06 – 1
ไมโครอิมัลชัน (Micro emulsion)	0.01 – 0.06

2.5 น้ำมันตัด (Cutting oil)

น้ำมันตัด คือ น้ำมันที่ใช้ในการหล่อลื่น หรือเพื่อลดความร้อนและการเสียดทานขณะการตัดเฉือนโลหะ (รูปที่ 2-8) โดยน้ำมันตัดมีองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่

- น้ำ เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีอัตราส่วนมากที่สุด มีคุณสมบัติในการช่วยระบายความร้อน
- น้ำมันแร่ (Mineral oil) เป็นน้ำมันที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ หรือน้ำมันที่ใช้แล้ว มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นและระบายความร้อน
- สารลดแรงตึงผิว ทำหน้าที่ผสมน้ำมันให้เข้ากับน้ำ เพื่อให้แทรกซึมเข้าสู่ผิวโลหะได้ดี
- สารเติมแต่งอื่นๆ เช่น สารป้องกันการกัดกร่อน สารเพิ่มความเสถียรป้องกันการแยกตัวของน้ำมัน และสารป้องกันการเนาเสีย ซึ่งทำหน้าที่ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น



รูปที่ 2-8 การใช้น้ำมันตัดในอุตสาหกรรมตัดกลึงโลหะ

น้ำมันตัดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.5.1 ประเภทผสมกับน้ำ (Emulsifiable cutting oils)

หรือเรียกว่า น้ำมันหล่อเย็น หรือน้ำมันสบู่น้ำมันประเภทนี้อาจเป็นสารเคมีสังเคราะห์ (Synthetics) หรือเป็นน้ำมันแร่ผสมกับสารตัวทำละลาย (Emulsifier) และสารเพิ่มคุณภาพชนิดอื่นๆ ได้แก่ สารป้องกันการกัดกร่อน สารป้องกันการเน่าเสียจากการเจริญของจุลินทรีย์ และสารรับแรงกด เป็นต้น น้ำมันหล่อเย็นหรือน้ำมันสบู่มักใช้ในงานตัดกลึงที่มีความรุนแรงไม่มาก และชิ้นงานมักเป็นโลหะอ่อนหรือเหล็กธรรมดา (Mild steel) หรือใช้ในงานตัดกลึงที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูง และการระบายความร้อนออกจากชิ้นงานและใบมีดสำคัญกว่าการหล่อลื่น เช่น งานกัด กลึง คว้านรู และเจียร เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานกลึงโลหะที่เหนียว และมีความรุนแรงมากขึ้น มักใช้น้ำมันหล่อเย็นที่มีสารรับแรงกดผสมอยู่ด้วย เพื่อช่วยป้องกันการสึกหรอของใบมีด อย่างไรก็ตามงานตัดที่มีความรุนแรง และการหล่อลื่นเป็นสิ่งสำคัญ จำเป็นต้องใช้น้ำมันตัดประเภทน้ำมันล้วนช่วยในการยืดอายุของใบมีด เนื่องจากน้ำมันตัดที่ผสมน้ำแล้วจะมีคุณสมบัติด้านการหล่อลื่นลดลง

2.5.2 ประเภทน้ำมันล้วน หรือน้ำมัน 100% (Neat cutting oils)

ใช้สำหรับงานตัดกลึงที่มีความรุนแรงมาก และการหล่อลื่นหรือการลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับใบมีดมีความสำคัญ น้ำมันประเภทนี้มักเป็นน้ำมันแร่กลั่นเป็นอย่างดี อาจผสมด้วยไขมันจากพืชและสัตว์ เพื่อช่วยการหล่อลื่น หรือผสมด้วยสารเพิ่มคุณภาพชนิดอื่นๆ เช่น สารรับแรงกด และสารป้องกันการกัดกร่อน เป็นต้น

เนื่องจากมีการใช้น้ำมันตัดอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมตัดกลึงโลหะ ทำให้มักพบการปนเปื้อนของน้ำมันตัดในน้ำเสีย (Cutting oily wastewater) โดยมักจะพบอยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว ทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก และมีความคงตัวสูง จึงไม่สามารถรวมตัวกันได้เอง และแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานาน ทำให้ยากต่อการบำบัดด้วยวิธีแรงโน้มถ่วง (กชกร ก้องกังวาลย์, 2552) ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

2.6 กระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

การเลือกกระบวนการในการบำบัด หรือแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียมักจะเลือกตามรูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2556) โดยแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

- น้ำมันละลายน้ำ
- น้ำมันเป็นชั้นฟิล์มลอยบนผิวน้ำ
- น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว
- น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

โดยกระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 4 กระบวนการหลัก ได้แก่

2.6.1 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological processes)

เป็นกระบวนการที่อาศัยการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งสามารถบำบัดน้ำมันในรูปละลายน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Arizona Department of Environmental Quality, 1996) นั้นหมายความว่า น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันส่วนใหญ่ต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

2.6.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical processes)

เป็นกระบวนการที่อาศัยการเติมสารเคมีลงในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด เช่น การเติมสารละลายคลอรีน (Cl_2) เพื่อกำจัดไขมันออกจากน้ำเสีย โดยเติมลงในถังตกตะกอนขั้นแรก หรือในถังเติมอากาศ เป็นต้น

2.6.3 กระบวนการทางกายภาพเคมี (Physico-Chemical processes)

เป็นกระบวนการที่ผสมผสานระหว่างการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีและกระบวนการแยกทางกายภาพ ได้แก่

- การดูดซับ (Adsorption) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และของแข็งที่มีโมเลกุลดูดติดผิว เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) อย่างไรก็ตามกระบวนการดูดซับมีค่าดำเนินการสูง และต้องมีการฟื้นฟู หรือเปลี่ยนถ่ายถ่านกัมมันต์เมื่อเกิดการอุดตัน
- การใช้อุปกรณ์โคเอสเสเซอร์ (Coalescer) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันละลายน้ำ โดยอาศัยการเพิ่มโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันขณะ

เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เพื่อให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการอุดตันได้ง่าย ดังนั้น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เข้าระบบ ควรผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อน

- การกรอง (Filtration) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท รวมทั้งของแข็งแขวนลอย โดยกรองผ่านตัวกลาง เช่น ทราย (Sand) หรือแอนทราไซต์ (Anthracite) ซึ่งต้องมีการล้างย้อน (Backwash) เมื่อมีการอุดตัน และต้องบำบัดน้ำล้างย้อนก่อนปล่อยสู่ธรรมชาติ

- การทำให้ลอย (Flotation) สามารถกำจัดน้ำมัน และไขมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยหลักการการเพิ่มความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างอนุภาคน้ำมันและเฟสน้ำ โดยมีฟองอากาศเป็นตัวพยุงและพาอนุภาคน้ำมันลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ ด้วยเหตุนี้ระบบการทำให้ลอยจึงนิยมใช้กับน้ำเสียที่ปนเปื้อนอนุภาคแขวนลอยที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ และตกตะกอนได้ยาก เช่น Dissolved air flotation (DAF), Induce air flotation (IAF) และ Vacuum flotation (VF) เป็นต้น

- การตกตะกอน (Sedimentation) สามารถกำจัดอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำ เช่น น้ำมันอิสระ และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำ โดยการกักของเหลวไว้ระยะเวลาหนึ่งในถังหรือบ่อตกตะกอน เพื่อลดความเร็วการไหลของของไหล จนกระทั่งอนุภาคแขวนลอยถูกแยกออกจากเฟสน้ำ ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทั้งนี้การตกตะกอนไม่สามารถแยกน้ำมันในรูปอิมัลชัน น้ำมันละลายน้ำหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนได้

- การเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugation) สามารถกำจัดน้ำมันอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาศัยการเพิ่มความเร็วสุดท้ายของอนุภาคด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยอนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า (น้ำเสีย) จะถูกแรงเหวี่ยงแยกออกจากกระแสของเฟสของไหล และตกลงด้วยแรงโน้มถ่วง ส่วนอนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ (อนุภาคน้ำมัน) จะเคลื่อนตามกระแสของของไหลออกไปจากอุปกรณ์ เช่น ไซโคลน (Cyclone) และ ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ทั้งนี้ระบบดังกล่าวไม่สามารถกำจัดน้ำมันในรูปอิมัลชัน และน้ำมันละลายได้

- การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane processes) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ระยะเวลาในการเดินระบบและพื้นที่ในการติดตั้งน้อย แต่สามารถเกิดการอุดตันได้ง่าย ทำให้อายุการใช้งานค่อนข้างจำกัด จึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนเข้าระบบ เช่น Microfiltration (MF), Ultrafiltration (UF) และ Reverse osmosis (RO) เป็นต้น

- การใช้ความร้อน (Thermal processes) ส่งผลโดยตรงต่อความหนืดและความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน โดยถ้าอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำสูงขึ้น ความหนืดและความถ่วงจำเพาะของน้ำมันจะลดลง ทำให้น้ำมันแยกตัวลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้มากขึ้น

2.6.4 กระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemistry processes)

เป็นการเพิ่มความสามารถในการทำลายเสถียรภาพ และการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coagulation) และแยกออกจากเฟสน้ำโดยทำให้ลอยขึ้น (Flotation) ด้วยไฟฟ้า โดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกในการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (แคโทดและแอโนด) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันได้แก่

- อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic) เป็นกระบวนการแยกมลสารออกจากน้ำ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง และสนามไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ ซึ่งจะทำให้ไอออนของมลสารเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า
- อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation) เป็นกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่ง เป็นการทำให้เกิดตะกอนเบาด้วยไฟฟ้าเพื่อเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน และขั้นที่สอง เป็นการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าเพื่อแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสีย
- อิเล็กโทรฟลอตเตชัน (Electrofloatation) เป็นกระบวนการลอยตัวด้วยไฟฟ้า มีประสิทธิภาพสูงในการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชัน โดยขั้วแอโนดจะผลิตฟองอากาศออกซิเจนขนาดเล็ก และกระจายตัวออกอย่างรวดเร็ว เพื่อช่วยในการลอยตัวขึ้นของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ขั้วแอโนดเกิดการสึกกร่อนได้ จึงต้องมีการเปลี่ยนขั้วใหม่เสมอ
- อิเล็กโทรโคอะเลสเซนซ์ (Electrocoalescence) เป็นกระบวนการรวมตัวด้วยไฟฟ้า โดยผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จากนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้

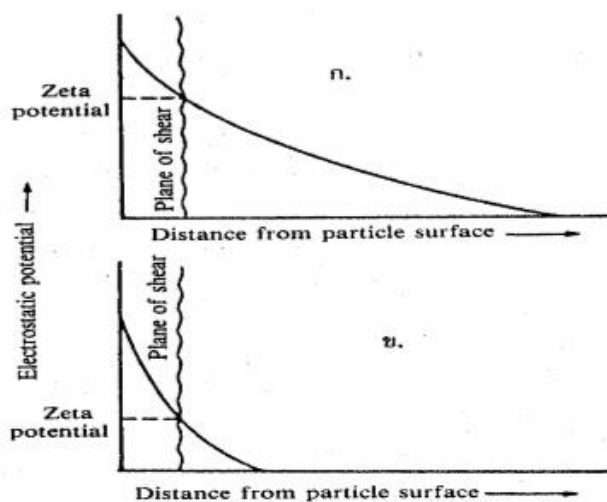
2.7 โคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน (Coagulation and Flocculation)

2.7.1 โคแอกกูเลชัน (Coagulation)

เป็นกระบวนการทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ โดยกลไกวิธีใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

- กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffusion layer) โดยการเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta potential) ที่ผิวของอนุภาคมีค่าลดลง (รูปที่ 2-10) ข้อดีของกลไกลดความหนาของชั้นกระจาย คือ ไม่ว่าจะเติมโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ที่มีไอออนประจุบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้ประจุของ

อนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุตรงข้ามได้ (Charge reversal) เนื่องจากปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์



รูปที่ 2-10 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุบวกให้กับคอลลอยด์
ก่อนเติมไอออน (ก) และหลังเติมไอออน (ข) (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

- กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) โดยเติมสารเคมีที่มีความสามารถให้ประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และดูดติดผิวได้ ซึ่งจะมีผลต่อการลดค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ จนส่งผลให้อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง ทั้งนี้หากเติมสารเคมีมากเกินไป จะสามารถทำให้ประจุของคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุบวกได้ (Charge reversal) และกลับมากกระจายตัวอีกครั้ง

- กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อเป็นที่ยึดเกาะของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) เช่นการใส่สารส้ม ($Al(OH)_3$) ให้เกิดผลึกลักษณะคล้ายวุ้นสีขาว เพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะ แล้วรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นได้ โดยปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum Dosage) สำหรับกลไกนี้จะแปรผกผันกับความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ กล่าวคือน้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณมาก ในขณะที่น้ำที่มีความขุ่นมากจะใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณที่น้อยกว่า เนื่องจาก น้ำที่มีความขุ่นน้อยจะมีโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างโคแอกกูแลนต์และอนุภาคคอลลอยด์ต่ำ จึงต้องเติมโคแอกกูแลนต์ปริมาณมาก เพื่อเป็นการเพิ่มเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ในขณะที่น้ำที่มีความขุ่นมาก โอกาสสัมผัสย่อมมีมาก จึงสามารถเติมโคแอกกูแลนต์ปริมาณน้อยได้

- กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ (Polymer bridging) โดยเติมสารเคมีจำพวกโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ลงในน้ำ ซึ่งมีแขนสำหรับเชื่อมระหว่างอนุภาคคอลลอยด์อื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟล็อก

2.7.2 ฟล็อกคูเลชัน (Flocculation)

เป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มารวมกลุ่มกันเป็นก้อนตะกอน หรือสร้างสัมผัสให้อนุภาคคอลลอยด์ โดยสามารถทำได้ 5 วิธี ดังนี้ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

- ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น (Orthokinetic flocculation) โดยการกวนน้ำให้ส่วนต่างๆของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน จึงมีโอกาที่จะเกิดการสัมผัสกันมากขึ้น แต่ไม่ควรกวนน้ำจนมีอัตราการไหลที่เร็วจนเกินไป เนื่องจากจะทำให้ฟล็อกแตกหรือหลุดออกจากกันได้ วิธีนี้เหมาะสำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 1 ไมครอน และมีความเข้มข้นตั้งแต่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป

- อาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนของอนุภาคคอลลอยด์ (Perikinetic flocculation) การเคลื่อนที่รูปแบบดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเอง หรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การสัมผัสโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนของอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย

- อาศัยการตกตะกอนที่มีอัตราการตกตะกอนไม่เท่ากันของอนุภาคต่างๆ กล่าวคือ การสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์จะเกิดขึ้นพร้อมๆกับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย วิธีการนี้เหมาะสำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

- กรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจเกิดการสร้างสัมผัสแบบ Orthokinetic flocculation ได้ แต่ใช้ระยะเวลาเนื่องจากมีโอกาสสัมผัสกันน้อย จึงต้องมีการเพิ่มโอกาสการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ ได้แก่ การใช้ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว หรือถังกรองแบบ 2 ชั้น (Contact filtration) ซึ่งชั้นกรองจะบังคับให้อนุภาคต่างๆเคลื่อนที่เข้ามาชิดกัน จึงช่วยเพิ่มโอกาสการสัมผัส หรือการใช้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสใหม่ เป็นต้น

- กรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอน และมีความเข้มข้นต่ำ สามารถสร้างสัมผัสโดยกระบวนการกรองได้ แต่สารตัวกรองที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่กว่าทราย

2.7.3 การทดลองจาร์เทสต์ (Jar test)

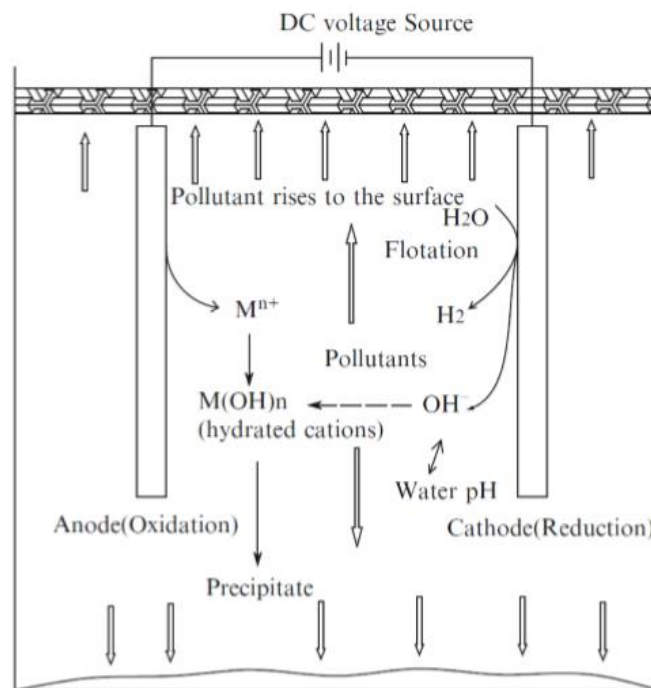
การทดลองจาร์เทสต์เป็นวิธีวิเคราะห์เบื้องต้นในระดับห้องปฏิบัติการโดยทำการทดลองในบีกเกอร์ที่มีใบกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ หรือการกำจัดความขุ่นในน้ำ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูง และต้นทุนที่เหมาะสมที่สุด ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการทดลองจาร์เทสต์ ได้แก่

- ชนิดของโคแอกกูแลนต์
- ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์
- ชนิดและความเข้มข้นของสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant aid)
- ค่า pH ที่เหมาะสม

การทดลองจาร์เทสต์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการกวนเร็ว (Rapid mixing) ด้วยความเร็วประมาณ 100 – 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที เพื่อทำลายเสถียรภาพ (Coagulation) ของอนุภาคคอลลอยด์ และขั้นตอนการกวนช้า (Slow mixing) ด้วยความเร็วประมาณ 30 – 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 – 30 นาที เพื่อเพิ่มการสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพ จากนั้นจึงตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 15 – 30 นาที แล้วจึงนำส่วนน้ำใสมาวิเคราะห์ค่าความขุ่น, ซีโอดี, ความเป็นกรดด่าง และความกระด้าง เป็นต้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

2.8 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)

กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีมลสารอันตรายเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบำบัด โดยทั่วไปมักจะใช้อลูมิเนียม (Aluminium) และเหล็ก (Iron) เป็นขั้วบวก (Anode) ทำให้เกิดอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) โดยไอออนของโลหะเหล่านี้จะไปทำปฏิกิริยากับน้ำและเปลี่ยนรูปเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เสมือนโคแอกกูแลนต์ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ หรือหยดน้ำมัน เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันเป็นฟล็อก ในขณะที่ขั้วลบ (Cathode) จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นฟองอากาศไฮโดรเจนช่วยพยุงอนุภาคคอลลอยด์ หรือหยดน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วให้ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ (Holt และคณะ, 2005) ดังรูปที่ 2-11

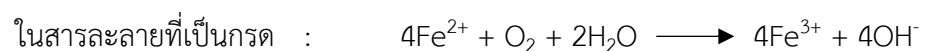
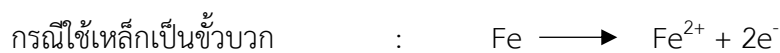
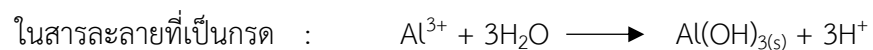
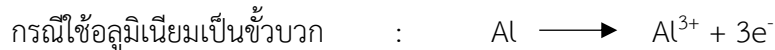


รูปที่ 2-11 กลไกการบำบัดมลสารด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Huijuan Liu, 2010)

2.8.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

ปฏิกริยาเคมีและกลไกการเกิดโคแอกกูเลชันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำ ได้แก่ สภาพการนำไฟฟ้า ความเป็นกรดต่าง ขนาดของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำ ในขณะที่กลไกการเกิดอออนจะขึ้นกับชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ดังนี้

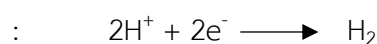
- ขั้วบวก (Anode) หรือที่เรียกกันว่า อิเล็กโทรดสังเวย (Sacrificial electrode) มีหน้าที่ผลิตอออนประจุบวก และอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดการกร่อนของขั้วได้ โดยปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก มีดังต่อไปนี้



ในขณะเดียวกันขั้วบวกสามารถผลิตฟองอากาศออกซิเจนขนาดเล็ก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำงานปฏิกริยาระหว่างโมเลกุลของน้ำ ดังนี้



- ขั้วลบ (Cathode) มีหน้าที่ผลิตฟองอากาศไฮโดรเจนซึ่งมีขนาดเล็ก (ระดับไมครอน) ในปริมาณมาก โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ มีดังต่อไปนี้



2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับ 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่

- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบเป็นตัวกำหนดปริมาณไอออนของโลหะ เช่น Al^{3+} และ Fe^{2+} ที่ปล่อยจากขั้วบวก ปริมาณการผลิตฟองอากาศไฮโดรเจน การกวนผสมของน้ำในระบบ และการถ่ายเทมวลสารบริเวณขั้วไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับปริมาณของโลหะที่ละลายในระบบ เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ดังนี้

$$W = \frac{itM}{NF} \quad (2-2)$$

เมื่อ	W	=	ปริมาณของโลหะที่ละลายในน้ำ (g/cm^2)
	i	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/cm^2)
	M	=	มวลโมเลกุลของโลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนด (g/mol)
	N	=	จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้แลกเปลี่ยนในปฏิกิริยารีดอกซ์ (C/mol)
	t	=	ระยะเวลาสัมผัส (s)
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ ($96,487 \text{ A}\cdot\text{sec/C}$)

- ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) มีส่วนช่วยในการปกป้องขั้วไฟฟ้าและช่วยประหยัดพลังงาน (X. Chen และคณะ, 2000) โดยนิยมเติมเกลือแกง (NaCl) ในการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของน้ำหรือน้ำเสีย ซึ่งไอออนของคลอไรด์ (Cl^-) สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากไอออนประจุลบชนิดอื่น เช่น HCO_3^- และ SO_4^{2-} โดยเฉพาะเมื่อน้ำมีไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) หรือแมกนีเซียม (Mg^{2+}) จะทำให้เกิดผลึกเกลือของไอออนดังกล่าวเคลือบเป็นชั้นฉนวนรอบผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

- อุณหภูมิ (Temperature) ของน้ำหรือน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อน้ำอุณหภูมิอยู่ในช่วง 2

- 30 องศาเซลเซียส ซึ่งควบคุมไปกับการกร่อนของขั้วบวก (แอโนด) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงเกิน 60 องศาเซลเซียส

- ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำหรือน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการจ่ายกระแสไฟฟ้าและค่าการละลายน้ำของเกลือไฮดรอกไซด์ของโลหะ ส่วนใหญ่การบำบัดได้ผลดีที่ค่า pH เป็นกลาง โดยค่า pH ของน้ำหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับน้ำเสียที่มีค่า pH เริ่มต้นเป็นกรด และจะมีค่าลดลงสำหรับน้ำเสียที่มีค่า pH เริ่มต้นเป็นด่าง (ตารางที่ 2-2) ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่สามารถปรับค่า pH ของน้ำหลังผ่านการบำบัดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้โดยไม่ต้องเติมสารเคมี (ตารางที่ 2-3)

ตารางที่ 2-2 สภาพความเป็นกรดต่างของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

สภาพ pH ของน้ำ (เริ่มต้น)	สภาพ pH ของน้ำ (หลังบำบัด)	กลไกการเพิ่ม/ลด ค่า pH
กรด	pH สูงขึ้น	เกิดจากก๊าซไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ
ด่าง	pH ลดลง	เกิดจากการเกิดผลึกไฮดรอกไซด์ของไอออนประจุบวก และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$

ตารางที่ 2-3 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

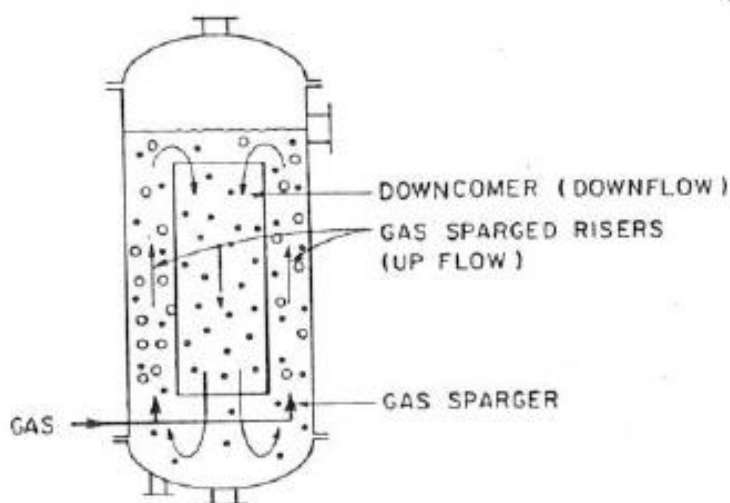
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กมากได้ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระดับโมเลกุล - ไม่มีการใช้สารเคมี จึงไม่ต้องมีการปรับสภาพ pH ของน้ำหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า - ฟล็อกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และคงตัว ทำให้กำจัดออกได้ง่าย - สลัดจ์ที่ได้จากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ตกตะกอนได้เร็ว และรีดน้ำออกได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - ขั้วไฟฟ้าที่ใช้มีการสึกกร่อน จึงต้องเปลี่ยนขั้วใหม่เป็นระยะ - อาจเกิดฟิล์มออกไซด์ของเกลือโลหะเคลือบบริเวณขั้วบวก (Cathode) ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง - น้ำเสียที่ต้องการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าต้องมีค่าการนำไฟฟ้าสูงเพียงพอ ถ้ามีค่าการนำไฟฟ้าไม่เพียงพอ ต้องเติมเกลือ - ค่าดำเนินการส่วนใหญ่เป็นค่าไฟฟ้า

ตารางที่ 2-3 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (ต่อ)

ข้อดี	ข้อเสีย
- ระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าใช้เครื่องมือแบบธรรมดา ทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา	- การขยายขนาดของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำให้มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ซึ่งมีคุณสมบัติติดไฟได้ง่าย

2.9 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Airlift reactor)

ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Airlift reactor, ALR) เป็นถังปฏิกริยาระหว่างก๊าซและของเหลว ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณที่แตกต่างกัน คือบริเวณที่มีการเติมอากาศด้วยเครื่องพ่นก๊าซ (Gas sparger) และบริเวณที่ไม่มีการเติมอากาศ โดยสัดส่วนของก๊าซที่แตกต่างกันระหว่าง 2 บริเวณ ส่งผลให้ความหนาแน่นของน้ำในแต่ละบริเวณแตกต่างกันด้วย จึงทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำภายในถังปฏิกริยา ซึ่งบริเวณที่น้ำและก๊าซมีการไหลในทิศขึ้น เรียกว่าบริเวณไรเซอร์ (Riser) ในขณะที่บริเวณที่น้ำมีการไหลในทิศลง เรียกว่าบริเวณดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ดังแสดงในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 บริเวณภายในของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (M.Y. Chisti และ M. Moo-young, 1987)

โดยข้อดีและข้อเสียของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก แสดงดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ข้อดีและข้อเสียของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

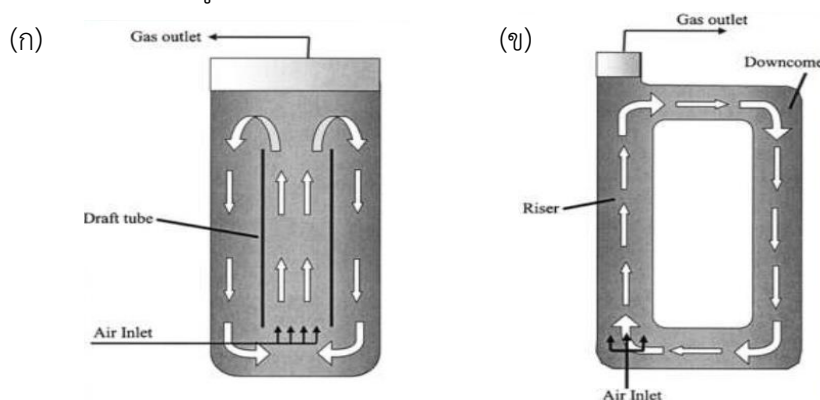
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - ออกแบบง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน - ถังปฏิกริยาไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหวทำให้ประหยัดค่าบำรุง และดูแลรักษาง่าย - มีการผสมที่ดีและมีแรงเฉือนต่ำ - ใช้พลังงานต่ำ - ควบคุมอัตราการไหลวนของของเหลวได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพในการแยกก๊าซออกจากของเหลวต่ำเมื่อมีการเกิดโฟม เนื่องจากระบบไม่มีใบพัดในการทำให้ฟองอากาศแตก - ต้องใช้แรงดันสูง ในการอัดอากาศแก่ระบบ

2.9.1 ประเภทของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายใน และถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายนอก (รูปที่ 2-13)

- ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายใน (Internal loop airlift reactor, ILALR) มีลักษณะคล้ายคลึงกับถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column reactor, BCR) แต่มีการติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) หรือท่อ (Draft tube) ภายในถังปฏิกริยา ทำให้เกิดบริเวณไรเซอร์ (Riser) และบริเวณดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ในถังเดียวกัน (รูปที่ 2-13 ก)

- ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายนอก (External loop airlift reactor, ELALR) จะมีบริเวณไรเซอร์ (Riser) และบริเวณดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) แยกออกจากกันอย่างชัดเจน โดยมีลักษณะเป็นคอลัมน์ 2 คอลัมน์และมีส่วนที่เชื่อมต่อกันบริเวณด้านบนและด้านล่างของคอลัมน์ (รูปที่ 2-13 ข)



รูปที่ 2-13 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายใน (ก)

และถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายนอก (ข)

2.9.2 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics)

ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่สำคัญ ได้แก่

- พื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial area, a) เป็นตัวแปรที่แสดงถึงพื้นที่ผิวทั้งหมดของฟองอากาศต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (สมการที่ 2-3, 2-4 และ 2-5) ซึ่งมีผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างของเหลวกับก๊าซในระบบ

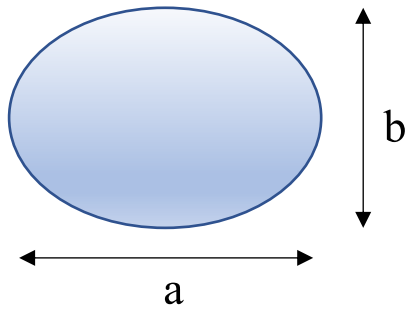
$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} = \frac{6Q_G}{\pi d_B^3} \quad (2-3)$$

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} \quad (2-4)$$

$$S_B = \pi d_B^2 \quad (2-5)$$

เมื่อ	a	=	พื้นที่ผิวสัมผัส (m^{-1})
	N_B	=	จำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระบบ
	S_B	=	พื้นที่ผิวทั้งหมดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระบบ (m^2)
	V_{TOTAL}	=	ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (m^3)
	f_B	=	ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (s^{-1})
	H_L	=	ความสูงของชั้นของเหลว (m)
	U_B	=	ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (m/s)
	d_B	=	ขนาดของฟองอากาศ (m)

- ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_B) ขนาดของฟองอากาศเป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและก๊าซ ซึ่งมีผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างก๊าซและของเหลวภายในระบบ ถ้าฟองอากาศมีขนาดเล็กจะทำให้มีพื้นที่สำหรับแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับของเหลวมากขึ้น ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างของเหลวกับก๊าซเพิ่มขึ้น โดยขนาดของฟองอากาศสามารถคำนวณได้จากขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศเทียบเท่า (Equivalent Bubble) ตามสมมติฐานที่ว่าฟองอากาศมีรูปร่างเป็นวงรี ดังนี้



$$d_{Bi} = (a^2 b)^{1/3} \quad (2-6)$$

$$d_B = \frac{\sum_{i=1}^a d_{Bi}^3}{\sum_{i=1}^a d_{Bi}^2} \quad (2-7)$$

เมื่อ	a	=	แกนเอกของวงรี
	b	=	แกนโทของวงรี
	d_{Bi}	=	ขนาดของฟองอากาศเทียบเท่า

- สัดส่วนของก๊าซในระบบ (Gas holdup, \mathcal{E}) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของก๊าซและปริมาตรโดยรวมของระบบ ดังสมการที่ 2-8

$$\mathcal{E}_i = \frac{V_G}{V_L + V_G + V_S} \quad (2-8)$$

เมื่อ	\mathcal{E}_i	=	สัดส่วนของก๊าซ
	V_G	=	ปริมาตรของก๊าซในระบบ (m^3)
	V_L	=	ปริมาตรของของเหลวในระบบ (m^3)
	V_S	=	ปริมาตรของของแข็งในระบบ (m^3)

อย่างไรก็ตามค่าสัดส่วนของก๊าซสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัส ดังสมการที่ 3-9

$$a = \left(\frac{6\mathcal{E}}{d_B(1-\mathcal{E})} \right) \quad (2-9)$$

เมื่อ	a	=	พื้นที่ผิวสัมผัส (m^{-1})
	\mathcal{E}	=	สัดส่วนของก๊าซในระบบ
	d_B	=	ขนาดของฟองอากาศ (m)

- ความเร็วของของเหลว (Liquid velocity, U_{Ld}) สามารถตรวจวัดได้โดยการฉีดสี (Color tracer) เข้าไปในระบบ แล้ววัดระยะทางและจับเวลาสำหรับการเคลื่อนที่ของสีจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยนำมาคำนวณตามสมการที่ 2-10

$$U_{Ld} = \frac{L_d}{t_d} \quad (2-10)$$

เมื่อ U_{Ld} = ความเร็วของของเหลว (m/s)
 t_d = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (minutes)

อย่างไรก็ตามความเร็วของของเหลวสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์กับสัดส่วนของก๊าซในระบบ (สมการที่ 2-11)

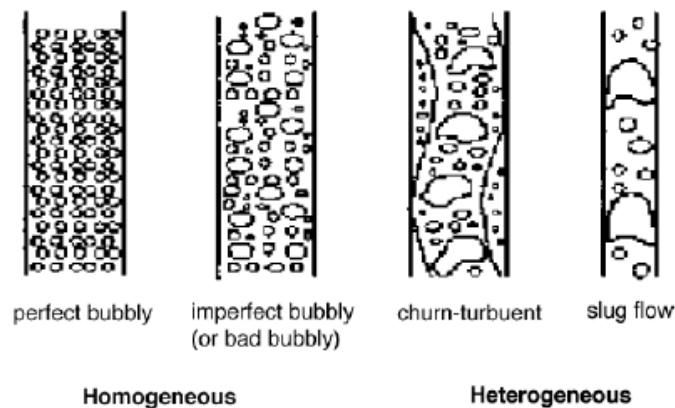
$$U_L = \frac{V_L}{t_c \times A \times (1-\varepsilon)} \quad (2-11)$$

เมื่อ U_L = ความเร็วของของเหลว (m/s)
 V_L = ปริมาตรของของเหลว (m^3)
 t_c = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (minutes)
 A = พื้นที่หน้าตัด (m)
 ε = สัดส่วนของก๊าซในระบบ

- ขอบเขตการไหล (Flow Regime) จะถูกจำแนกตามพฤติกรรมของฟองอากาศในระบบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขอบเขต (รูปที่ 2-14) ดังนี้

1) Homogeneous bubble flow ขอบเขตนี้เกิดขึ้นที่ความเร็วก๊าซต่ำกว่า 5 cm/s (Kantarcia N., 2005) และความปั่นป่วนในเฟสของเหลวต่ำ โดยฟองอากาศจะกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบ และลอยตัวขึ้นด้วยความเร็วต่ำ

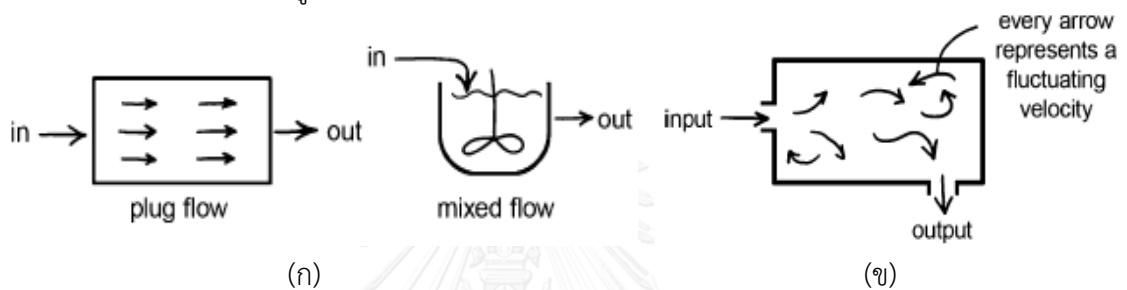
2) Heterogeneous bubble flow ขอบเขตนี้เกิดขึ้นที่ความเร็วก๊าซและความปั่นป่วนในเฟสของเหลวสูง เช่น การไหลแบบเป็นก้อน (Slug flow) และการไหลแบบเป็นโพรง (Churn flow)



รูปที่ 2-14 ขอบเขตการไหลจากการพิจารณาหลักการเกิดของฟองอากาศ (Merchuk, 2002)

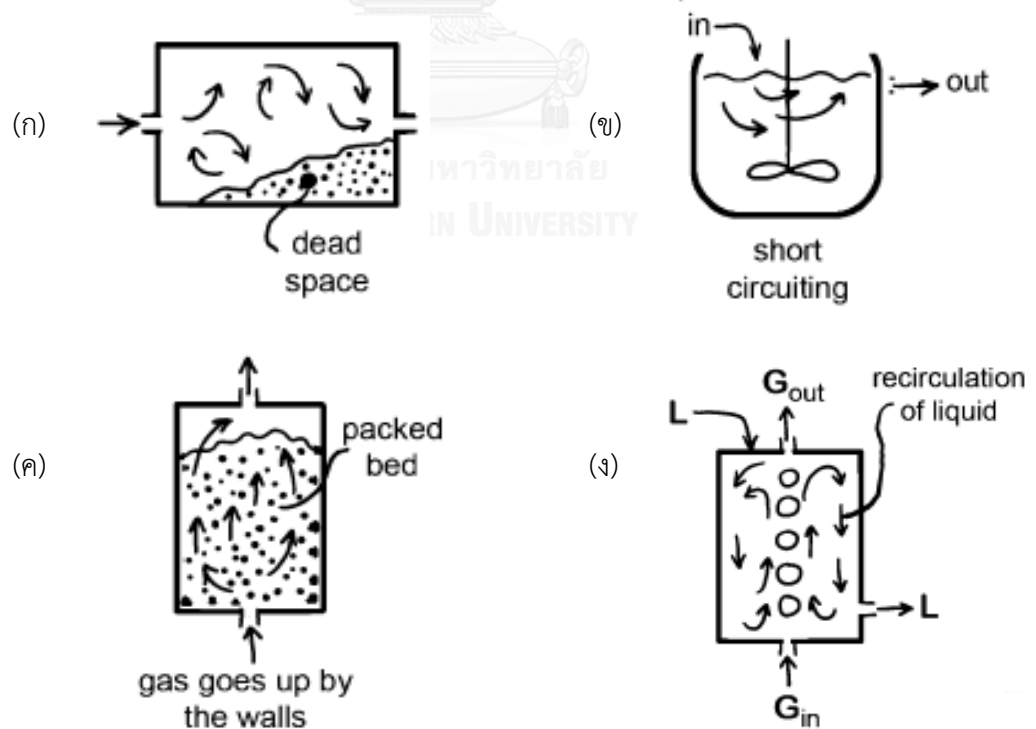
2.10 การศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution, RTD)

ตามสมมติฐานทั่วไปกำหนดให้รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาเป็นการไหลแบบอุดมคติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การไหลตามแนวท่อ (Plug flow) และการไหลแบบที่มีการกวนสมบูรณ์ (Completely mixed) แต่ความเป็นจริงแล้วรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาไม่ได้เป็นการไหลแบบอุดมคติ (รูปที่ 2-15) จึงอาจเกิดการไหลไม่ทั่วบริเวณของถังปฏิกริยา ส่งผลให้ระยะเวลาพักของเหลวในระบบเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดบริเวณที่ของเหลวหยุดนิ่ง (Dead zone) เกิดการไหลลัดวงจร (Short circuit) การไหลผ่านรูพรุนของตัวกลาง (Channeling) และการไหลวนของน้ำในระบบ (Recirculation) ดังรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-15 รูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาที่มีการไหลแบบอุดมคติ (ก)

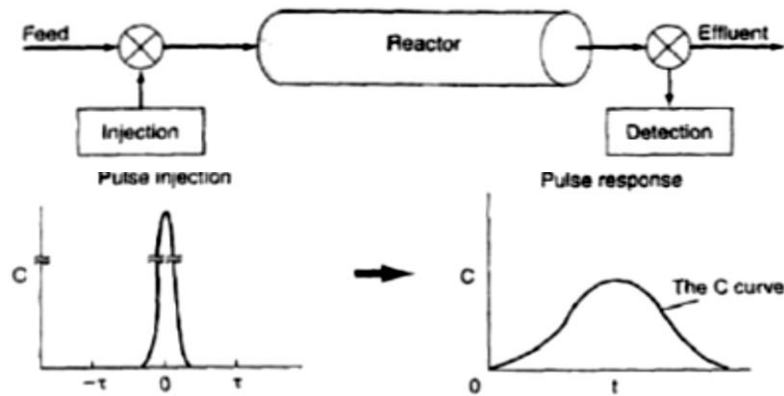
และการไหลตามความเป็นจริง (ข) (Chemical reaction engineering, 3rd edition)



รูปที่ 2-16 รูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาเนื่องจากการเกิด Dead zone (ก) Short circuit (ข)

Channeling (ค) และ Recirculation (ง) (Chemical reaction engineering, 3rd edition)

เพื่อให้ทราบรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ที่แท้จริง จึงมีการศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักของเหลวในระบบ (Residence time distribution, RTD) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยการฉีดสารติดตาม (Tracer) ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี สามารถติดตามได้ง่าย และไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นเข้าไปในระบบ และทำการวัดความเข้มข้นของสารติดตามที่ระยะเวลาต่างๆ (รูปที่ 2-17)



รูปที่ 2-17 วิธีการวิเคราะห์การกระจายตัวของเวลากักของเหลว

(Chemical reaction engineering, 3rd edition)

การคำนวณค่า RTD ของระบบมักจะแปรผลให้อยู่ในรูปของ RTD function หรือ $E(t)$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{vC(t)}{N_0} \Delta t = E(t)\Delta t \quad (2-12)$$

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t)dt} \quad (2-13)$$

เมื่อ	ΔN	=	ปริมาณสารติดตามที่ออกจากระบบในช่วงเวลาที่ t ถึง $t + dt$
	N_0	=	ปริมาณสารติดตามที่ฉีดเข้าระบบ
	v	=	อัตราการไหลของของเหลวในระบบ
	$C(t)$	=	ความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาใดๆ
	$E(t)$	=	RTD function ในช่วงเวลาที่ t ถึง $t + dt$

โดยสามารถนำค่า $E(t)$ ไปคำนวณหาระยะเวลาเฉลี่ยที่สารติดตามอยู่ในระบบ (Mean residence time, t_m) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับทำนายรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ได้ดังสมการที่ 2-14

$$t_m = \frac{\int_0^\infty tE(t)dt}{\int_0^\infty E(t)dt} = \int_0^\infty tE(t)dt \quad (2-14)$$

เมื่อ	t_m	=	ระยะเวลาเฉลี่ยที่สารติดตามอยู่ในระบบ
	t	=	ระยะเวลากักของของเหลวในระบบ
	$E(t)$	=	RTD function ในช่วงเวลาที่ t ถึง $t + dt$

อย่างไรก็ตามค่า t_m ที่คำนวณได้อาจมีการแปรปรวน (Variance, σ^2) ซึ่งบ่งบอกถึงช่วงการกระจายของระยะเวลากักเฉลี่ย โดยสามารถคำนวณค่าความแปรปรวนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma = \int_0^\infty (t - t_m)^2 E(t) dt \quad (2-15)$$

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

กชกร ก้องกังวาลย์ (2552) ศึกษาการการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวด้วยอุปกรณ์โคเอสเซอร์ชนิดเส้นใย โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบชนิด Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) พบว่าตัวกลางเส้นใยกรองน้ำตู้ปลามีความเหมาะสมมากกว่าเส้นใยสแตนเลสเนื่องจากมีความไม่ชอบน้ำมากกว่า โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงที่สุด 44.37 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีการเติมสารเคมีช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงขึ้น คิดเป็น 62.2 เปอร์เซ็นต์

ณัฐวิญญ์ ขวเลิศพรศิยา (2552) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียด้วยอุปกรณ์โคเอสเซอร์ ซึ่งศึกษาและเสนอโมเดลทำนายประสิทธิภาพของแนวทางการบำบัดแบบผสมระหว่างกระบวนการโคเอสเซอร์และกระบวนการตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดในรูปอิมัลชัน ตลอดจนศึกษาผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส และความเร็วในการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดซึ่งพิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย โดยใช้น้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสูงของชั้นตัวกลางและความเร็วการไหลของน้ำเสีย มีผลประสิทธิภาพการบำบัดอิมัลชันของกระบวนการบำบัดแบบผสม นอกจากนี้ ค่าตัวแปรประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการกระทบ การเกาะติด และการตกตะกอนสามารถ

ประยุกต์ใช้ในโมเดลเพื่อทำนายประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบจากการลดลงของพื้นที่ได้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

Perez และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil) โดยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ฟิล์มตรึงไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow anaerobic fixed-film reactor) ระยะเวลาพักน้ำ 0.15 วัน โดยน้ำเสียเข้ามีค่าความสกปรก 16.7 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าระบบย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศสามารถบำบัดค่าซีโอดีและปริมาณสารประกอบอินทรีย์ได้ 85.8 และ 58.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ระยะเวลาเดินระบบ 120 วัน

Bensadok และคณะ (2007) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil) ในรูปอิมัลชันโดยกระบวนการทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมี (Coagulation) 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และอลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ควบคู่กับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved air flotation) พบว่าชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยการทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมีเพียงกระบวนการเดียว และชุดการทดลองที่ใช้การทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมีควบคู่กับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายไม่สามารถบำบัดค่าซีโอดีให้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานได้และใช้สารเคมีปริมาณมากในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันตัด

Ichikawa และคณะ (2007) ศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในรูปอิมัลชันในน้ำโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้า ศึกษาตัวแปร ได้แก่ ค่าสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน เตรียมอิมัลชันโดยการผสมน้ำมันกับน้ำในอัตราส่วน 3:2 เขย่าให้มากกว่า 100 ครั้ง จนผสมกันในกรวยแยก (Separating funnel) โดยใช้ sodium 2-naphthyl sulfonate เป็นสารลดแรงตึงผิวปริมาณ 0.2 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่า เมื่อใส่สนามไฟฟ้ามากกว่า 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันให้สามารถรวมตัวกันได้ภายในเวลา 20 วินาที เนื่องจากเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าจะเกิดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน ทำให้ประจุที่ผิวของอนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ และเกิดเป็นช่องว่างที่สามารถทำให้อนุภาคน้ำมันอื่นๆ สามารถเข้ามารวมตัวจนมีอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้ และเสถียรภาพความเป็นอิมัลชัน

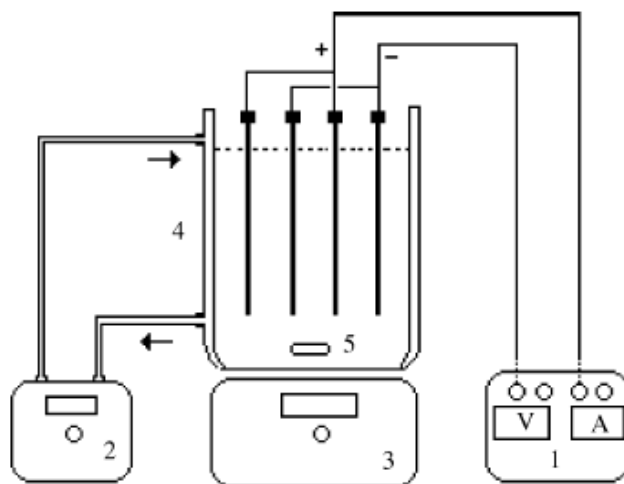
Bai และคณะ (2011) ศึกษาการแยกน้ำมันดีเซลออกจากน้ำด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนควบคู่กับการเป่าฟองอากาศ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับของเหลวจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่างอากาศกับของเหลวเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกน้ำมันออกจากน้ำ และเมื่อค่าเรย์โนลด์ (Reynolds number) ของน้ำขาเข้าเพิ่มขึ้นจาก 14,000 เป็น 16,000 ทำให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันเพิ่มขึ้นจากเดิม 72

เปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับของเหลว 0 เปอร์เซ็นต์) เป็น 85 เปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับของเหลว 1 เปอร์เซ็นต์)

Yang และคณะ (2012) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากร้านอาหารที่ความเข้มข้นของน้ำมัน 5 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรองจมตัว (Submerged membrane bioreactor) พบว่าความเข้มข้นของน้ำมันไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยระบบสามารถบำบัดค่าซีโอดีให้มีต่ำกว่าค่ามาตรฐานสำหรับน้ำทิ้งได้ (20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีคิดเป็น 98.3 และ 99.1 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน 5 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการเดินระบบ 140 วัน

2.11.2 กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

Koby และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์ปีกโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมหรือเหล็กขนาด 46 มิลลิเมตร × 55 มิลลิเมตร × 3 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น ต่อบางจระแบบขนาน ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 11 มิลลิเมตร ติดตั้งชุดการทดลองดังรูปที่ 2-18 ทำการเดินระบบแบบทีละเทที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วการกวนผสม 200 รอบต่อนาที ปริมาณน้ำเสียที่ใช้บำบัดแต่ละกะปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าซีโอดีเริ่มต้นอยู่ในช่วง 26,000 – 29,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณน้ำมันและไขมันอยู่ในช่วง 1,500 – 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ 6.7



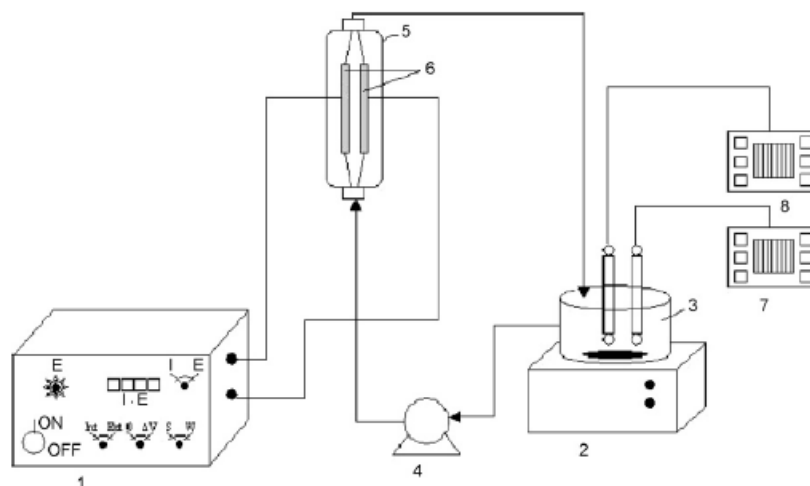
รูปที่ 2-18 ชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์ปีกโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดย 1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 2. เครื่องสูบน้ำ 3. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก 4. ถังปฏิกรณ์ 5. แท่งแม่เหล็ก (Koby และคณะ, 2006)

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น (2 - 10) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (25, 50, 100, 150 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 40 นาที)

ผลการทดลองพบว่า

1. ค่าพีเอชเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอที โดยอัตราการบำบัดซีโอทีมีค่าสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 คิดเป็น 93 และ 85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อลูมิเนียมและเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าตามลำดับ ในขณะที่อัตราการบำบัดน้ำมันและไขมันมีค่าสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 2 คิดเป็น 92 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า แต่ค่าพีเอชเริ่มต้นไม่มีผลต่ออัตราการบำบัดน้ำมันและไขมันเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีอัตราการบำบัดอยู่ในช่วง 96 – 98 เปอร์เซ็นต์
2. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอที ปริมาณน้ำมันและไขมันจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และจะคงที่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สำหรับอัตราการบำบัดซีโอทีคิดเป็น 92 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อัตราการบำบัดน้ำมันและไขมันคิดเป็น 94 และ 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อลูมิเนียมและเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ตามลำดับ
3. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอที ปริมาณน้ำมันและไขมันมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 25 นาที

Bensadok และคณะ (2008) ศึกษากระบวนการบำบัดขั้วต้นของน้ำมันตัด (Cutting oil) ในรูปอิมัลชันที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมลักษณะเป็นแผ่นขนาด 100 มิลลิเมตร × 50 มิลลิเมตร × 12 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น มีพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยา 5.0×10^{-3} ตารางเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 มิลลิเมตร ติดตั้งชุดการทดลองดังรูปที่ 2-19 ทำการเดินระบบแบบที่ละเทที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วการกวนผสม 250 รอบต่อนาที เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สำหรับเพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย โดยปริมาณน้ำเสียที่ใช้บำบัดแต่ละกะปริมาตร 1.5 ลิตร มีค่าซีโอทีเริ่มต้น 60,282 108,208 และ 116,128 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ 8.63, 9.09 และ 9.69 ที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัด 2, 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 2-19 ชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดย 1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 2. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก 3. ถังปฏิกริยา 4. เครื่องสูบน้ำ 5. เซลล์ไฟฟ้าเคมี 6. แผ่นอลูมิเนียม 7. เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า 8. เครื่องวัดพีเอช (Bensadok และคณะ, 2008)

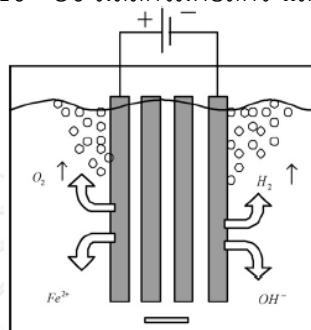
ทำการศึกษปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ได้แก่ ความเข้มข้นน้ำมัน (2, 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (100, 150 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) อัตราการไหลของน้ำขาเข้า (130, 320, 520 และ 750 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที) และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (3, 5, 6, 7, 9 และ 11)

ผลการทดลองพบว่า

1. เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันเพิ่มขึ้น (2, 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์) ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและความขุ่นลดลง
2. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและความขุ่นสูงขึ้น เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (100, 150 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)
3. อัตราการไหลของน้ำขาเข้าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ ในทุกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราการไหลของน้ำขาเข้าเพิ่มขึ้น ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 150 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
4. ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 – 7

5. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดในรูปอิมัลชันโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอทีและความขุ่น คิดเป็น 92 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Heidmann และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนโครเมียมโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็กลักษณะเป็นแผ่นขนาด 78 มิลลิเมตร × 99 มิลลิเมตร × 2 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 มิลลิเมตร โดยแต่ละแผ่นเจาะรูขนาด 5 มิลลิเมตร จำนวน 28 รู มีพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยา 0.031 ตารางเมตร ติดตั้งในถังปฏิกิริยาทรงกระบอกปริมาตร 2 ลิตร ดังรูปที่ 2-20 ทำการเดินระบบแบบทีละเท โดยน้ำเสียที่ใช้บำบัดมีปริมาณโครเมียมเริ่มต้นอยู่ในช่วง 10 - 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5 - 6



รูปที่ 2-20 ชุดการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นเจาะรู (Heidmann และคณะ, 2008)

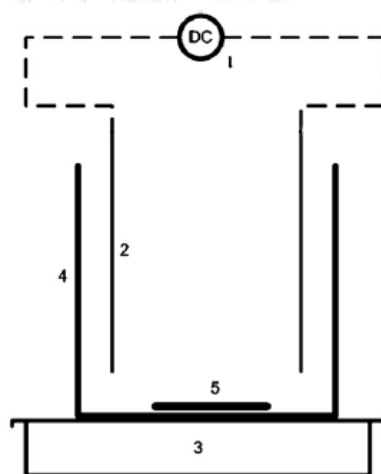
ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ได้แก่ ปริมาณโครเมียมเริ่มต้นของน้ำเสีย (10, 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่ากระแสไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงกระแสไฟฟ้าต่ำ (0.05, 0.07 และ 0.10 แอมแปร์) และช่วงกระแสไฟฟ้าสูง (1.0, 2.0 และ 3.0 แอมแปร์)

ผลการทดลองพบว่า

1. ช่วงค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ (0.05 - 0.1 แอมแปร์) มีอัตราการละลายของเหล็กไอออน (Fe^{2+}) มากกว่าช่วงค่ากระแสไฟฟ้าสูง (1.0 - 3.0 แอมแปร์) ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าในทุกความเข้มข้นของโครเมียม
2. ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมในน้ำเสียที่แตกต่างกันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการบำบัดของช่วงกระแสไฟฟ้าต่ำ แต่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการบำบัดของช่วงกระแสไฟฟ้าสูง โดยอัตราการบำบัดสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นโครเมียมมากขึ้น

3. การบำบัดโครเมียมในน้ำเสียโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ช่วงค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ (0.05 - 0.1 แอมแปร์) สามารถกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 45 นาที

Muftah และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และเหล็ก ลักษณะเป็นแผ่นขนาด 40 มิลลิเมตร × 60 มิลลิเมตร × 1 มิลลิเมตร มีพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยา 48 ตารางเซนติเมตร ติดตั้งในถังปฏิกิริยาทรงกระบอกทำจากแก้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 72 มิลลิเมตร และสูง 61.4 มิลลิเมตร ติดตั้งชุดการทดลองดังรูปที่ 2-21 ทำการเดินระบบแบบทีละเท ใช้ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมที่ความเข้มข้นค่าซีโอดีและซัลเฟตแตกต่างกัน 2 ตัวอย่าง (WW-A และ WW-B) โดยปริมาณน้ำเสียที่ใช้บำบัดแต่ละกะปริมาตร 200 มิลลิลิตร มีค่าซีโอดีเริ่มต้น 596 และ 4,050 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณซัลเฟต 887 และ 1,222 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ 6.6 และ 9.5 สำหรับชุดการทดลอง WW-A และ WW-B ตามลำดับ



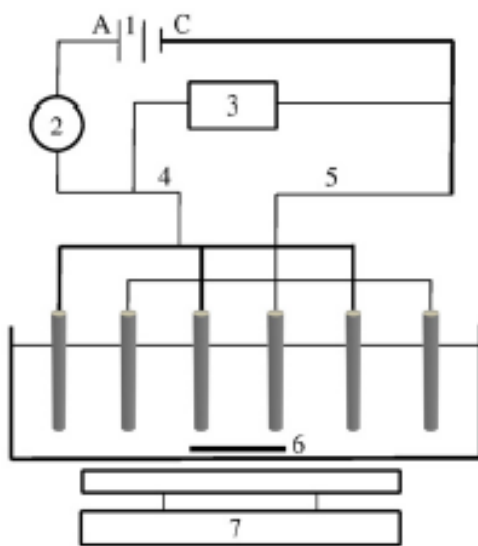
รูปที่ 2-21 ชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นปิโตรเลียมโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดย 1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 2. ขั้วไฟฟ้า 3. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก 4. ถังปฏิกิริยา 5. แท่งแม่เหล็ก (Muftah และคณะ, 2009)

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้า (อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และเหล็ก) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (2, 4, 8 และ 13 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง (WW-A และ WW-B) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (6, 7, 8 และ 9) และอุณหภูมิสำหรับทำการทดลอง (25 และ 40 องศาเซลเซียส)

ผลการทดลองพบว่า

1. การใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและซัลเฟตสูงที่สุด
2. ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและซัลเฟตสูงขึ้น เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (2, 4, 8 และ 13 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
3. ลักษณะของน้ำเสียโดยเฉพาะความเข้มข้นของค่าซีโอดีและซัลเฟตมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี คิดเป็น 63 และ 42 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต คิดเป็น 93 และ 24 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชุดการทดลอง WW-A และ WW-B ตามลำดับ
4. การบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดีที่สุดในที่พีเอช 8 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
5. มีความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและซัลเฟต คิดเป็น 63 และ 93 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะและความเข้มข้นน้ำเสียที่เหมาะสม

Malakootian และคณะ (2010) ศึกษาการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็กลักษณะเป็นแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร จำนวน 6 แผ่น ต่อบางแบบขนาน ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 มิลลิเมตร ติดตั้งในถังปฏิกรณ์ขนาด 110 x 100 x 150 มิลลิเมตร ปริมาตร 1.3 ลิตร ติดตั้งชุดการทดลองดังรูปที่ 2-22 ทำการเดินระบบแบบทีละเท โดยน้ำเสียที่ใช้บำบัดมีค่าความกระด้างทั้งหมด (Total hardness) 300 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ค่าความกระด้างจากแคลเซียม 138 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ 8.35



รูปที่ 2-22 ชุดการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบแท่ง
(Malakootian และคณะ, 2010)

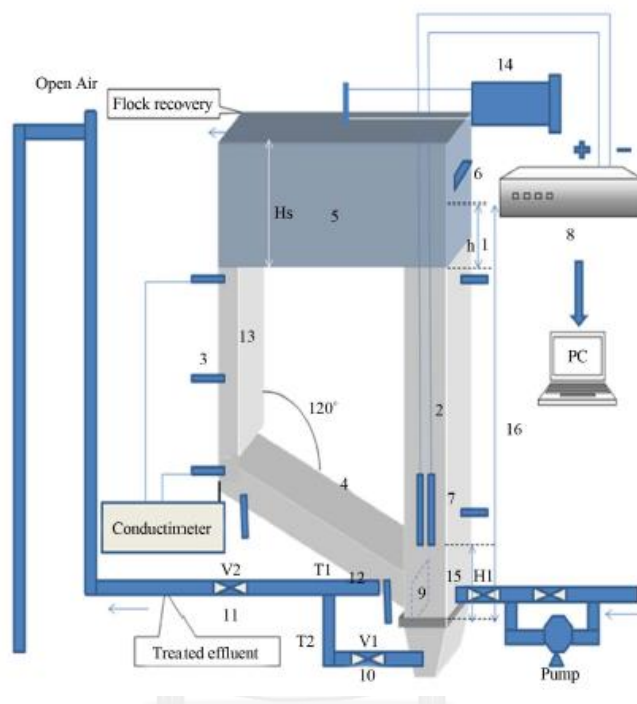
ทำการศึกษาลำดับที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (6, 12 และ 24 โวลต์) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (3, 7 และ 10) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (10, 20 และ 30 นาที)

ผลการทดลองพบว่า

1. ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
2. ระยะเวลาในการกำจัดความกระด้างที่เหมาะสมคือ 60 นาที ในทุกค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำ และน้ำหลังผ่านการบำบัดจะมีค่าพีเอชสูงขึ้นอยู่กับประมาณ 10.5
3. มีความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ากำจัดความกระด้างในน้ำประปา โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างทั้งหมด (Total hardness) และความกระด้างจากแคลเซียม (Calcium hardness) คิดเป็น 98.2 และ 97.4 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำประปาเท่ากับ 10 ค่าความต่างศักย์ 12 โวลต์ และระยะเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที

Chenik และคณะ (2013) ศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียจริงโดยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายนอก (External loop airlift reactor, EALR) ทำจากอะคริลิก แบ่งเป็นบริเวณที่เติมอากาศ (Riser) เส้นผ่านศูนย์กลาง 20.5 เซนติเมตร สูง 103.8 เซนติเมตร และบริเวณที่ไม่เติมอากาศ (Downcomer) เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.2 เซนติเมตร สูง 48.3 เซนติเมตร ถังปฏิกิริยามีปริมาตรโดยรวม 150 ลิตร โดยใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด

ได้แก่ อลูมิเนียม และเหล็ก ลักษณะเป็นแผ่นขนาด 232 มิลลิเมตร × 165 มิลลิเมตร × 1 มิลลิเมตร มีพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยา 1,050 ตารางเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 มิลลิเมตร ติดตั้งชุดการทดลองดังรูปที่ 2-23 แบ่งชุดการทดลองออกเป็น ชุดการทดลองที่เดินระบบแบบทีละเท และชุดการทดลองที่เดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีค่าซีโอดีเริ่มต้น 951 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ 11.46



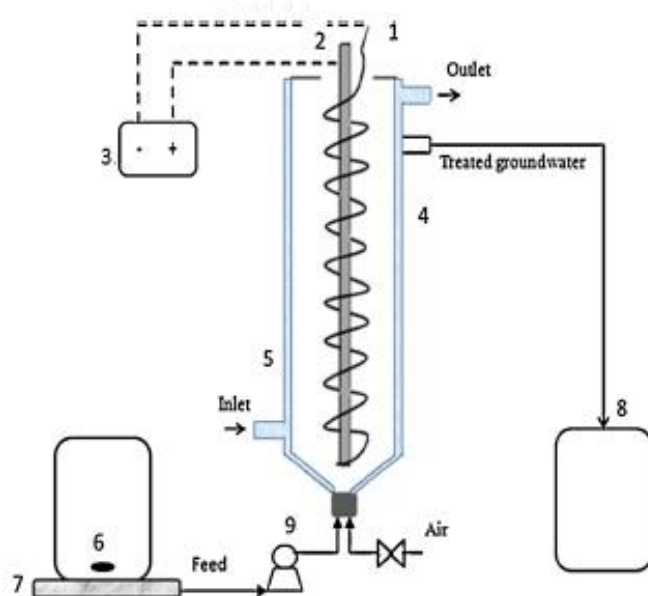
รูปที่ 2-23 ชุดการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนภายนอก (Chenik และคณะ, 2013)

ผลการทดลองพบว่า

1. การเดินระบบแบบต่อเนื่องสำหรับบำบัดสีย้อมโดยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงสุด 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเดินระบบแบบทีละเทมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงสุด 90 เปอร์เซ็นต์
2. การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจริงมากกว่าการใช้อลูมิเนียม เนื่องจากในน้ำเสียจริงประกอบด้วยสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes) และชนิดผสม (Mixture dyes) เป็นส่วนใหญ่
3. ค่าพีเอชเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีย้อมของกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า โดยที่พีเอช 10 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีย้อมสูงสุดคิด

เป็น 65 และ 96 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที ขณะที่การเดินระบบด้วยค่าพีเอช เริ่มต้นต่ำกว่า 10 จะใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 2 – 3 เท่า

Shaima และคณะ (2014) ศึกษาการบำบัดโครเมียมในน้ำใต้ดินโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่สภาวะการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศทำจากอะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 52 เซนติเมตร ปริมาตร 1,470 มิลลิลิตร ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็ก ลักษณะเป็นแท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 เซนติเมตร และยาว 39 เซนติเมตร มีพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยา 65.6 ตารางเซนติเมตร เป็นขั้วแอโนด และขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็ก ลักษณะเกลียว ยาว 4 เมตร เป็นขั้วแคโทด ติดตั้งชุดการทดลองดังรูปที่ 2-24 โดยเติมน้ำเสียในถังปฏิกิริยาปริมาตร 1,100 มิลลิลิตร สำหรับเริ่มเดินระบบ



รูปที่ 2-24 ชุดการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเกลียว-แท่ง (Shaima และคณะ, 2014)

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำขาเข้า (30, 90 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที) อัตราไหลของอากาศ (0, 2 และ 4 ลิตรต่อนาที) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (3.04, 7.61 และ 15.21 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (2, 5, 8 และ 10)

ผลการทดลองพบว่า

1. ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงขึ้น เมื่ออัตราการไหลของอากาศและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้าสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมลดลง

2. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโครเมียมในน้ำใต้ดินตัวอย่างคือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเท่ากับ 8 ที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 30 มิลลิลิตรต่อนาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.61 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมในน้ำตัวอย่างได้ 100 เปอร์เซ็นต์

3. มีความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ากำจัดไอออนของโลหะอื่นๆที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ เช่น แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) และโครเมียม (Cr) เป็นต้น

ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ผู้แต่ง	ชนิดของน้ำเสีย	รูปแบบถังปฏิกริยา	สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของระบบ
Kobya และคณะ (2006)	น้ำเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์ปีก	ถังปฏิกริยาแบบกวนผสม (Stirred Tank)	<ol style="list-style-type: none"> ใช้แผ่นอลูมิเนียมและเหล็กเป็นขั้วแอโนดสำหรับบำบัดซีโอติและไขมัน ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะเวลาทำปฏิกริยา 25 นาที บำบัดซีโอติและไขมันได้ 92 และ 98 เปอร์เซ็นต์
Bensadok และคณะ (2008)	น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด	ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column reactor)	<ol style="list-style-type: none"> ใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียอยู่ในช่วง 6-7 บำบัดซีโอติและความขุ่นได้ 92 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นน้ำมันตัด 20 กรัมต่อลิตร
Heidmann และคณะ (2008)	น้ำเสียปนเปื้อนโครเมียม	ถังปฏิกริยาแบบกวนผสม (Stirred Tank)	<ol style="list-style-type: none"> ใช้แผ่นเหล็กเจาะรูเป็นขั้วไฟฟ้า ช่วงค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม (0.05-1 แอมแปร์) ระยะเวลาทำปฏิกริยา 45 นาที กำจัดโครเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชนิดของน้ำเสีย	รูปแบบถังปฏิกริยา	สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของระบบ
Muftah และคณะ (2009)	น้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม	ถังปฏิกริยาแบบกวนผสม (Stirred Tank)	<ol style="list-style-type: none"> ใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 13 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 8 บำบัดซีโอดีและซัลเฟตได้ 63 และ 93 เปอร์เซ็นต์
Malakootian และคณะ (2010)	ความกระด้างในน้ำประปา	ถังปฏิกริยาแบบกวนผสม (Stirred Tank)	<ol style="list-style-type: none"> ใช้เหล็กในรูปแบบแท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรเป็นขั้วไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำประปาเท่ากับ 10 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะเวลาทำปฏิกริยา 60 นาที กำจัดความกระด้างทั้งหมด (Total hardness) และความกระด้างจากแคลเซียม (Calcium hardness) ได้ 98.2 และ 97.4 เปอร์เซ็นต์
Chenik และคณะ (2013)	น้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม	ถังปฏิกริยาแบบอากาศศยที่มีการไหลเวียนภายนอก (External loop airlift reactor)	<ol style="list-style-type: none"> ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจริง ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 10 ระยะเวลาทำปฏิกริยา 90 นาที บำบัดซีโอดีและสีย้อมได้ 65 และ 96 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาระบบการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชนิดของน้ำเสีย	รูปแบบถังปฏิกริยา	สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของระบบ
Shaima และคณะ (2014)	น้ำใต้ดินปนเปื้อนโครเมียม	ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column reactor)	<ol style="list-style-type: none"> ใช้เหล็กในรูปแบบแท่งและเหล็กในรูปแบบเกลียวเป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดตามลำดับ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเท่ากับ 8 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.61 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 30 มิลลิลิตรต่อนาที กำจัดโครเมียมในน้ำตัวอย่างได้ 100 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า หรือกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าสามารถใช้บำบัดน้ำเสียหลายชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถดำเนินการได้ในถังปฏิกริยาหลากหลายรูปแบบ เช่น ถังปฏิกริยาแบบกวนผสม ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และถังปฏิกริยาแบบอากาศยก โดยได้มีการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ อาทิ ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่น แผ่นเจาะรู แบบแท่ง และแบบเกลียว แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่มีการเปรียบเทียบระหว่างขั้วไฟฟ้าแต่ละรูปแบบ รวมถึงยังไม่มีการศึกษาในรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา หรือตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เช่น พื้นที่ผิวสัมผัส ความเร็วในการลอยตัว และการกระจายของฟองอากาศ เป็นต้น จึงเป็นแนวคิดในงานวิจัยนี้ที่จะศึกษาอิทธิพลของชนิดและรูปแบบของขั้วไฟฟ้าต่อตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์และรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

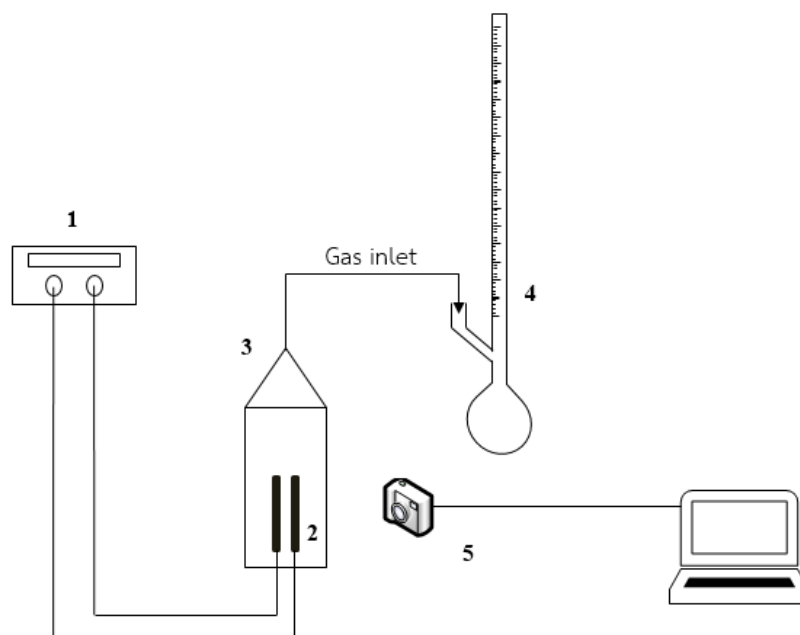
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

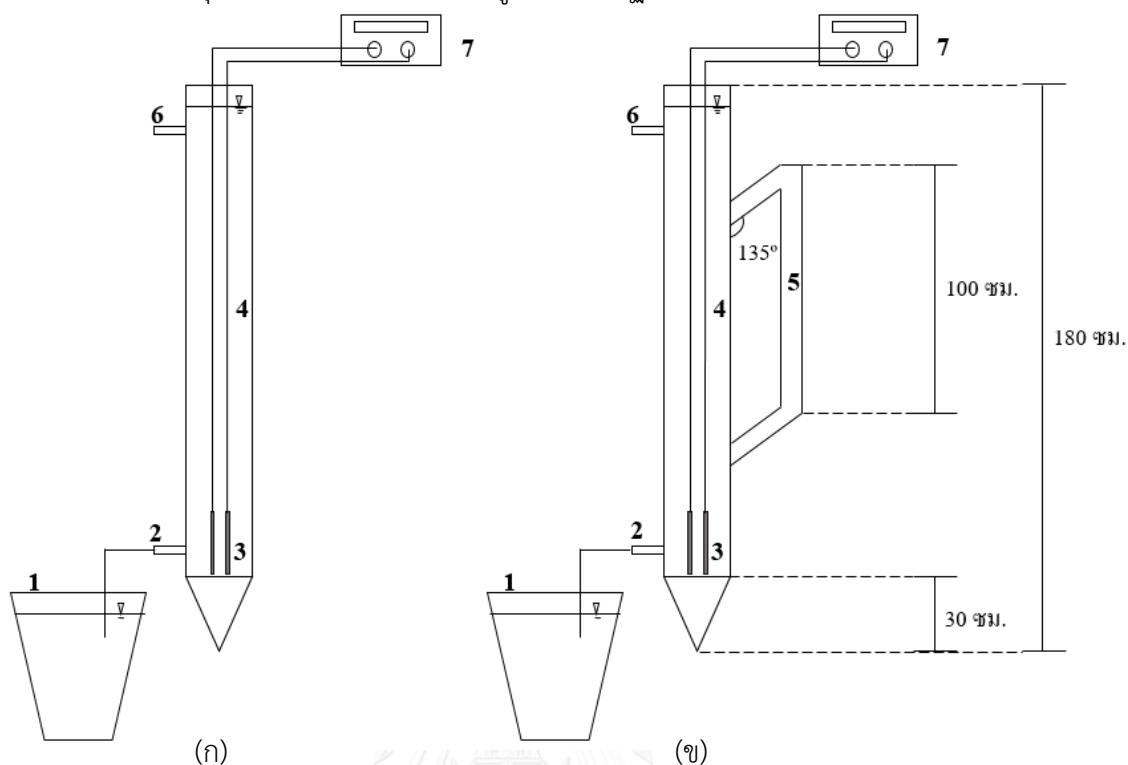
ชุดการทดลองสำหรับศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าต่อตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์



- 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)
- 2) ขั้วไฟฟ้า (Electrodes)
- 3) คอลัมน์ทดลอง (Test column)
- 4) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองสบู่ (Soap film meter)
- 5) กล้องถ่ายภาพดิจิทัลความเร็วสูง (High speed camera)

รูปที่ 3-1 แผนผังแสดงการจัดเตรียมชุดอุปกรณ์ในการศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าต่อตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์

ชุดการทดลองสำหรับศึกษาแบบถังปฏิกรณ์



- | | |
|-------------------------------|---|
| 1) ถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ | 5) บริเวณไม่เติมอากาศ (Downcomer) |
| 2) ทางน้ำเข้า (Inlet) | 6) ทางน้ำออก (Outlet) |
| 3) ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) | 7) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) |
| 4) บริเวณเติมอากาศ (Riser) | |

รูปที่ 3-2 แผนผังแสดงการจัดเตรียมชุดอุปกรณ์ในการทดลองกระบวนการรวมตะกอนและการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ก) และแบบอากาศยก (ข)

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ามี 2 รูปแบบ คือ

1. ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column reactor, BCR) ลักษณะเป็นคอลัมน์ทรงกระบอกทำจากอะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร และมีบริเวณเติมอากาศ (Riser zone) สูง 180 เซนติเมตร โดยวางขั้วไฟฟ้าเหนือถังปฏิกรณ์ 30 เซนติเมตร
2. ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Airlift reactor, ALR) ลักษณะเป็นคอลัมน์ทรงกระบอกทำจากอะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร บริเวณเติมอากาศ (Riser zone) สูง 180 เซนติเมตร และมีบริเวณไม่เติมอากาศ (Downcomer zone) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร โดยวางขั้วไฟฟ้าเหนือถังปฏิกรณ์ 30 เซนติเมตร (Mongkolnauwarat, 2014)

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์ในการศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าต่อตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ ดังรูปที่ 3-1
2. ชุดอุปกรณ์ในการทดลองกระบวนการรวมตะกอนและการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) ดังรูปที่ 3-2
3. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากอลูมิเนียม แกรไฟต์ และไทเทเนียม
4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ให้ความต่างศักย์สูงสุด 63 โวลต์
5. อุปกรณ์สำหรับติดตั้งขั้วไฟฟ้า
6. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 25 ลิตรต่อชั่วโมง บริษัท New-Flow Technologies
7. เครื่องปั่นกวนสำหรับเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
8. เครื่องวัดความขุ่น รุ่น 2100P ยี่ห้อ Hach
9. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible pump) รุ่น HL-101 ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 50 ลิตรต่อนาที ยี่ห้อ Win
10. ถังพลาสติก ขนาด 25 และ 60 ลิตร
11. เครื่องวัดค่าพีเอช รุ่น CG840 บริษัท Scientific Promotion
12. กล้องจุลทรรศน์ รุ่น YS2-H บริษัท Nikon
13. นาฬิกาจับเวลา บริษัท KADIO รุ่น KD-2015
14. กล้องถ่ายรูปดิจิตอล รุ่น Coolpix L18 บริษัท Nikon
15. ชุดทดสอบจาร์เทสต์
16. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
17. สายไฟ ชนิดสายเดี่ยวและสายคู่
18. ไม้บรรทัด
19. เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค
20. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม
21. เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองสบู
22. เครื่องชั่งละเอียด รุ่น ML104 บริษัท Mettler Toledo
23. อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี
 - หลอดทดลอง (Test tube) ขนาด 16 x 150 มิลลิเมตร พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluororthylene, TFE)

- ตู้อบแห้ง (Hot air oven) บริษัท Memment รุ่น 600 สามารถให้ความร้อนอยู่ระหว่าง 150 ± 2 °C
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กระจกบอทวง (Cylinder) ขนาด 200, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- ปิเปต (Pipette) ขนาด 1, 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร

3.1.3 รายการสารเคมี

1. น้ำมันตัด (Cutting oil) ยี่ห้อ Castrol Cooledge ® BI บริษัท Castrol
2. น้ำมันปาล์ม (Palm oil) สำหรับการประกอบอาหาร ยี่ห้อ แว
3. ชุดสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ค่าซีไอดี
 - สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
 - สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS, $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$)
 - กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4)
 - ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
 - สารละลายเฟอโรอิน (Ferroun Indicator)
 - น้ำกลั่น
4. สารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant)
 - สารส้ม (Alum, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)
5. สารติดตาม (Tracer)
 - โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.2 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีการวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีการหรือเครื่องมือในการวิเคราะห์
1. ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์	1. วิจัยาร์เทสต์
2. คุณภาพน้ำ	2. วิธีทดสอบตามมาตรฐาน*
- ค่าพีเอช	- 4500-H ⁺ B. Electrometric Method
- ค่าความขุ่น	- 2130 B. Nephelometric Method
- ค่าซีโอดี	- 5220 C. Closed Reflux, Titrimetric Method
- ค่าความนำไฟฟ้า	- 2510 B. Laboratory Method
- อุณหภูมิ	- เทอร์โมมิเตอร์
3. ขนาดของอนุภาคน้ำมัน	3. 2560 D. Light-Scattering Method
4. อัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้า	4. น้ำหนักขั้วไฟฟ้า
5. ความหนาชั้นตะกอน	5. ไม้มรรทัด
6. ความเร็วของอากาศ	6. เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองสบู่
7. รูปแบบการไหล	7. ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก

หมายเหตุ * : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (2005)

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

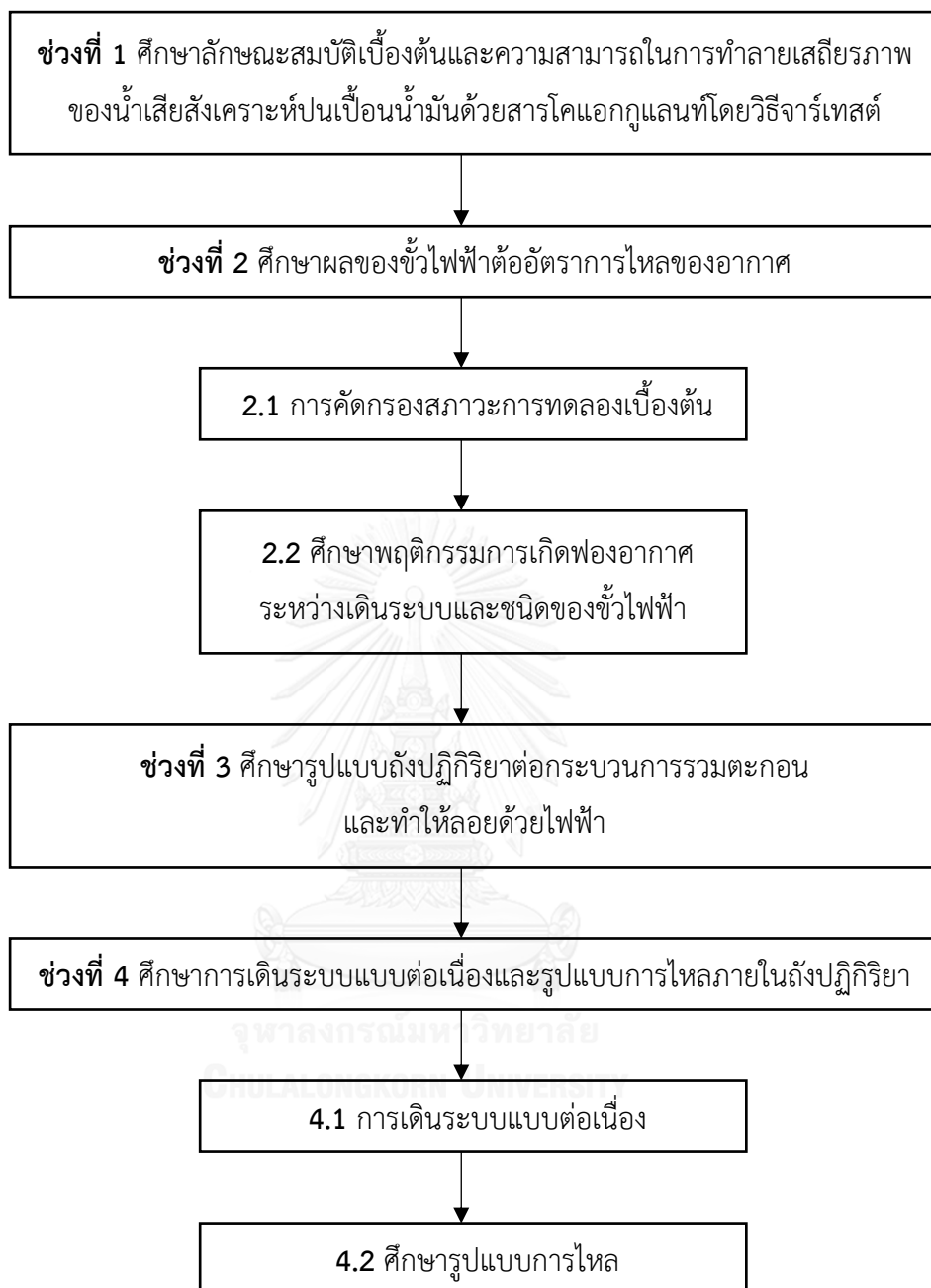
น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม โดยมีความเข้มข้นของน้ำมัน 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ปั่นกวนกับน้ำประปาที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน และความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันด้วยสารโคแอกกูแลนต์โดยวิธีจาร์เทสต์

การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองต่ออัตราการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองสบู่ โดยใช้ขั้วลุ่มิเนียมรูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรู แท่ง และเกลียว จำนวน 2 และ 4 แผ่น ทำการทดลองที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1, 2 และ 3 เซนติเมตร ค่ากระแสไฟฟ้า 0.75, 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ และนำสภาวะการทดลองที่ได้มาทดลองเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอีก 2 ชนิด คือ ไทเทเนียม และแกรไฟต์ สำหรับศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม วิเคราะห์ผลโดยอาศัยหลักการของการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) ในการคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม เช่น รูปแบบขั้ว จำนวนแผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

การทดลองช่วงที่ 3 ศึกษารูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยใช้รูปแบบขั้ว จำนวนแผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าจากการทดลองช่วงที่ 2 เตินระบบแบบทีละเทเปรียบเทียบบระหว่างถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก โดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี ความขุ่น พีเอช ลักษณะของชั้นตะกอนด้านบน และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด

การทดลองช่วงที่ 4 ศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องและรูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัด รูปแบบการไหลด้วยฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution, RTD)



รูปที่ 3-3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

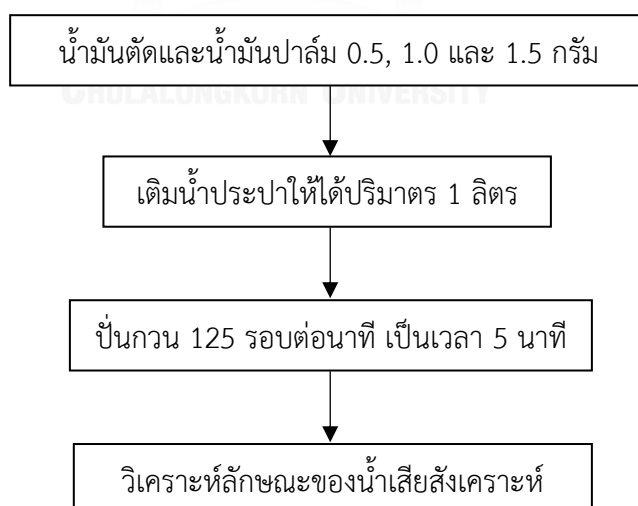
3.3.1 ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นและความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยสารโคแอกกูแลนต์โดยวิธีจาร์เจสต์

การทดลองที่ 1.1 ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม

ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-2 และแผนผังการทดลองแสดงดังรูปที่ 3-4

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	1. น้ำประปา
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำมัน	1. น้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม
2. ความเข้มข้นของน้ำมัน	2. 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	1. ค่าซีไอดี และความขุ่น
2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	2. เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค
3. พีเอช	3. พีเอช



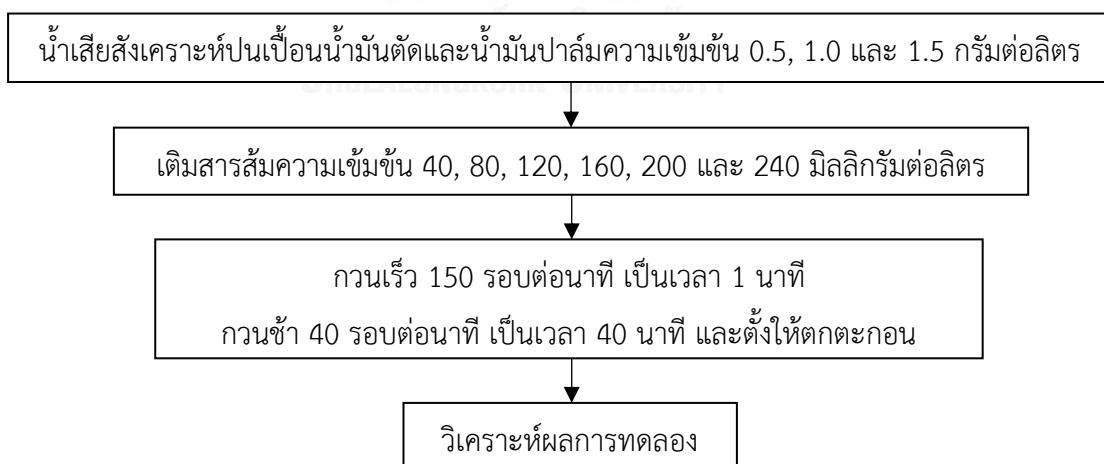
รูปที่ 3-4 แผนผังการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน

การทดลองที่ 1.2 ศึกษาปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม

ทำการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมโดยวิธีจาร์เจสต์ โดยเติมสารส้มลงในน้ำเสียความเข้มข้น 40, 80, 120, 160, 200 และ 240 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้า 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที และตั้งให้ตกตะกอน 30 นาที จากนั้นนำส่วนใสของน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ด้วยแปรดังตารางที่ 3-3 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-5

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรในการศึกษาปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 2. สารโคแอกกูแลนต์	1. 1 ลิตร 2. สารส้ม
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำมัน 2. ความเข้มข้นของน้ำมัน 3. ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์	1. น้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม 2. 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร 3. 40, 80, 120, 160, 200 และ 240 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	1. ค่าซีไอดี พีเอช และความขุ่น

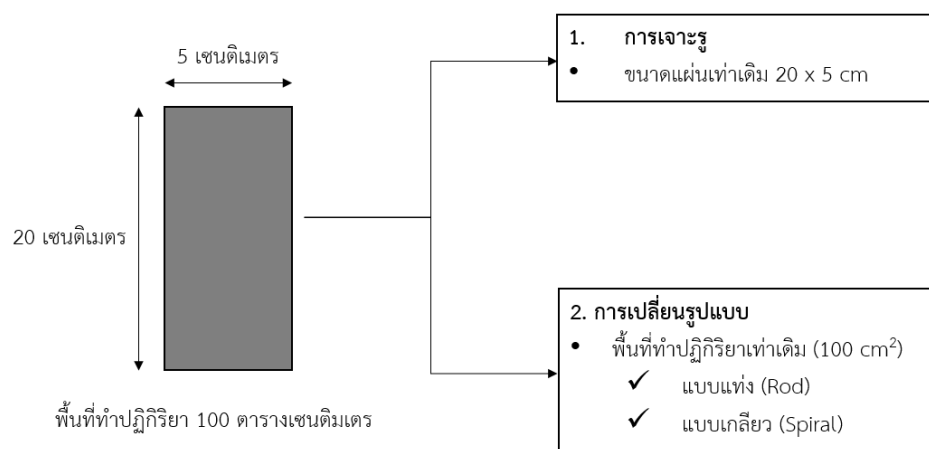


รูปที่ 3-5 แผนผังการศึกษาปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ

3.3.2 ศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการไหลของอากาศ

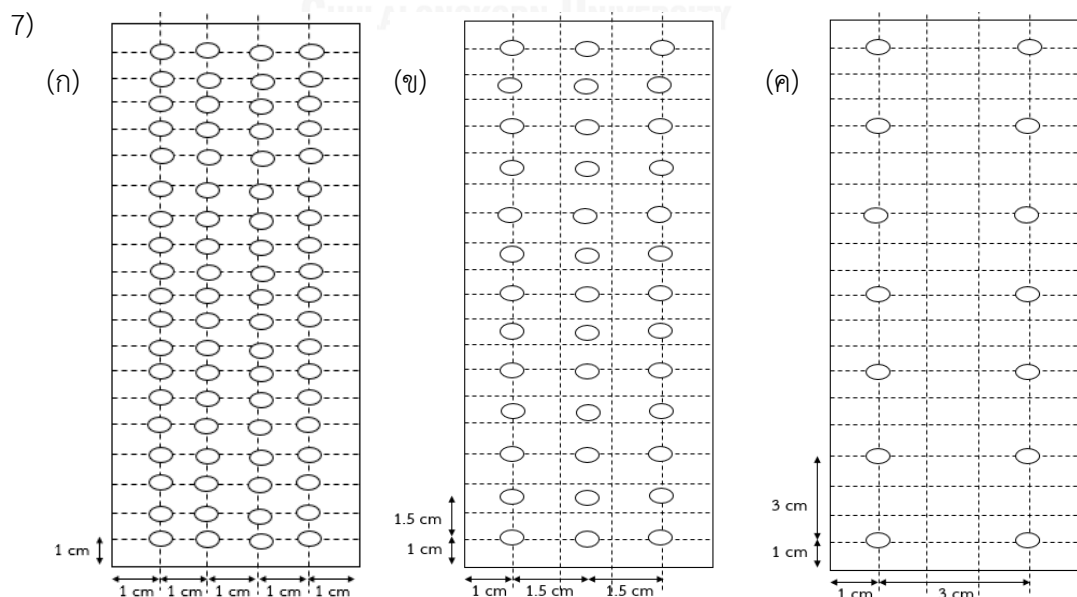
การทดลองที่ 2.1 ศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองต่ออัตราการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองสบู่

ศึกษารูปแบบขั้วไฟฟ้า ออกแบบขั้วไฟฟ้า 3 รูปแบบ ได้แก่ แผ่นเจาะรู แท่ง และเกลียว ใช้ลวดมิกเนียมรูปแบบแผ่น (กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา 100 ตารางเซนติเมตร และพื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้า 10 ตารางเซนติเมตร) เป็นเกณฑ์ในการออกแบบ โดยอาศัยวิธีการเจาะรูซึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดฟองอากาศเนื่องจากพื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนรูปแบบซึ่งส่งผลต่อการกวนผสมในระบบ ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 การออกแบบขั้วไฟฟ้า

1. แผ่นเจาะรู (ขนาดเท่ากับขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น) มีปัจจัยในการออกแบบ ได้แก่ ขนาดรู 0.1, 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1.0, 1.5 และ 3.0 เซนติเมตร (รูปที่ 3-7)



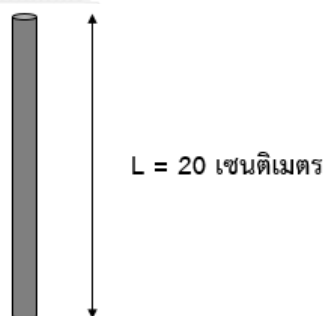
รูปที่ 3-7 แผ่นเจาะรูที่ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร (ก) 1.5 เซนติเมตร (ข) และ 3 เซนติเมตร (ค)

โดยการเจาะรูขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบจะมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ทำปฏิกิริยาและพื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้างดงตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 พื้นที่ทำปฏิกิริยาและพื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นเจาะรู

แผ่นเจาะรู	ระยะห่างระหว่างรู (เซนติเมตร)	ขนาดรู (เซนติเมตร)		
		0.1	0.3	0.5
1. พื้นที่ทำปฏิกิริยา (ตารางเซนติเมตร)	1	99.4	94.6	85.1
	1.5	99.7	97.2	92.4
	3	99.9	99.0	97.3
2. พื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้า (ตารางเซนติเมตร)	1	4.77	14.3	23.9
	1.5	2.45	7.35	12.2
	3	0.88	2.64	4.40

2. รูปแบบแท่ง มีปัจจัยในการออกแบบ ได้แก่ พื้นที่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 100 ตารางเซนติเมตร และความยาว 20 เซนติเมตร (เท่ากับขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น) จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3-8



\varnothing : 1.6 เซนติเมตร

พื้นที่ทำปฏิกิริยา (A) = 100 ตารางเซนติเมตร

รูปที่ 3-8 ขั้วไฟฟ้าแบบแท่งที่ใช้ในการทดลอง

3. รูปแบบเกลียว ช่วยการกวนผสมของระบบให้ดีขึ้น (Shaima และคณะ, 2014) โดยมีปัจจัยในการออกแบบ ได้แก่ พื้นที่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 100 ตารางเซนติเมตร (เท่ากับขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น) ที่ความยาว 53 และ 68 เซนติเมตร จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 และ 0.46 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3-9

(ก)



Ø : 0.46 เซนติเมตร

L : 68 เซนติเมตร

พื้นที่ทำปฏิกิริยา (A) = 100 ตารางเซนติเมตร

(ข)



Ø : 0.60 เซนติเมตร

L : 53 เซนติเมตร

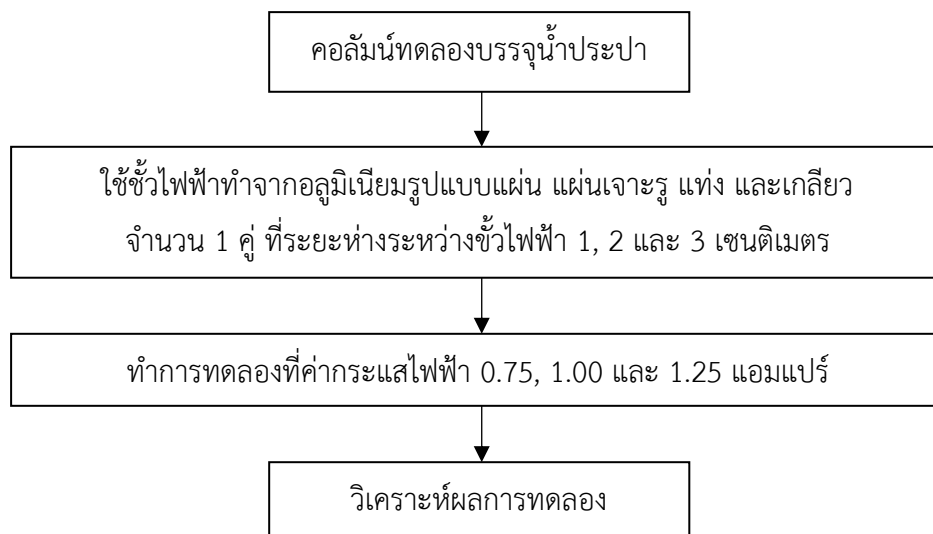
พื้นที่ทำปฏิกิริยา (A) = 100 ตารางเซนติเมตร

รูปที่ 3-9 ขั้วไฟฟ้าแบบเกลียวที่มีความยาว 68 เซนติเมตร (ก) และ 53 เซนติเมตร (ข)

ศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม ทำการทดลองกับน้ำประปาในคอลัมน์ทดสอบ โดยใช้อลูมิเนียมรูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรู แท่ง เป็นทั้งขั้วแอโนดและแคโทด ยกเว้นรูปแบบเกลียวใช้เป็นเฉพาะขั้วแคโทดจับคู่กับรูปแบบแท่งเป็นขั้วแอโนด เนื่องจากต้องการศึกษารูปแบบของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกันต่ออัตราการเกิดฟองอากาศ อาศัยหลักการของการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) ในการคัดกรองสภาวะที่เหมาะสม เช่น รูปแบบขั้ว จำนวนของขั้วแอโนดหรือแคโทด (1 และ 2 แผ่น) ระยะห่างระหว่างขั้ว (1, 2 และ 3 เซนติเมตร) และค่ากระแสไฟฟ้า (0.75, 1.00 และ 1.25 แอมแปร์) เป็นต้น วิเคราะห์ตัวแปรดังตารางที่ 3-5 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-10

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ 2. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 3. จำนวนของขั้วไฟฟ้า	1. น้ำประปา 2. อลูมิเนียม 3. 1 คู่
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. รูปแบบของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3. ค่ากระแสไฟฟ้า	1. แผ่น แผ่นเจาะรู เกลียว และแท่ง 2. 1, 2 และ 3 เซนติเมตร 3. 0.75, 1.00 และ 1.25 แอมแปร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของอากาศ 2. ความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลว 3. อัตราการก่อตัวของขั้วไฟฟ้า	1. อัตราการไหลของอากาศ 2. ค่าความปั่นป่วน 3. น้ำหนักขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 3-10 แผนผังการศึกษารูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม
ต่ออัตราการไหลของอากาศ

โดยตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของอากาศ และความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลว
สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. อัตราการไหลของอากาศ (Q_g)

$$Q_g = \frac{\Delta V}{t} \quad (3-1)$$

เมื่อ	Q_g	=	อัตราการไหลของอากาศ (ml/s)
	ΔV	=	ระยะห่างของจุดสังเกตการณ์บนเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟอง สบู่ (ml)
	t	=	เวลาที่ฟองสบู่เคลื่อนที่ (s)

2. ค่าความปั่นป่วนหรือความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลว (G)

$$G = \sqrt{\frac{P_c}{\mu V}} \quad (3-2)$$

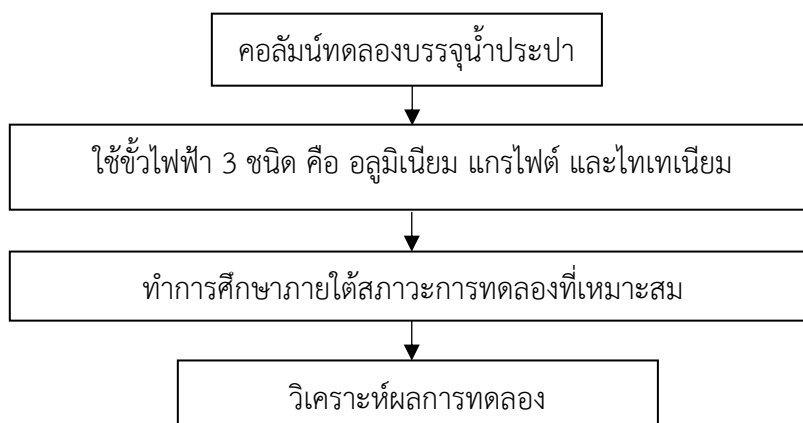
$$P_c = K Q_a \ln\left(\frac{h+10.33}{10.33}\right) \quad (3-3)$$

เมื่อ	G	=	ค่าความปั่นป่วน (s ⁻¹)
	μ	=	ความหนืดจำเพาะของน้ำ (kg/m•s)
	V	=	ปริมาตรน้ำ (m ³)
	P _c	=	อัตราการให้พลังงาน (watts)
	K	=	ค่าคงที่เท่ากับ 3,904
	Q _a	=	อัตราการไหลของอากาศ (m ³ /min)
	h	=	ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศถึงผิวน้ำ (m)

ศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า ทำการทดลองกับน้ำประปาในคอลัมน์ทดสอบภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการศึกษารูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองก่อนหน้านี้ที่ให้อัตราการไหลของอากาศสูงสุดและมีอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้าต่ำ เพื่อศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ให้อัตราการไหลของอากาศสูงสุด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ อลูมิเนียม แกรไฟต์ และไทเทเนียม (เป็นขั้วแอโนดและแคโทด) วิเคราะห์ตัวแปรดังตารางที่ 3-6 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-11

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	1. น้ำประปา
2. ค่ากระแสไฟฟ้า	2. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม
3. รูปแบบของขั้วไฟฟ้า	3. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม
4. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	4. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า	1. อลูมิเนียม แกรไฟต์ และไทเทเนียม
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของอากาศ	1. อัตราการไหลของอากาศ
2. ความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลว	2. ค่าความปั่นป่วน
3. อัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้า	3. น้ำหนักขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 3-11 แผนผังการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการไหลของอากาศ

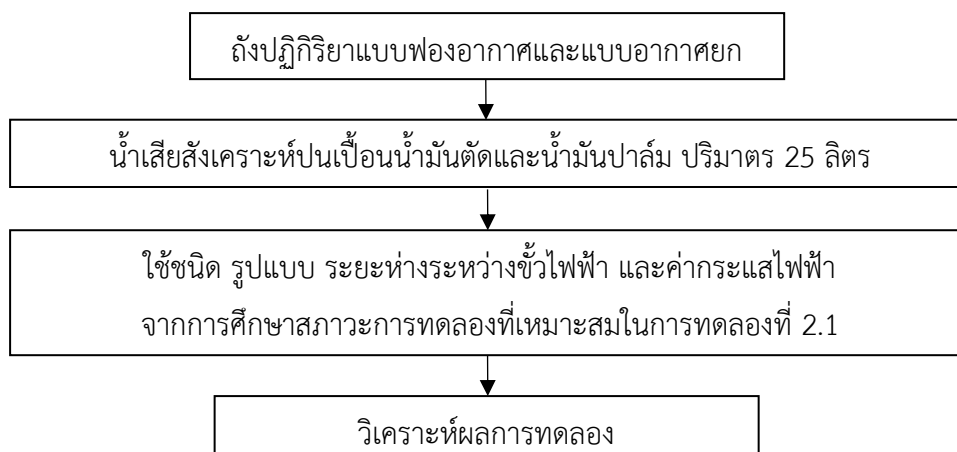
3.3.3 ศึกษาแบบถึงปฏิบัติการต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

การทดลองที่ 3.1 ศึกษาแบบถึงปฏิบัติการที่เหมาะสม

ทำการทดลองเพื่อศึกษาแบบถึงปฏิบัติการที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม และเพื่อยืนยันสภาวะการทดลองที่เหมาะสมของการขยายขนาดระบบ โดยใช้ชนิด รูปแบบขั้ว จำนวนแผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าจากการทดลองช่วงที่ 2 ทำการทดลองแบบทีละทีเปรียบเทียบกับระหว่างถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก วิเคราะห์ตัวแปรดังตารางที่ 3-7 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-12

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาแบบถึงปฏิบัติการที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า	1. จากการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม
2. รูปแบบ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	2. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม
3. ค่ากระแสไฟฟ้า	3. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์	1. น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม
2. ความเข้มข้นของน้ำมัน	2. 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร
3. รูปแบบของถึงปฏิบัติการ	3. ถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	1. ค่าซีไอดี ความขุ่น พีเอช
2. ลักษณะชั้นตะกอนด้านบน	2. ความหนาของชั้นตะกอน
3. ระยะเวลาในการบำบัด	3. ระยะเวลาในการบำบัด



รูปที่ 3-12 แผนผังการศึกษาแบบของถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสม ต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

3.3.4 ศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องและรูปแบบการไหลภายในถึงปฏิกิริยา

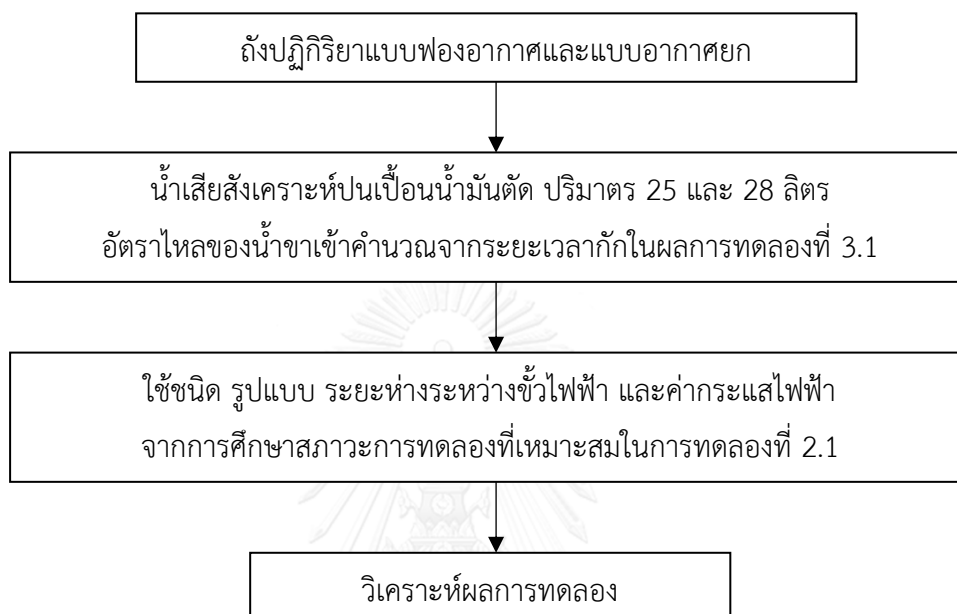
การทดลองที่ 4.1 ศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียดังเคราะห์ ใช้ชนิด รูปแบบ จำนวน ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าจากการทดลองช่วงที่ 2 วางขั้วไฟฟ้าเหนือก้นถึงปฏิกิริยา 30 เซนติเมตร โดยอัตราการไหลของน้ำขาเข้าจะคำนวณจากระยะเวลาพักในผลการทดลองช่วงที่ 3 ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก วิเคราะห์ตัวแปรดังตารางที่ 3-8 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-13

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า	1. จากการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการทดลองที่ 2.1
2. รูปแบบ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	2. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการทดลองที่ 2.1
3. ค่ากระแสไฟฟ้า	3. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการทดลองที่ 2.1
4. รูปแบบของถึงปฏิกิริยา	4. ถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำเสียดังเคราะห์	1. น้ำเสียดังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม
2. ความเข้มข้นของน้ำมัน	2. 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร
3. อัตราการไหลของน้ำขาเข้า	3. คำนวณจากระยะเวลาพักในผลการทดลองที่ 3.1

ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพน้ำ	1. ค่าซีไอดี ความขุ่น พีเอช อุณหภูมิ
2. ลักษณะชั้นตะกอนด้านบน	2. ความหนาของชั้นตะกอน
3. ระยะเวลาในการบำบัด	3. ระยะเวลาในการบำบัด



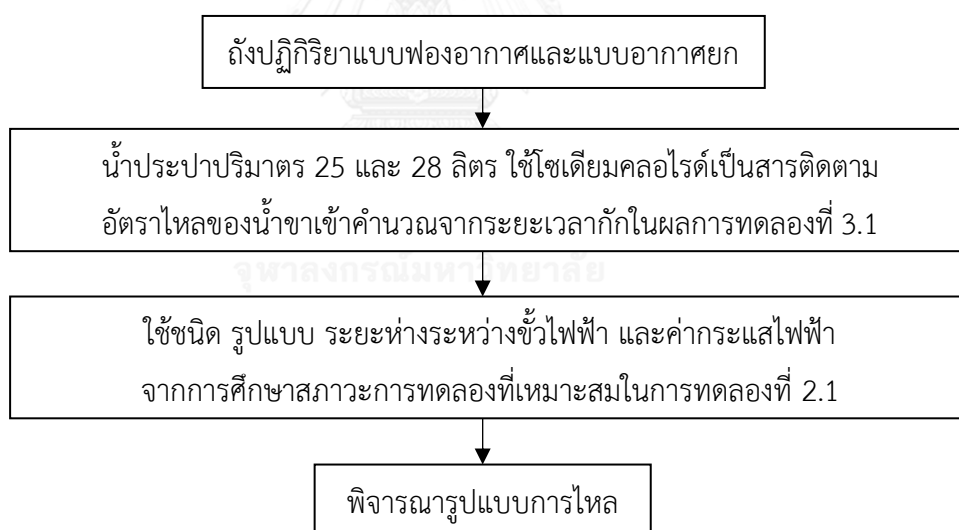
รูปที่ 3-13 แผนผังการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องของกระบวนการรวมตะกอน
และทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

การทดลองที่ 4.2 ศึกษาแบบการไหลภายในถังปฏิบัติการ

ทำการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลด้วยน้ำประปา โดยใช้ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.1 ใช้ชนิดรูปแบบ จำนวน ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าจากการทดลองช่วงที่ 2 วางขั้วไฟฟ้าเหนือกันถังปฏิบัติการ 30 เซนติเมตร ศึกษาแบบการไหลด้วยฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution, RTD) โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารติดตาม (Tracer) ทำการวิเคราะห์ตัวแปรดังตารางที่ 3-9 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-14

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. รูปแบบ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3. ค่ากระแสไฟฟ้า 4. ชนิดของสารติดตาม	1. จากการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการทดลองที่ 2.1 2. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการทดลองที่ 2.1 3. จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการทดลองที่ 2.1 4. โซเดียมคลอไรด์
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. รูปแบบของถังปฏิกรณ์ 2. อัตราการไหลของน้ำขาเข้า	1. ถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศและแบบอากาศยก 2. คำนวณจากระยะเวลากักในผลการทดลองที่ 3.1
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. รูปแบบการไหล	1. ค่าความนำไฟฟ้า



รูปที่ 3-14 แผนผังการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศและแบบอากาศยก

จากหัวข้อการทดลองข้างต้นในงานวิจัยนี้ ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองจะสามารถระบุรูปแบบของขั้วไฟฟ้า ชนิดของขั้วไฟฟ้า สภาวะการทดลอง และรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวต่อไปในส่วนของผลการทดลองและวิจารณ์

บทที่ 4

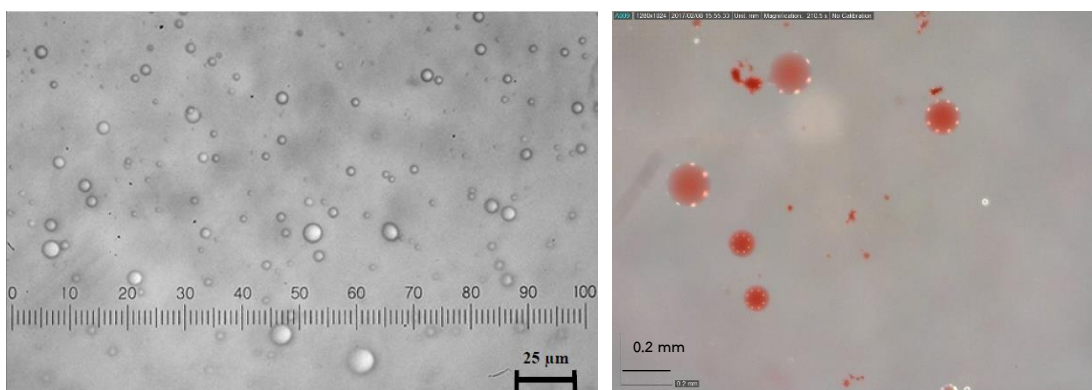
ผลการทดลองและวิจารณ์

ในส่วนนี้ นำเสนอผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอน และทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก (งานวิจัยนี้ขอเรียกรวมว่าถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก) โดยการศึกษาวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษา ลักษณะสมบัติเบื้องต้นและความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยสารโคแอกกูแลนต์โดยวิธีจาร์เทสต์ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า ได้แก่ รูปแบบของขั้วไฟฟ้า ชนิดของขั้วไฟฟ้า จำนวนแผ่นของขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อให้ได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม จากนั้นทำการเดินระบบแบบทีละเทและแบบต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก และศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิดด้วยฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก เพื่ออธิบายกลไกการทำงานที่เกิดขึ้น

4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นและความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยสารโคแอกกูแลนต์โดยวิธีจาร์เทสต์

4.1.1 ลักษณะและองค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำเสียสังเคราะห์น้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มเพื่อเป็นตัวแทนของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวและไม่มีสารลดแรงตึงผิว ตามลำดับ โดยน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันเตรียมจากน้ำมันตัด Castrol Cooledge BI (มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว) และน้ำมันปาล์มสำหรับการประกอบอาหาร (ไม่มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว) ที่ความเข้มข้นของน้ำมัน 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ปั่นกวนกับน้ำประปา (มีค่าพีเอชเริ่มต้นประมาณ 7.30) ที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที นาน 5 นาที (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาเบื้องต้น ได้แก่ ความขุ่น ค่าซีโอดี พีเอช และขนาดของอนุภาคน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 4-1 และตารางที่ 4-1



(ก)

(ข)

รูปที่ 4-1 ขนาดอนุภาคน้ำมันตัด (ก) และน้ำมันปาล์ม (ข) ในน้ำเสียดังเคราะห์เริ่มต้น

จากรูปที่ 4-1 แสดงรูปถ่ายขนาดอนุภาคน้ำมันตัด (ชญาสิน พรหมจันทร์, 2554) และอนุภาคน้ำมันปาล์มเริ่มต้นในน้ำเสียดังเคราะห์ พบว่าอนุภาคน้ำมันตัดส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร เนื่องจากในน้ำมันตัดมีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้อนุภาคน้ำมันมีเสถียรภาพ สามารถแขวนลอยอยู่ในสารละลายได้เป็นระยะเวลานาน ยกต่อการแยกด้วยแรงโน้มถ่วง ขณะที่อนุภาคน้ำมันปาล์มมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคน้ำมันตัด โดยมีขนาดตั้งแต่ 22 ถึง 100 ไมโครเมตร เนื่องจากน้ำมันปาล์มไม่มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว จัดเป็นน้ำเสียดังเคราะห์เป็นน้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้อนุภาคน้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพน้อย สามารถรวมตัวกันตัวเองจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกัน และมีแนวโน้มที่จะกลับมาแยกชั้นอีกครั้งเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน

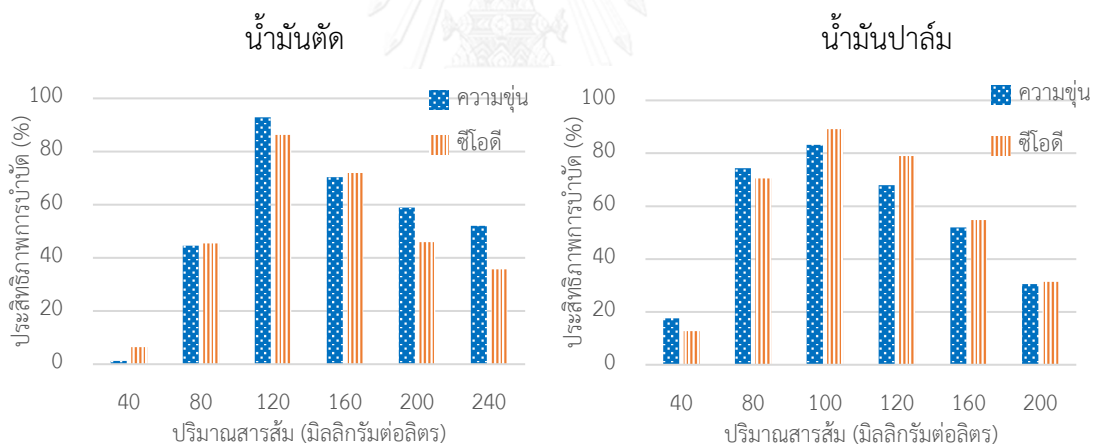
ตารางที่ 4-1 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียดังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม

ตัวแปรที่วิเคราะห์	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)		
	0.5	1.0	1.5
น้ำมันตัด			
ความขุ่น (NTU)	513 ± 41	902 ± 18	1172 ± 44
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1129 ± 44	2406 ± 217	4210 ± 215
พีเอช	7.20	7.38	7.84
น้ำมันปาล์ม			
ความขุ่น (NTU)	78 ± 1	86 ± 3	120 ± 12
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	736 ± 62	1535 ± 183	3110 ± 64
พีเอช	7.17	7.31	7.33

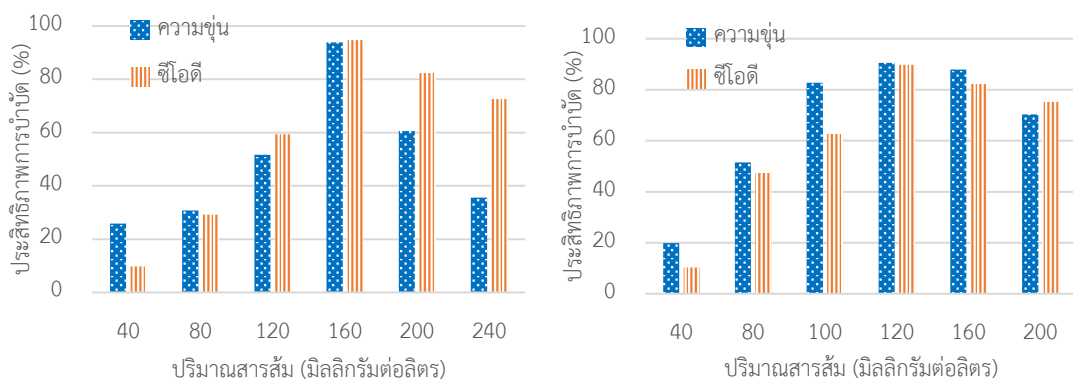
จากตารางที่ 4-1 แสดงลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน พบว่าค่าความขุ่น และซีโอดี มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำมัน (0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร) เนื่องจากที่ความเข้มข้นของน้ำมันสูงจะมือน้ำมันปริมาณมากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้ค่าความขุ่น และซีโอดี มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม ขณะที่ความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มไม่ส่งผลต่อค่าพีเอชเริ่มต้น โดยค่าพีเอชที่วัดได้เป็นค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำประปาที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

4.1.2 ศึกษาความสามารถในการทำลายเสถียรภาพโดยวิธีจาร์เทสต์

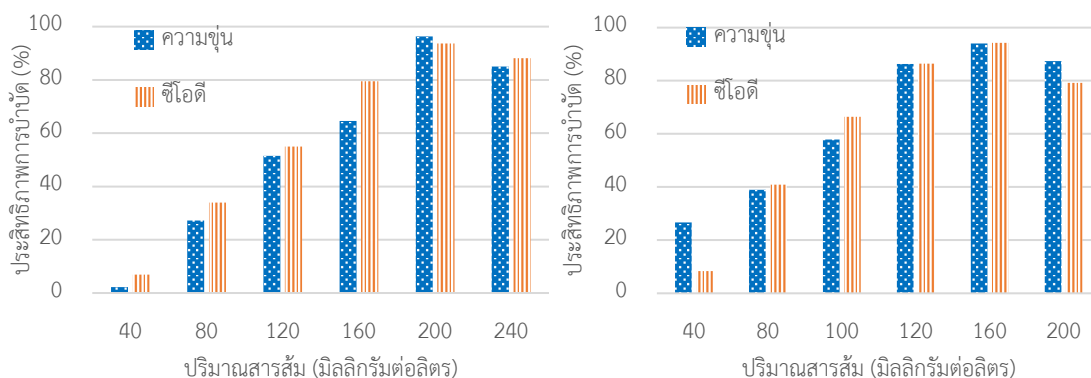
การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มด้วยสารเคมี ที่เรียกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน โดยใช้สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม โดยการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้า 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ตัวแปรที่ทำการศึกษาเบื้องต้น ได้แก่ ความขุ่น ซีโอดี และค่าพีเอช โดยผลการทดลองแสดงดังนี้



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-2 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

จากรูปที่ 4-2 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด (Mongkolnauwarat, 2014) และน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยสารส้ม ซึ่งเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูลേഷัน (มันสิน ตันตุลเวศม์, 2542) พบว่า การเพิ่มปริมาณสารส้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดี โดยการเติมสารส้มในปริมาณที่เหมาะสมจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุด เนื่องจากเกิดทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันร่วมกันระหว่างกลไกดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and charge neutralization) และกลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อเป็นที่ยึดเกาะของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) ทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามหากเพิ่มความเข้มข้นสารส้มมากเกินไปทำให้เกิดการเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้กลายเป็นประจุบวก (Charge reversal) ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง โดยปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสำหรับชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร คือ 120, 160 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์) ขณะที่ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม มีปริมาณสารส้มที่เหมาะสมได้แก่ 100, 120 และ 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของน้ำปาล์ม 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์) โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจากการเติมสารส้มในปริมาณที่เหมาะสมของชุดการทดลองน้ำมันตัดและน้ำปาล์ม ที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจากการเติมสารส้มในปริมาณที่เหมาะสมของชุดการทดลองน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม

ความเข้มข้นน้ำมัน (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสุดท้าย
น้ำมันตัด			
0.5	120	7.20	6.42
1.0	160	7.38	6.50
1.5	200	7.84	6.45
น้ำมันปาล์ม			
0.5	100	7.17	6.57
1.0	120	7.31	6.47
1.5	160	7.33	6.42

เนื่องจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟลอคคูเลชันต้องใช้สารเคมีในการบำบัดและมีโอกาสที่จะเติมสารเคมีมากเกินไป ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำบัด ดังนั้นในการทดลองส่วนต่อไปจึงทำการศึกษากระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ได้รับความสะดวกสำหรับใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงโดยไม่ต้องเติมสารเคมี

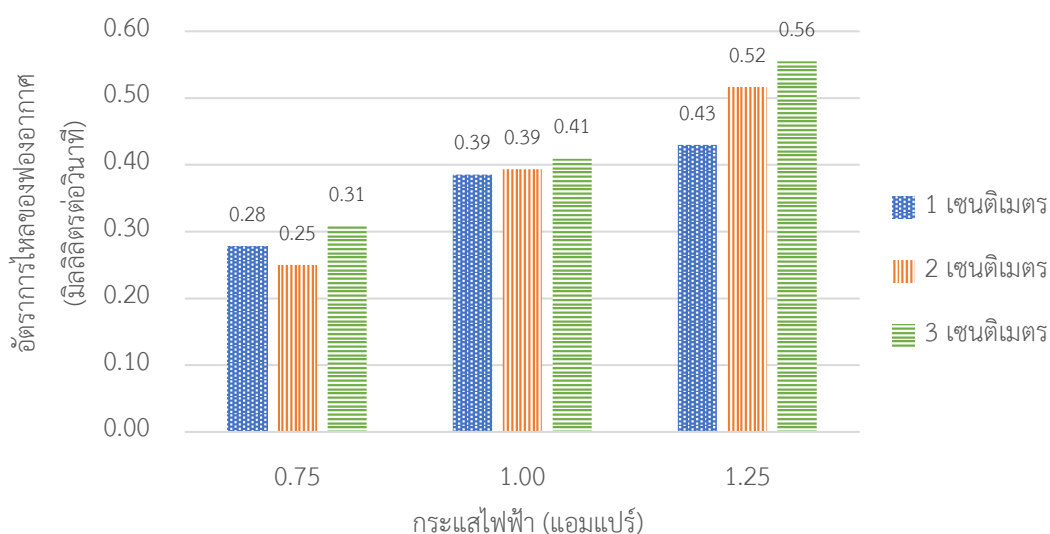
4.2 การศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองต่ออัตราการไหลของอากาศ

4.2.1 การคัดกรองรูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาหารูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ให้อัตราการไหลของอากาศสูงที่สุด ซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดฟองอากาศในปริมาณที่สูงขึ้นตามไปด้วย โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำจากอลูมิเนียมจำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรู แท่ง เป็นทั้งขั้วแอโนดและแคโทด และรูปแบบเกลียวใช้เป็นเฉพาะขั้วแคโทดจับคู่กับรูปแบบแท่งเป็นขั้วแอโนด ทำการทดลองในคอลัมน์ทดสอบบรรจุน้ำประปาภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า (0.75, 1.00 และ 1.25 แอมแปร์) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (1, 2 และ 3 เซนติเมตร) วัดอัตราการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองสปู

4.2.1.1 ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่น

ทำการทดลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นจำนวน 2 แผ่น เติมน้ำในระบบที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.75, 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1, 2 และ 3 เซนติเมตร โดยผลการทดลองแสดงดังนี้

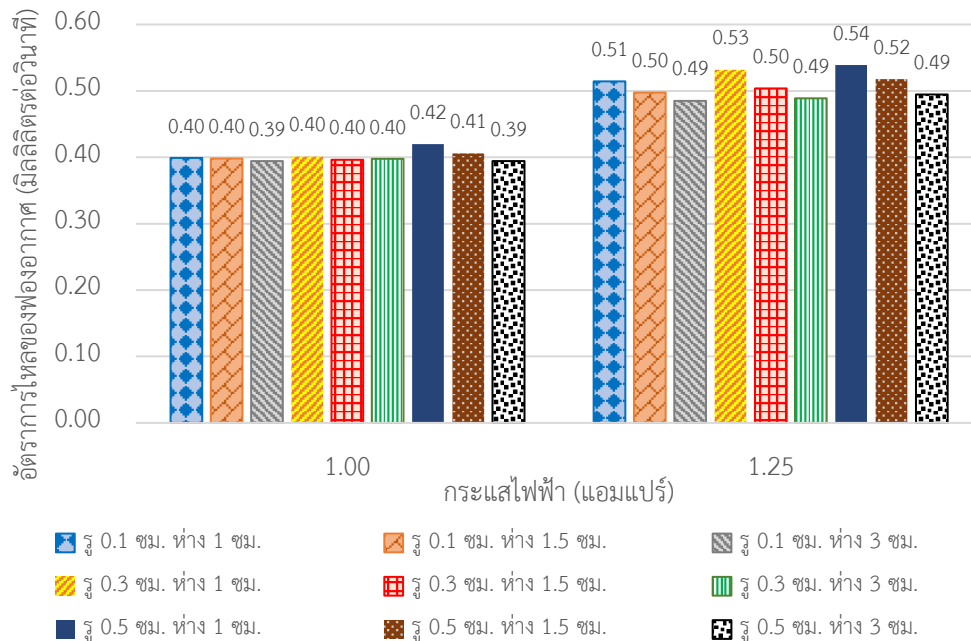


รูปที่ 4-3 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ

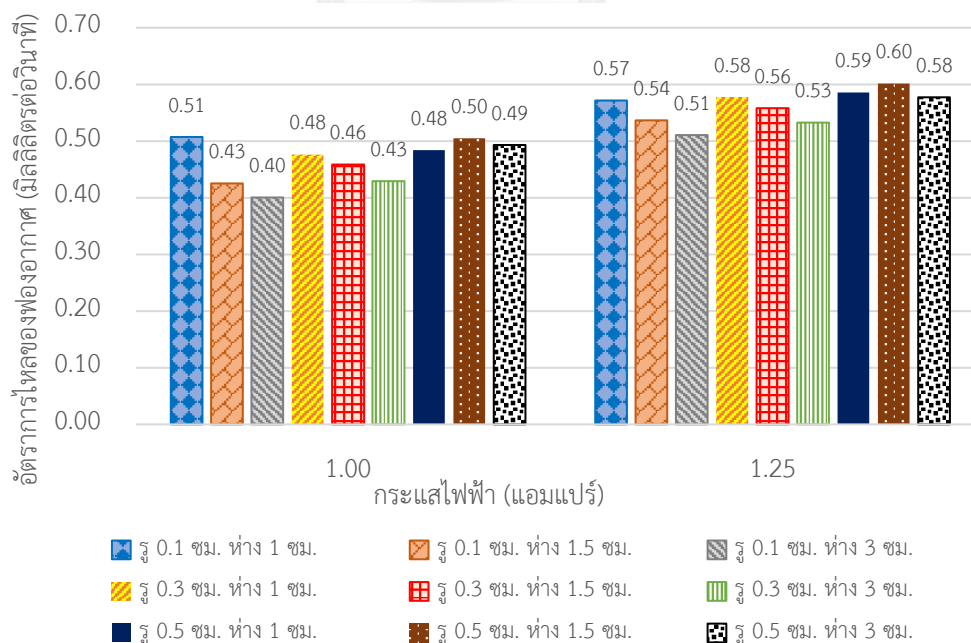
จากรูปที่ 4-3 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีผลต่ออัตราการไหลของอากาศ โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ ให้อัตราการไหลของอากาศสูงที่สุดที่ 0.56, 0.52 และ 0.43 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3, 2 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.75 และ 1.00 แอมแปร์

4.2.1.2 ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรู

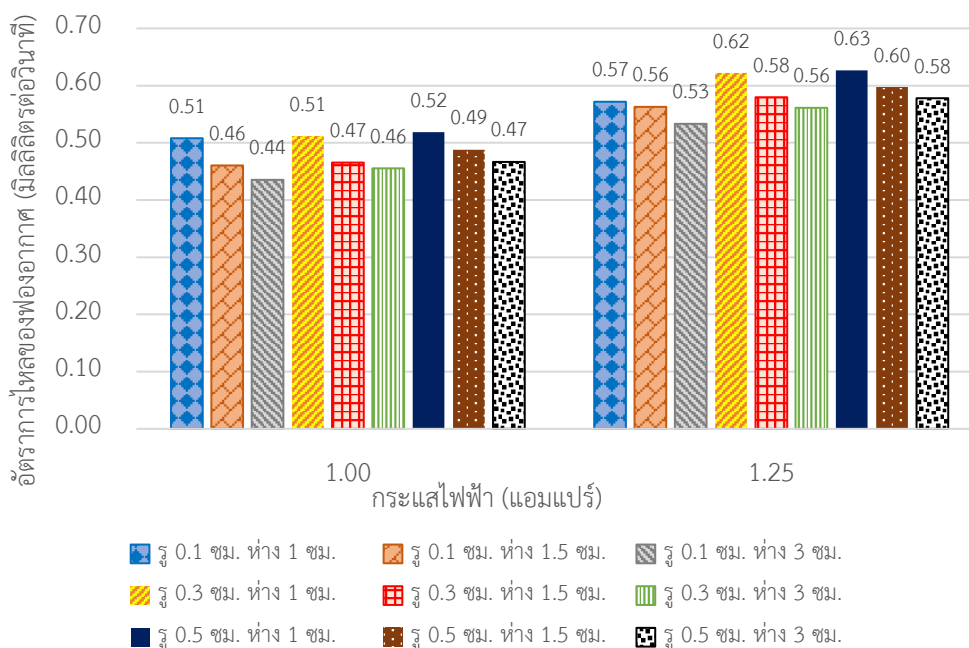
ทำการทดลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรูแบบต่างๆ ได้แก่ ขนาดรู 0.1, 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1.0, 1.5 และ 3.0 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เตินระบบที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1, 2 และ 3 เซนติเมตร โดยผลการทดลองแสดงดังนี้



(ก) ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร



(ข) ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร



(ค) ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร

รูปที่ 4-4 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร (ก) 2 เซนติเมตร (ข) และ 3 เซนติเมตร (ค) ภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ

จากรูปที่ 4-4 พบว่าอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกับการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้าแบบแผ่น โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3 เซนติเมตร ให้อัตราการไหลของอากาศสูงที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้า (Contact zone) และการกวนผสมของฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแคโทดที่เหมาะสม ขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 และ 2 เซนติเมตร มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าทำให้เกิดการกวนผสมที่ปั่นป่วน ฟองก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนเกิดการแตกตัว ส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศได้ต่ำกว่าตามไปด้วย ขณะที่รูปแบบการเจาะรูในด้านขนาดของรูและระยะห่างระหว่างรูที่แตกต่างกันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการไหลของอากาศ ซึ่งการเจาะรูแบบที่มีขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร ให้อัตราการไหลของอากาศสูงที่สุดในทุกๆ ค่ากระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตรมีค่าประมาณ 0.40 และ 0.42 มิลลิตรต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ 0.53 และ 0.54 มิลลิตรต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ แสดงในรูปที่ 4-2 (ก) ขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตรมีค่าประมาณ 0.48 และ 0.48 มิลลิตรต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์ 0.58 และ 0.59 มิลลิตรต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ แสดงในรูปที่ 4-2 (ข) และที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 3

เซนติเมตรมีค่าประมาณ 0.51 และ 0.52 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์ 0.62 และ 0.63 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ แสดงในรูปที่ 4-2 (ค) ทั้งนี้เนื่องมาจากการเจาะรูจะเพิ่มพื้นที่ขอบและลดพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าได้รับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) เพิ่มขึ้น อัตราการเกิดฟองอากาศจึงสูงขึ้นตามไปด้วย (Kuroda และคณะ 2003) โดยการเจาะรูแบบที่มีขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ขอบและพื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าสูงสุด ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 พื้นที่ทำปฏิกิริยาและพื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นเจาะรู

แผ่นเจาะรู	ระยะห่างระหว่างรู (เซนติเมตร)	ขนาดรู (เซนติเมตร)		
		0.1	0.3	0.5
1. พื้นที่ทำปฏิกิริยา (ตารางเซนติเมตร)	1	99.4	94.6	85.1
	1.5	99.7	97.2	92.4
	3	99.9	99.0	97.3
2. พื้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้า (ตารางเซนติเมตร)	1	4.77	14.3	23.9
	1.5	2.45	7.35	12.2
	3	0.88	2.64	4.40

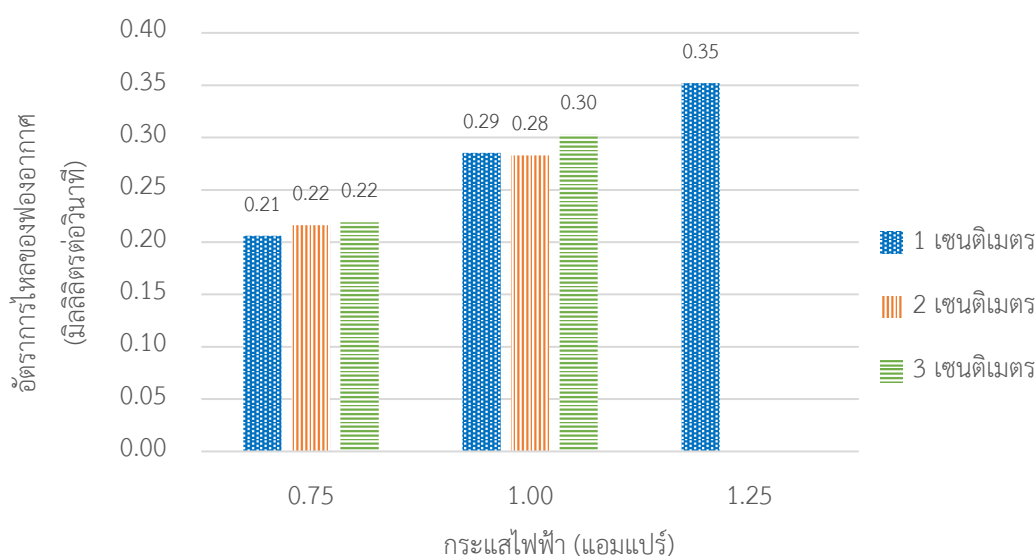
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของขั้วไฟฟารูปแบบแผ่นเจาะรูแบบต่างๆ ด้วยโปรแกรม Minitab 17 สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการไหลของอากาศภายใต้รูปแบบการเจาะรูและสภาวะการทดลองต่างๆ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9403 ดังสมการที่ 4-1

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)} & \quad (4-1) \\ & = -0.0797 + 0.004087A + 0.0423B - 0.02423C + 0.1147D - 0.01912 D^2 + 0.0195BC \end{aligned}$$

- เมื่อ
- A = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 - B = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ (เซนติเมตร)
 - C = ระยะห่างระหว่างรูที่เจาะ (เซนติเมตร)
 - D = ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (เซนติเมตร)

4.2.1.3 ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแท่ง

ทำการทดลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแท่ง จำนวน 2 แท่ง เตินระบบที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.75, 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1, 2 และ 3 เซนติเมตร โดยผลการทดลองแสดงดังนี้

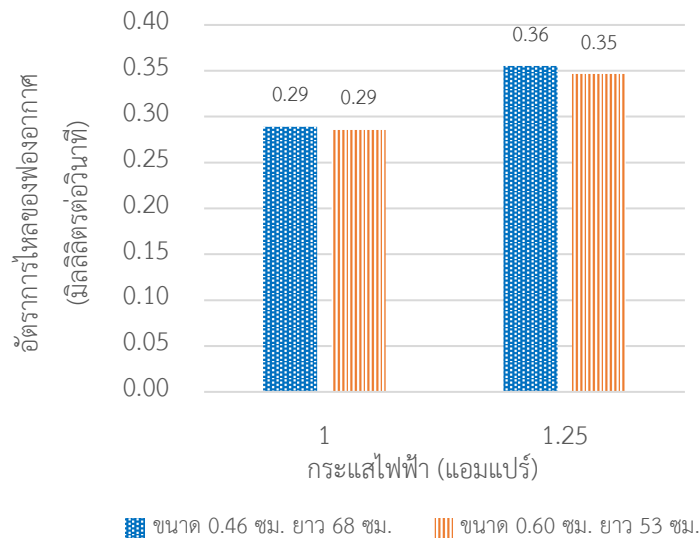


รูปที่ 4-5 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแท่งภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ

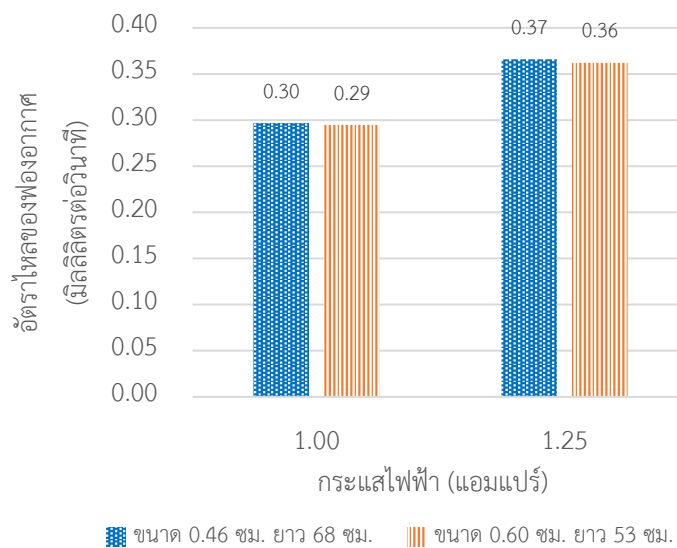
จากรูปที่ 4-5 พบว่าที่กระแสไฟฟ้า 0.75 และ 1.00 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ ทำการทดลองได้เพียงที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร โดยให้อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ประมาณ 0.35 มิลลิลิตรต่อวินาที เนื่องจากขั้วไฟฟ้ารูปแบบแท่งมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าขั้วไฟฟ้ารูปแบบอื่นๆ จึงต้องการกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นเพื่อรักษาระดับค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่ ซึ่งเกินขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ที่กำหนดศักย์ไฟฟ้ามากที่สุด 63 โวลต์ โดยเมื่อกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ 1.25 แอมแปร์ การศึกษาระยะห่างที่เพิ่มขึ้นก็ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้นตามไปด้วย (ชญาสินี พรหมจันทร์, 2554)

4.2.1.4 ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบเกลียว

ทำการทดลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบเกลียวแบบต่างๆ ได้แก่ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.46 เซนติเมตร ยาว 68 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เซนติเมตร ยาว 53 เซนติเมตร เป็นขั้วแคโทด และใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแท่งเป็นขั้วแอโนด เตินระบบที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1, 2 และ 3 เซนติเมตร โดยผลการทดลองแสดงดังนี้



(ก) ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร



(ข) ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร

รูปที่ 4-6 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบเกลียว (แคโทด) และรูปแบบแท่ง (แอโนด) ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร (ก) และ 2 เซนติเมตร (ข) ภายใต้สภาวะการทดลองต่าง ๆ

จากรูปที่ 4-6 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่แตกต่างกันของขั้วไฟฟ้ารูปแบบเกลียว และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศเนื่องจากขั้วไฟฟ้ารูปแบบเกลียวทั้ง 2 แบบ มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่เท่ากัน คือ 100 ตารางเซนติเมตร และมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่สูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทอิเล็กตรอนต่ำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณฟองก๊าซ

ไฮโดรเจนที่เกิดจากขั้วแคโทด โดยขั้วไฟฟ้ารูปแบบเกลียวทั้ง 2 แบบให้อัตราการไหลที่ใกล้เคียงกัน ประมาณ 0.29 และ 0.36 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 1 และ 2 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งในส่วนนี้ไม่สามารถทำการทดลองที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 เซนติเมตร เนื่องจากคุณสมบัติค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าขั้วไฟฟ้ารูปแบบอื่นๆ และขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) เช่นเดียวกับการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้ารูปแบบแท่ง

จากผลการคัดกรองรูปแบบของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม พบว่าปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และรูปแบบของขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร ให้อัตราการไหลของอากาศสูงที่สุดในทุกค่ากระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า รองลงมาคือขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น ขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วไม่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศเมื่อทำการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้ารูปแบบแท่งและรูปแบบเกลียว โดยผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศเมื่อทำการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้าแต่ละรูปแบบภายใต้สภาวะการทดลองต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด

อัตราการไหลของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)	ระยะห่างระหว่างขั้ว (เซนติเมตร)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	
		1.00	1.25
แผ่น - แผ่น	1	0.39	0.43
	2	0.39	0.52
	3	0.41	0.56
เจาะรู - เจาะรู	1	0.42	0.54
	2	0.48	0.59
	3	0.52	0.63
แท่ง - แท่ง	1	0.29	0.35
	2	0.28	-
	3	-	-
เกลียว - แท่ง	1	0.29	0.36
	2	0.30	0.37
	3	-	-

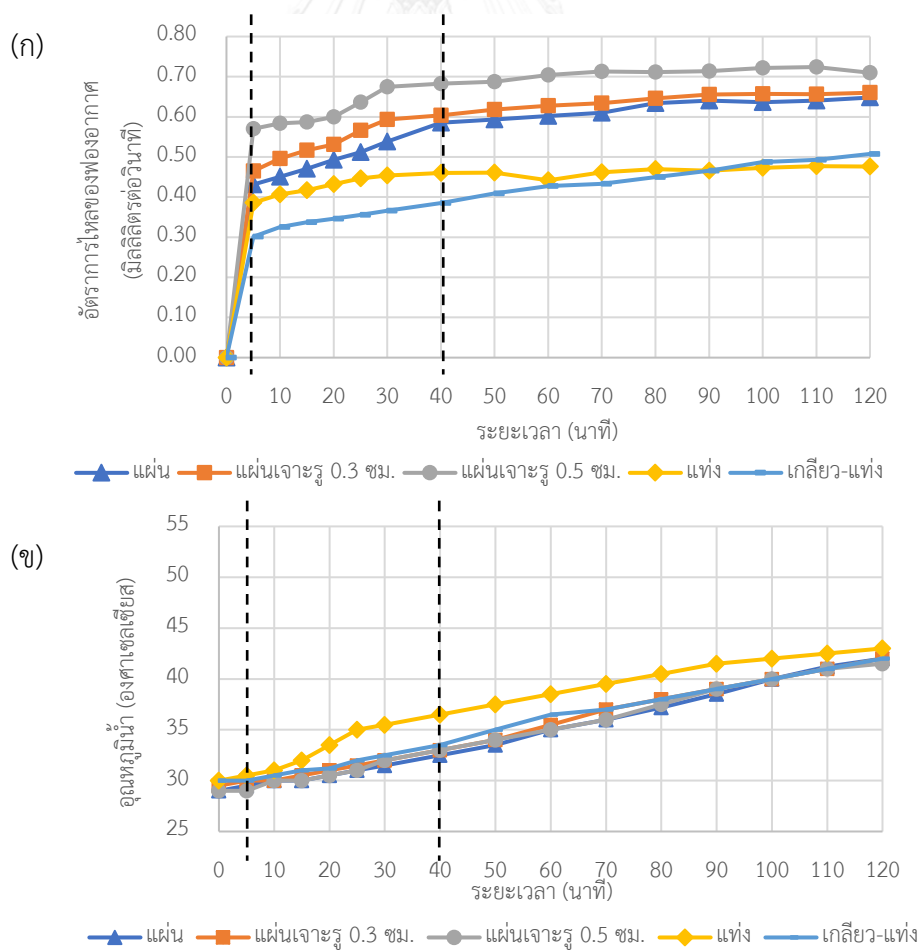
หมายเหตุ: เครื่องหมาย - คือไม่สามารถทำการทดลองในสภาวะนั้น ๆ ได้

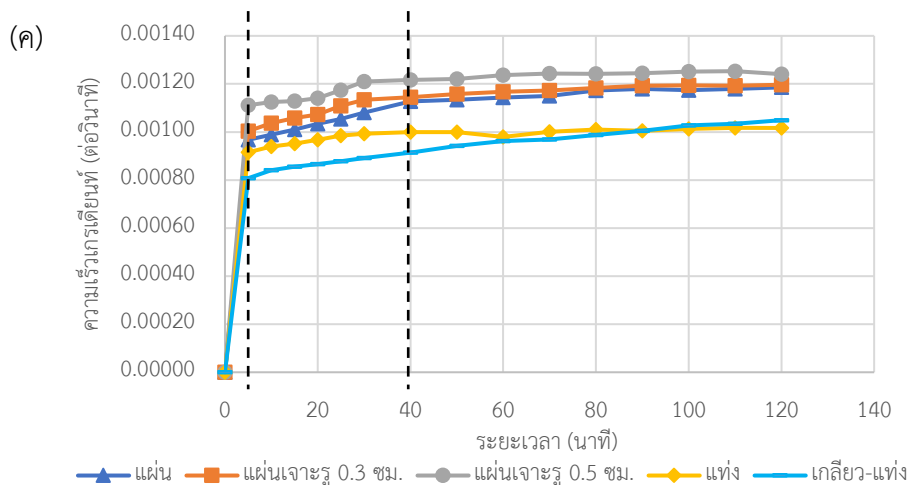
4.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟองอากาศระหว่างเดินระบบและชนิดของขั้วไฟฟ้า

การทดลองนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟองอากาศระหว่างการเดินระบบด้วยขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่างๆจากการทดลองที่ 4.2.1 เพื่อยืนยันรูปแบบขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม และศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า โดยการเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมและขั้วไฟฟ้าจากโลหะชนิดอื่น ได้แก่ แกรไฟต์ และไทเทเนียม

4.2.2.1 พฤติกรรมการเกิดฟองอากาศ

ทำการทดลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรู (ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร) แท่ง และเกลียว จำนวน 2 แผ่น เดินระบบในคอลัมน์ทดสอบบรรจุน้ำประปาเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นสภาวะที่สามารถทำการทดลองได้ทุกรูปแบบของขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ ความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลว อุณหภูมิและค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงของน้ำภายในระบบ และอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้า โดยผลการทดลองแสดงดังนี้





รูปที่ 4-7 อัตราการไหลของอากาศ (ก) อุณหภูมิของน้ำในระบบเมื่อทำการทดลองด้วยข้อไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ (ข) และความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลว (ค)

จากรูปที่ 4-7 พบว่า ข้อไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร เป็นข้อไฟฟ้าที่ให้อัตราการไหลของอากาศและความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลวซึ่งช่วยในการกวนผสมสูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 0.72 มิลลิลิตรต่อวินาที และ 0.00124 ต่อวินาที รองลงมาคือรูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร และรูปแบบแผ่นให้อัตราการไหลของอากาศประมาณ 0.66 และ 0.65 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลวประมาณ 0.00120 และ 0.00119 ต่อวินาที ตามลำดับ ขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในระบบของข้อไฟฟ้าแต่ละรูปแบบใกล้เคียงกัน โดยเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 42 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส และสังเกตได้ว่าพฤติกรรมการเกิดฟองอากาศระหว่างเดินระบบเป็นระยะเวลา 120 นาที สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1: เกิดขึ้นช่วง 5 นาทีแรกของการเดินระบบ โดยฟองอากาศหรือฟองก๊าซไฮโดรเจนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นละลายอยู่ในน้ำ จึงส่งผลให้อัตราการไหลเริ่มต้นของอากาศที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลด้วยฟองสบู่มีค่าต่ำ

ช่วงที่ 2: เป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังจากช่วงแรกจนถึงนาทีที่ 40 อุณหภูมิของน้ำในระบบทยอยเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติการละลายน้ำของก๊าซลดลง จึงวัดอัตราการไหลของอากาศได้สูงขึ้น ความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวในระบบจึงเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

ช่วงที่ 3: อุณหภูมิของน้ำในระบบเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุด ฟองอากาศที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศและสภาพการกวนผสมในระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

นอกเหนือจากอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของน้ำภายในระบบ ผลการทดลองในส่วนของคุณค่าพีเอช และอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าพีเอชของน้ำในระบบและอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ หลังจากการเดินระบบ 120 นาที

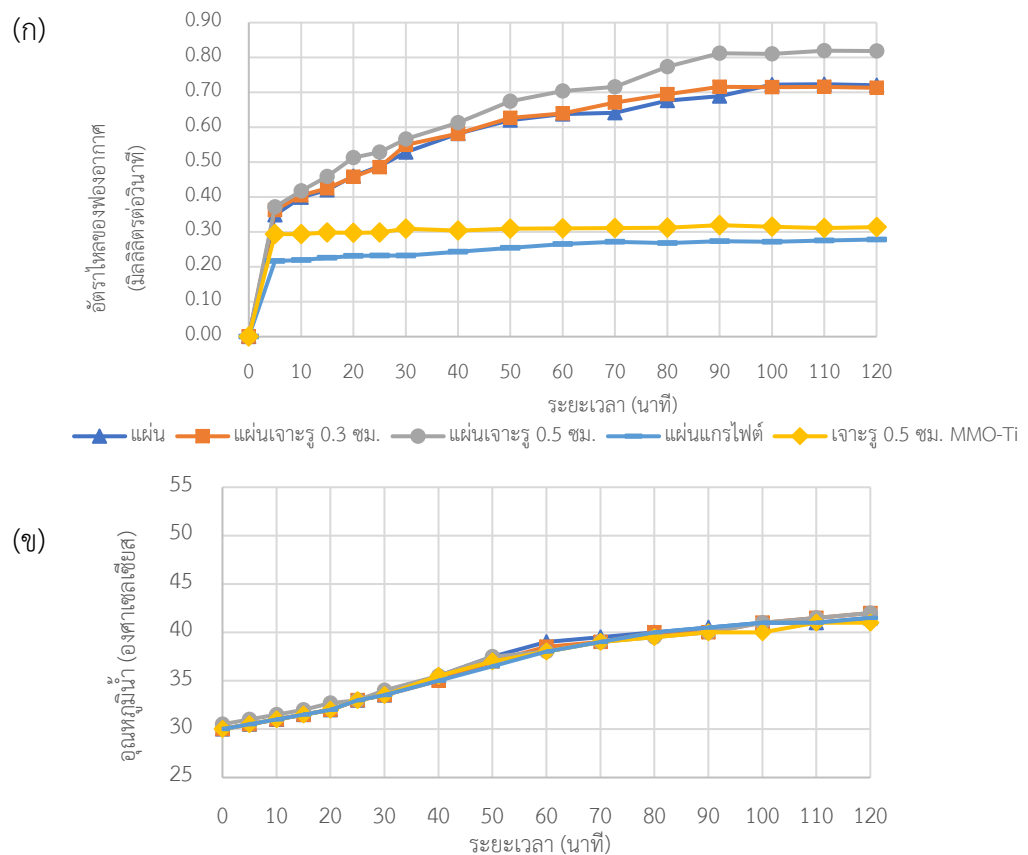
รูปแบบขั้วไฟฟ้า	pH ของน้ำในระบบ		อัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้า (กรัมต่ออนาที)
	จุดเริ่มต้น	จุดสิ้นสุด	
แผ่น - แผ่น	7.60	8.94	0.0082
เจาะรู - เจาะรู (Ø 0.3 เซนติเมตร)	7.60	8.97	0.0079
เจาะรู - เจาะรู (Ø 0.5 เซนติเมตร)	7.58	8.77	0.0090
แท่ง - แท่ง	7.60	8.57	0.0062
แท่ง - เกลียว	7.77	9.08	0.0072

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าพีเอชของน้ำในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในทุกการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ เนื่องจากน้ำประปาที่ใช้ทำการทดลองมีปริมาตรต่ำ ปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดขึ้นจากขั้วแอโนดถูกสะเทินกับค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำประปา ขณะที่ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดขึ้นจากขั้วแคโทดมีปริมาณมากเกินพอ จึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำในระบบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bensadok และคณะ (2008) ในส่วนอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้า พบว่าการกร่อนของขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดจะทำให้เกิดการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้าจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และละลายโลหะออกมาในรูปอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ขณะที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟองอากาศ สามารถสรุปได้ว่า ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมที่เหมาะสมสำหรับใช้ศึกษาในขั้นต่อไปมี 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแผ่น และรูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร โดยในการทดลองต่อไป เลือกใช้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร เป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสม สำหรับใช้ในการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการไหลของอากาศ

4.2.2.2 ชนิดของขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการไหลของอากาศ

ทำการทดลองเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมและขั้วไฟฟ้าจากโลหะชนิดอื่น ได้แก่ แกรไฟต์ และไทเทเนียม จำนวน 2 แผ่นรูปแบบแผ่น และแผ่นเจาะรู (ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร) เติมน้ำในระบบในคอลัมน์ทดสอบบรรจุน้ำประปาเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิและค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงของน้ำภายในระบบ และอัตราการกรองของขั้วไฟฟ้า เช่นเดียวกับการศึกษาพฤติกรรมเกิดการฟองอากาศ โดยผลการทดลองแสดงดังนี้



รูปที่ 4-8 อัตราการไหลของอากาศ (ก) และอุณหภูมิของน้ำในระบบ
เมื่อทำการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ (ข)

จากรูปที่ 4-8 พบว่า ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมให้อัตราการไหลของอากาศสูงกว่าขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแกรไฟต์ และไทเทเนียม ทั้งรูปแบบแผ่นและแบบเจาะรูอย่างชัดเจน โดยมีค่าประมาณ 0.71, 0.72 และ 0.82 มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 120 นาที สำหรับขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่

ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแกรไฟต์ ซึ่งทำการศึกษาได้แก่รูปแบบแผ่น และขั้วไฟฟ้าที่ทำจากไทเทเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ให้อัตราการไหลของอากาศค่อนข้างต่ำประมาณ 0.28 และ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะ (Conductivity) โดยอลูมิเนียมมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับแกรไฟต์ และไทเทเนียม (Raymond A. Serway, 1998) ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทอิเล็กตรอนสูงกว่า จึงผลิตฟองก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่า ขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในระบบของขั้วไฟฟ้าแต่ละรูปแบบใกล้เคียงกัน โดยเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 42 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับผลการศึกษาพฤติกรรมเกิดฟองอากาศ นอกจากนี้ผลการทดลองในส่วนของคุณค่าพีเอชและอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียม แกรไฟต์ และไทเทเนียมรูปแบบต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ค่าพีเอชของน้ำในระบบและอัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียม แกรไฟต์ และไทเทเนียมรูปแบบต่างๆ หลังจากการเดินระบบ 120 นาที

รูปแบบขั้วไฟฟ้า	pH ของน้ำในระบบ		อัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้า (กรัมต่อนาที)
	จุดเริ่มต้น	จุดสิ้นสุด	
แผ่นอลูมิเนียม	7.60	8.94	0.0082
แผ่นอลูมิเนียมเจาะรู (Ø 0.3 เซนติเมตร)	7.60	8.97	0.0079
แผ่นอลูมิเนียมเจาะรู (Ø 0.5 เซนติเมตร)	7.58	8.77	0.0090
แผ่นแกรไฟต์	7.44	6.23	0.0008
แผ่นไทเทเนียมเจาะรู (Ø 0.5 เซนติเมตร)	8.04	6.19	0.0002

จากผลการศึกษานิตของขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการไหลของอากาศสามารถสรุปได้ว่า ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า เนื่องจากให้อัตราการไหลของอากาศสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมที่สูงกว่าโลหะชนิดอื่นๆ จึงทำให้ขั้วไฟฟ้าเกิดการกร่อนที่สูงตามไปด้วย

4.3 การศึกษารูปแบบถังปฏิกริยาต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

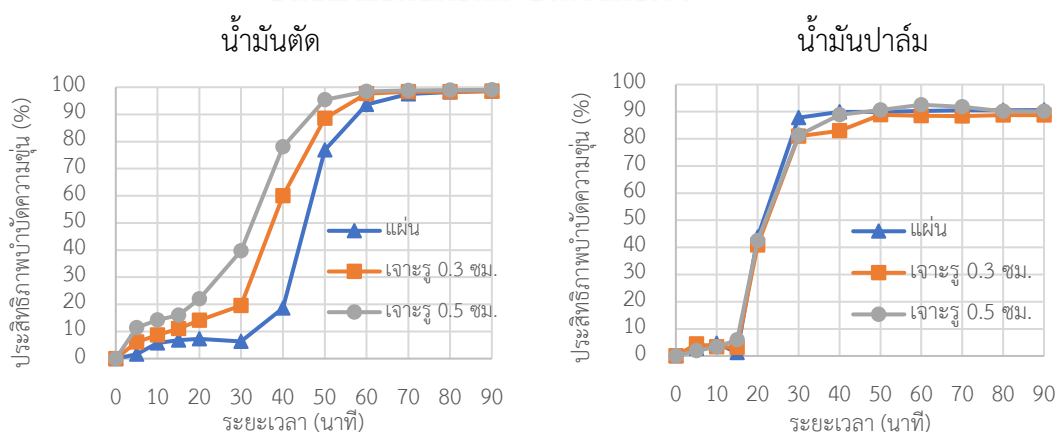
4.3.1 รูปแบบของถังปฏิกริยาที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบของถังปฏิกริยาที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า โดยทำการศึกษารูปแบบถังปฏิกริยา 2 ชนิด คือ ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ซึ่งเป็นถังปฏิกริยาที่นิยมใช้โดยทั่วไปในกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า และถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก (งานวิจัยนี้ขอเรียกรวมว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยก) ซึ่งเป็นถังปฏิกริยาทางเลือก

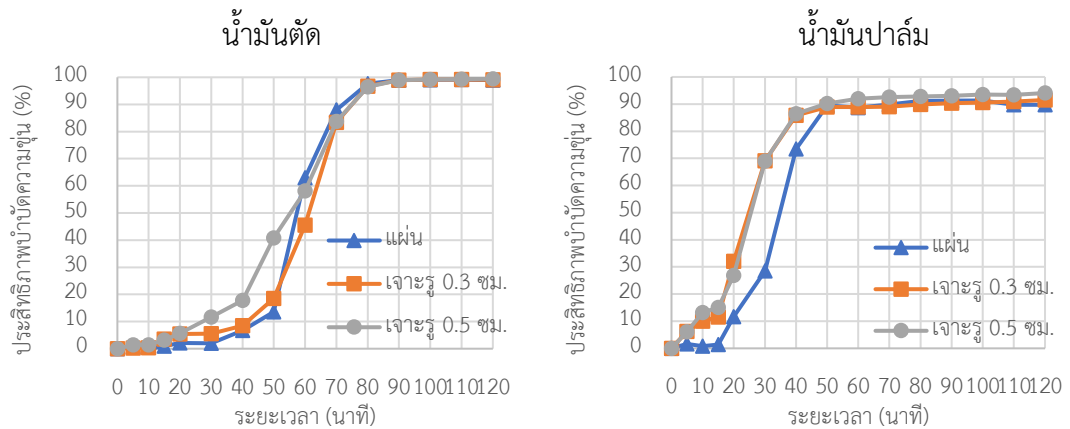
4.3.1.1 กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร แบบที่ละเทในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร และมีบริเวณเติมอากาศ (Riser zone) สูง 180 เซนติเมตร โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียม 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร วางขั้วไฟฟ้าเหนือถังปฏิกริยา 30 เซนติเมตร และให้ค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบด้วยค่าซีโอดี ค่าความขุ่น ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงของน้ำในระบบ ความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้น และระยะเวลาที่ในการบำบัด โดยผลการทดลองแสดงดังนี้

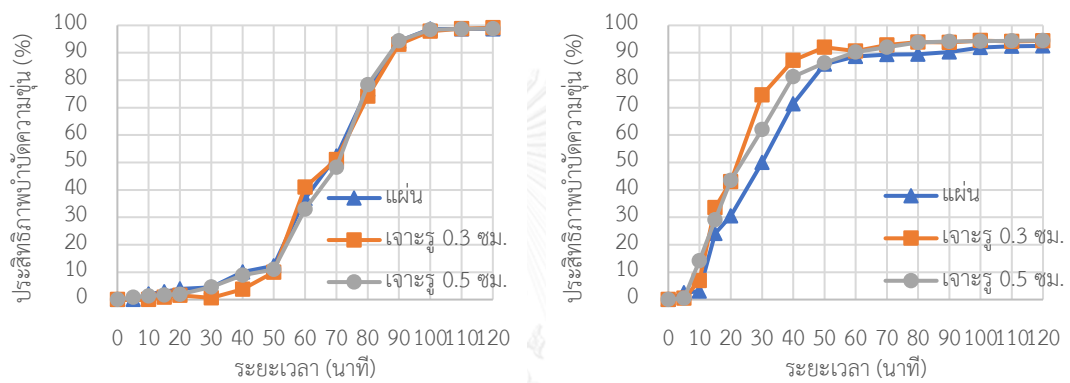
● ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร

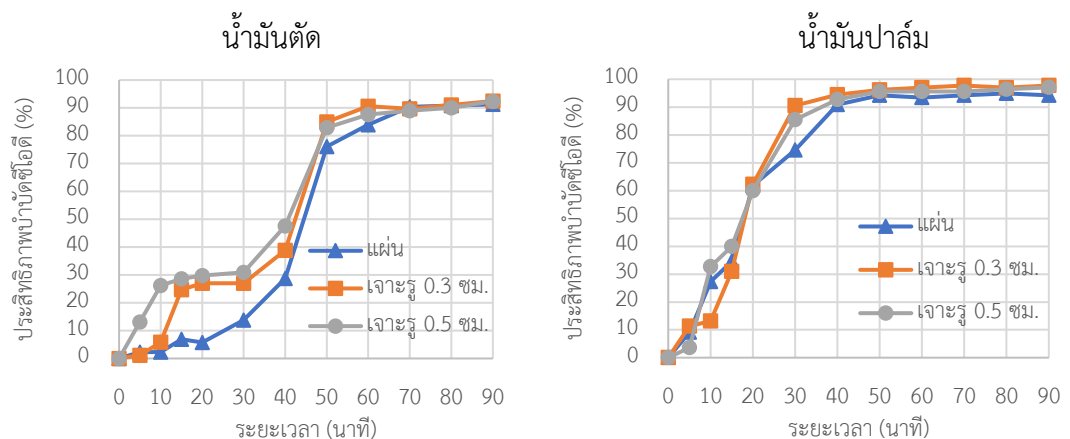


(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

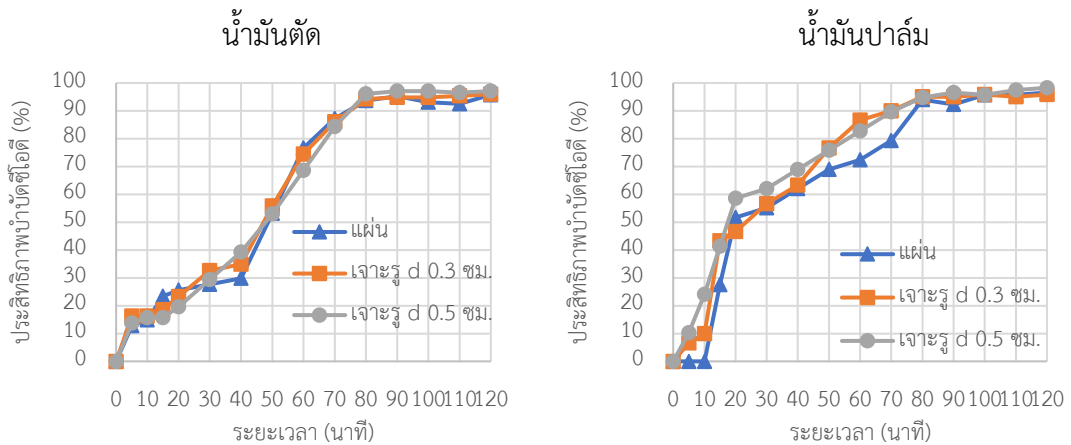
รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร

(ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

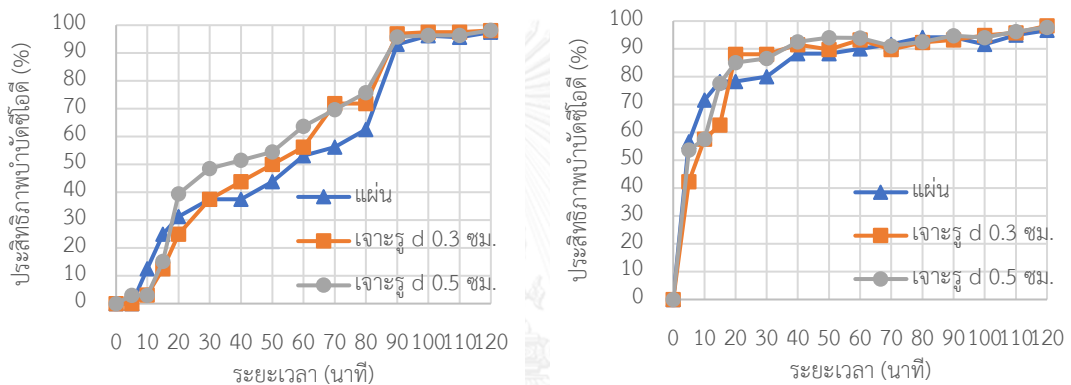
● ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร

(ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

จากรูปที่ 4-9 และ 4-10 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่น และแผ่นเจาะรู (ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร) จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันสูงขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจึงต้องเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรู มีแนวโน้มในการบำบัดความขุ่นและค่าซีโอดีได้รวดเร็วกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น โดยที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัด 0.5 กรัมต่อลิตร ระบบใช้เวลาในการ

บำบัดความขุ่นและซีโอดีประมาณ 60 นาที่ ขณะที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัดที่ 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาบำบัดความขุ่นและซีโอดีประมาณ 90 และ 100 นาที่ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ขุดการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มพบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันปาล์ม 1.5 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการบำบัดความขุ่นและซีโอดีรวดเร็วที่สุด เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มไม่มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว (น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว) เหมือนกับขุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว (น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว) ทำให้ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันสูงๆ อนุภาคน้ำมันมีโอกาสรวมตัวกันเองจนเกิดเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coalescence) และลอยตัวขึ้นไปยังผิวน้ำก่อนเกิดการทำลายเสถียรภาพด้วยอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพื่อสร้างตะกอน (Floc)

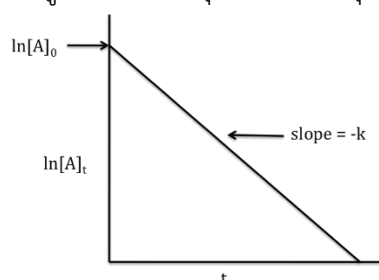
เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง จึงเลือกขุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดเป็นตัวแทนสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชีวไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ โดยการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วยวิธีแบบอินทิกรัล (Integration method) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร (Concentration) และระยะเวลา (time) จากผลการทดลองข้างต้น พบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดด้วยความขุ่นและซีโอดีที่ระยะเวลาต่างๆ ใกล้เคียงกับรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reactions) โดยสามารถจัดรูปสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อหาค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) ได้ดังสมการที่ 4-2

$$r = \frac{dC}{dt} = -kC$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_0^t -kt$$

$$\ln(C) = \ln(C_0) - kt \quad (4-2)$$

ดังนั้น ในกรณีนี้จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเข้มข้น ln(C) กับเวลา t จะได้ลักษณะของเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ k ดังนั้น สามารถหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ได้จากสมการข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 4-11 (พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 2555)



รูปที่ 4-11 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

โดย ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่คำนวณได้จากกราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดเส้นใจ (R^2) อยู่ในช่วง 0.90-0.95 และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดหรือใช้ในการทำปฏิกิริยา (t_{rxn}) ซึ่งได้จากการทดลองของการใช้ขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัด 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร สรุปดังตารางที่ 4-7

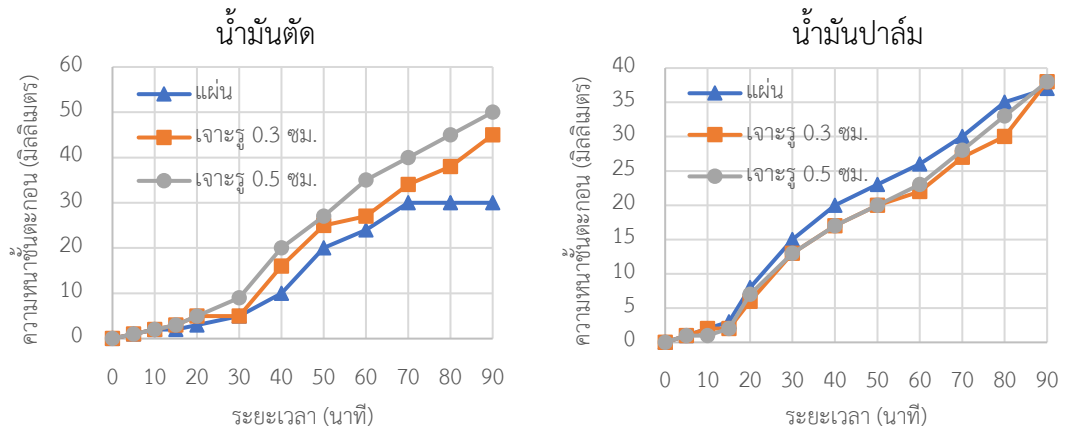
ตารางที่ 4-7 ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) และระยะเวลาในการบำบัด (t_{rxn}) ที่น้ำมันตัดความเข้มข้นต่างๆ

รูปแบบ ขั้วไฟฟ้า	ความเข้มข้นของน้ำมันตัด (กรัมต่อลิตร)					
	0.5		1.0		1.5	
	k (นาที่ ⁻¹)	t_{rxn} (นาที่)	k (นาที่ ⁻¹)	t_{rxn} (นาที่)	k (นาที่ ⁻¹)	t_{rxn} (นาที่)
แผ่น	0.0799	80	0.0846	90	0.0728	100
แผ่นเจาะรู (\varnothing 0.3 cm)	0.0732	60	0.0889	90	0.0747	100
แผ่นเจาะรู (\varnothing 0.5 cm)	0.0714	60	0.0741	90	0.0736	100

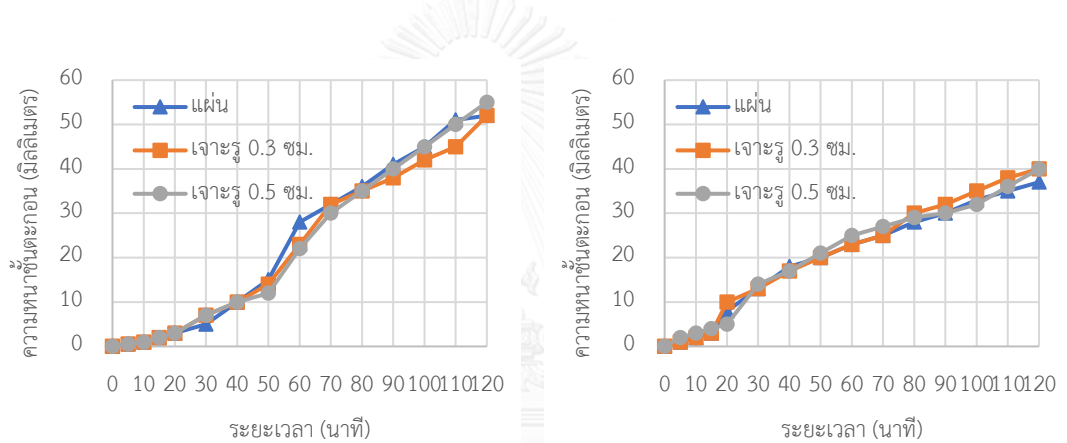
จากตารางที่ 4-7 สามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของน้ำมันตัดเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในด้านระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด โดยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำมัน เนื่องจากที่ความเข้มข้นน้ำมันสูงจะมีอนุภาคน้ำมันจำนวนมาก จึงต้องการระยะเวลาที่มากขึ้นในการทำปฏิกิริยากับออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สำหรับแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดเดียวกัน ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคืออัตราการบำบัดที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าสามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังเห็นได้จากประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและค่าซีโอดี อย่างไรก็ตาม กลุ่มตะกอนของอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพจะไปสะสมอยู่บริเวณผิวน้ำ เพื่อรอการแยกออกไปกำจัด ดังนั้นชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นภายในระบบจึงเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ต้องศึกษาเพื่อเปรียบเทียบรูปแบบของถังปฏิกิริยาที่เหมาะสม สำหรับการประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนหากนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

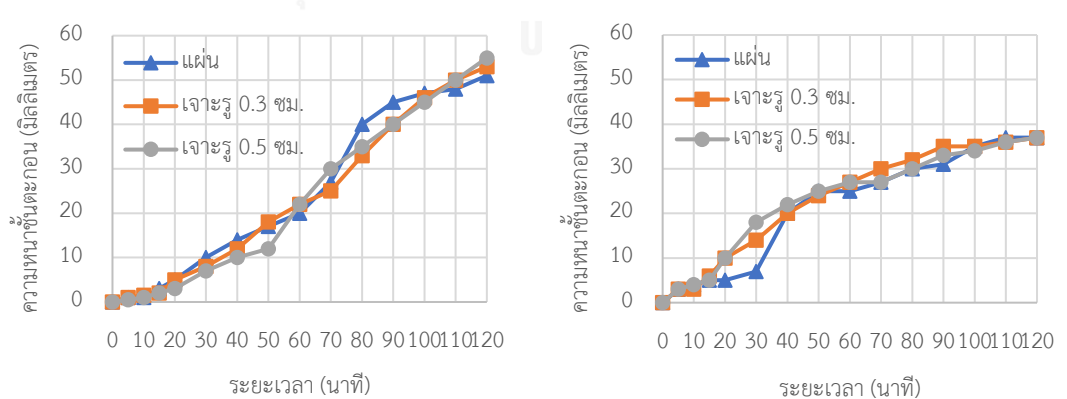
● ความหนาของชั้นตะกอน



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



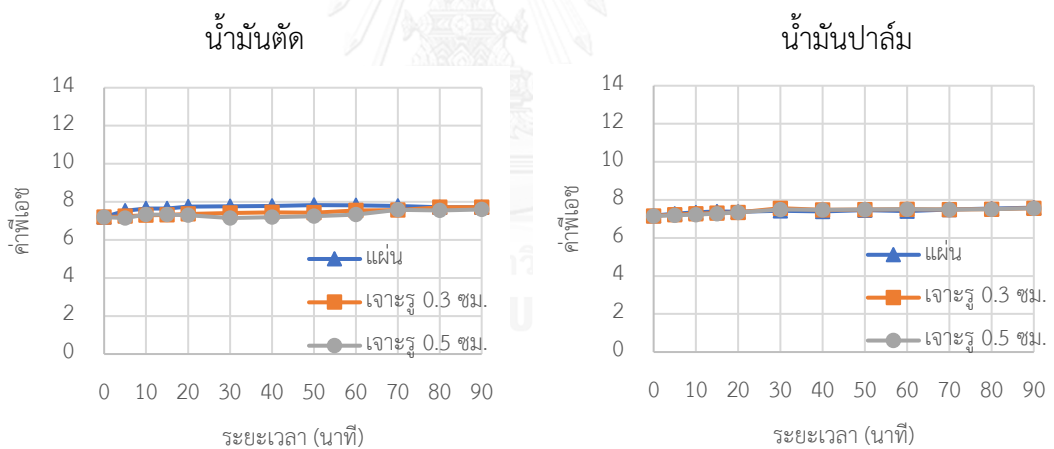
(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-12 ความหนาของชั้นตะกอนระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้
 ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก)

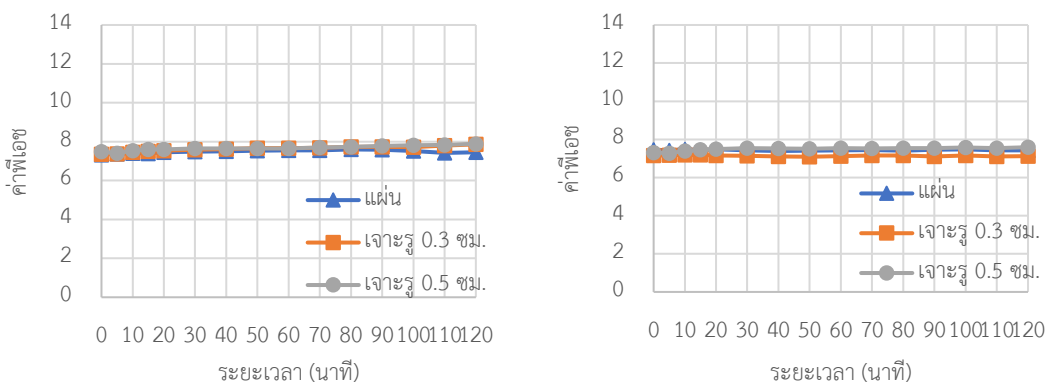
1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

จากรูปที่ 4-12 พบว่า ความหนาของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเดินระบบเช่นเดียวกับประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดี เนื่องจากปริมาณอออนของสารโคแอกกูแลนต์ (Al^{3+} ions) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการทำให้ละลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำปริมาณมาก จนเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นตะกอน (Floc) ลอยขึ้นไปสะสมบริเวณผิวน้ำ โดยชั้นตะกอนที่เกิดจากการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ มีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) จากตารางที่ 4-6 ที่แสดงให้เห็นว่าอัตราการบำบัดของขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนตะกอนที่เกิดขึ้นกับปริมาตรน้ำเสียที่บำบัดระหว่างกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ากับการทำให้ละลายเสถียรภาพด้วยสารเคมีโดยวิธีจาร์เทสต์ พบว่ากระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ามีอัตราการเกิดตะกอนที่น้อยกว่าการทำให้ละลายเสถียรภาพด้วยสารเคมี โดยที่ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตรมีอัตราการเกิดตะกอนประมาณ 30.8 และ 55 มิลลิลิตรต่อลิตร ตามลำดับ และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันในทุกความเข้มข้นของน้ำมัน

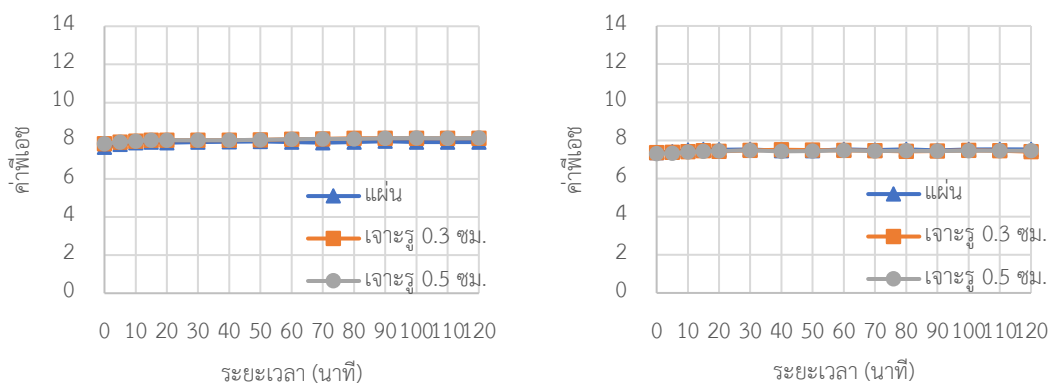
- **พีเอชที่เปลี่ยนแปลง**



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-13 ค่าพีเอชของน้ำในระบบระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก)

1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

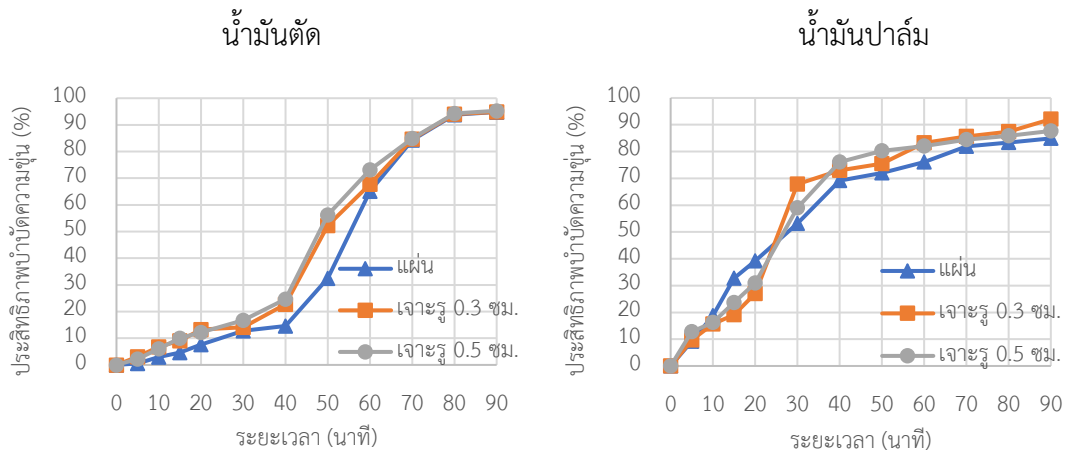
จากรูปที่ 4-13 พบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจากค่าพีเอชเริ่มต้นเล็กน้อย โดยอยู่ในช่วง 7-8 เนื่องจากปริมาณของน้ำเสียสังเคราะห์ภายในถังปฏิกรณ์มีปริมาตรสูง (25 ลิตร) ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดจากการทำปฏิกรณ์ที่ขั้วแคโทดจึงไม่ส่งผลให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลง ซึ่งแตกต่างจากกรณีการเดินระบบในน้ำประปา และจัดเป็นข้อดีอย่างหนึ่งของกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่าพีเอชเหมือนกับกระบวนการทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมี และไม่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเกิดการเปลี่ยนแปลง

4.3.1.2 กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบ

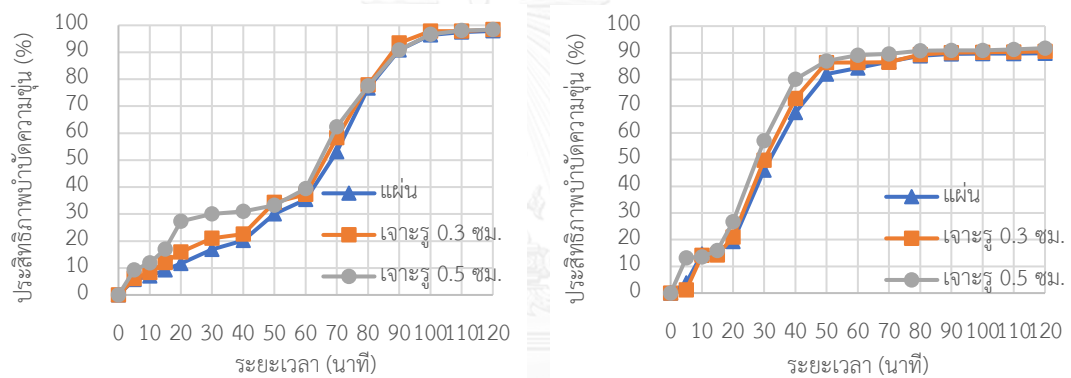
อากาศยก

ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร แบบที่ละเทในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร มีบริเวณเติมอากาศ (Riser zone) สูง 180 เซนติเมตร และมีบริเวณไม่เติมอากาศ (Downcomer zone) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร (Mongkolnauwarat, 2014) ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียม 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร วางขั้วไฟฟ้าเหนือถังปฏิกรณ์ 30 เซนติเมตร และให้ค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบด้วยค่าซีโอดี ค่าความขุ่น ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงของน้ำในระบบ ความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้น และระยะเวลาที่ในการบำบัด โดยผลการทดลองแสดงดังนี้

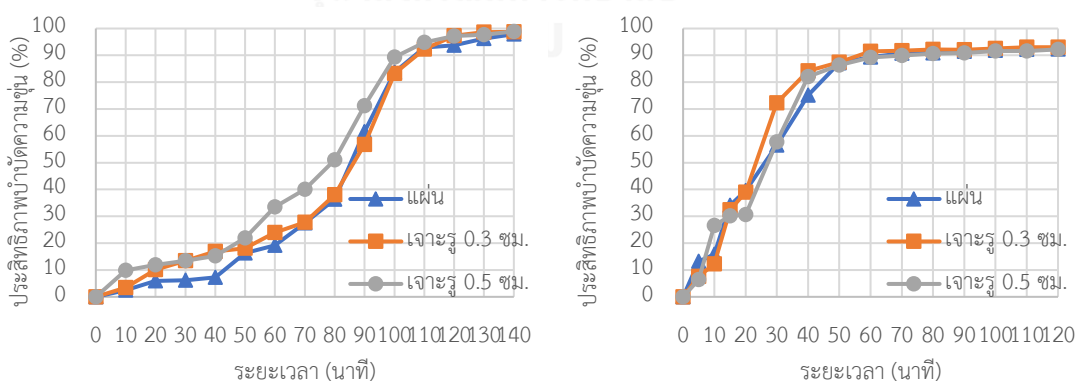
• ประสิทธิภาพการบำบัดความชื้น



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร

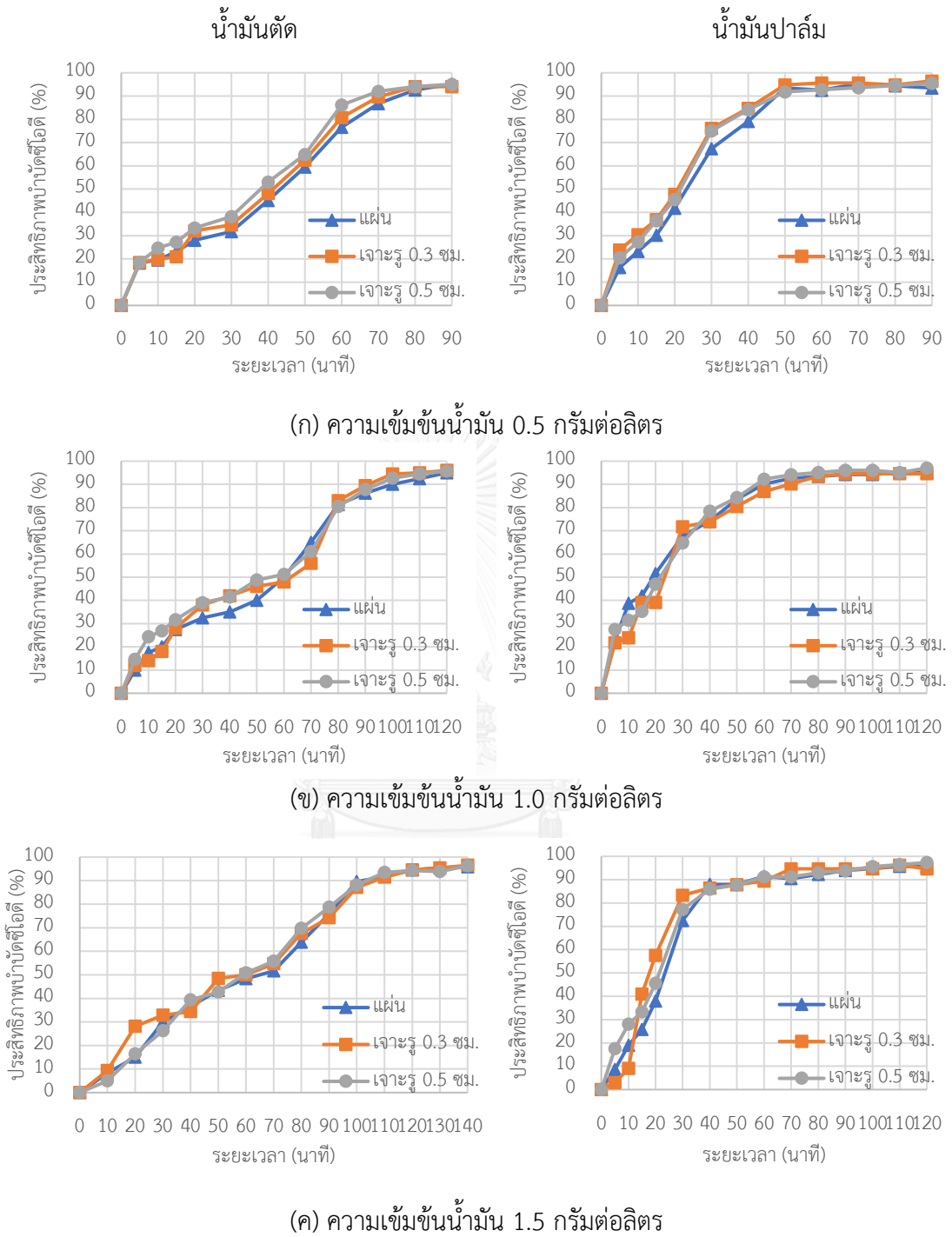


(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดความชื้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร

(ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

● ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี



รูปที่ 4-15 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร

(ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

จากรูปที่ 4-14 และ 4-15 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบบอากาศยก โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่น และแผ่นเจาะรู (ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร) จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันสูงจะใช้ระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรูมีแนวโน้มในการบำบัดความขุ่นและค่าซีโอดีได้รวดเร็วกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น โดยที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัด 0.5 กรัมต่อลิตร ระบบใช้เวลาในการบำบัดความขุ่นและซีโอดีประมาณ 80 นาที ขณะที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัดที่ 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาบำบัดความขุ่นและซีโอดีประมาณ 100 และ 120 นาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ชุดการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มพบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันปาล์ม 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการบำบัดความขุ่นและซีโอดีที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากชุดการทดลองด้วยน้ำมันปาล์มเป็นการปนเปื้อนในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว ทำให้อนุภาคน้ำมันปาล์มในน้ำเสียสังเคราะห์มีโอกาสรวมตัวกันเองจนเกิดเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coalescence) และลอยตัวขึ้นไปยังผิวน้ำก่อนเกิดการทำลายเสถียรภาพด้วยอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพื่อสร้างตะกอน (Floc) เช่นเดียวกับชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบบอากาศ

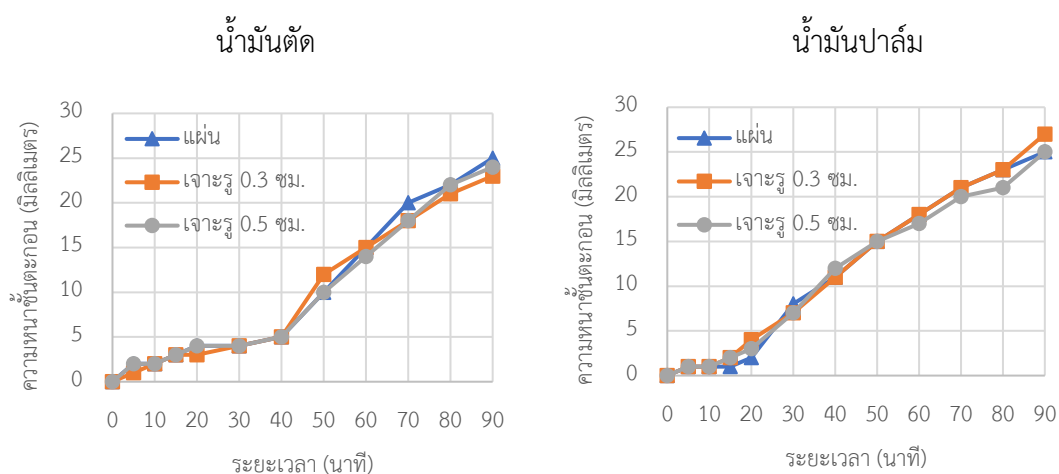
เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง จึงเลือกชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดเป็นตัวแทนสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ โดยการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วยวิธีแบบอินทิกรัล (Integration method) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร (Concentration) และระยะเวลา (time) จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า แนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดด้วยความขุ่นและซีโอดีที่ระยะเวลาต่างๆ ใกล้เคียงกับรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reactions) เช่นเดียวกับการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบบอากาศ วิเคราะห์ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) และระยะเวลาในการบำบัดหรือใช้ในการทำปฏิกิริยา (t_{rxn}) ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) และระยะเวลาในการบำบัด (trxn) ที่น้ำมันตัดความเข้มข้นต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก

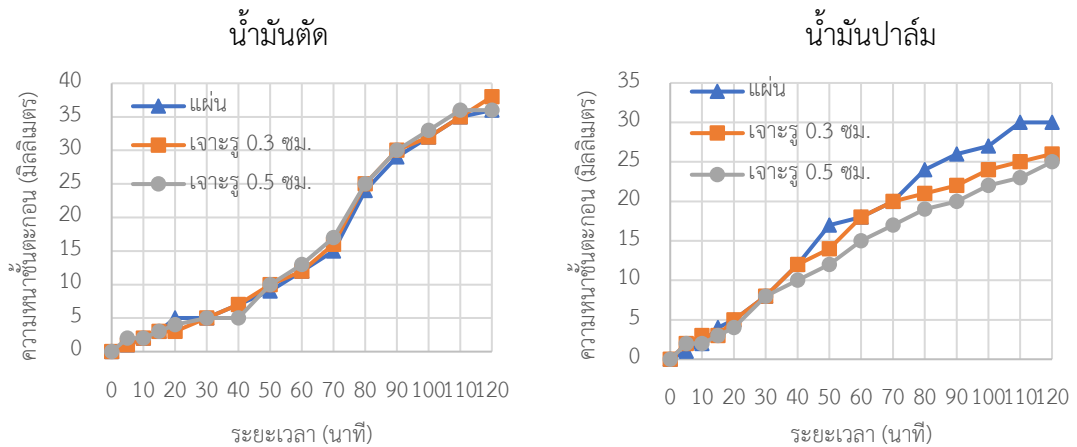
รูปแบบ ชีวไฟฟ้า	ความเข้มข้นของน้ำมันตัด (กรัมต่อลิตร)					
	0.5		1.0		1.5	
	k (นาท ⁻¹)	t _{rxn} (นาท)	k (นาท ⁻¹)	t _{rxn} (นาท)	k (นาท ⁻¹)	t _{rxn} (นาท)
แผ่น	0.0542	80	0.0588	100	0.0497	120
แผ่นเจาะรู (Ø 0.3 cm)	0.0526	80	0.0630	100	0.0543	120
แผ่นเจาะรู (Ø 0.5 cm)	0.0530	80	0.0614	100	0.0517	120

จากตารางที่ 4-8 สามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของน้ำมันตัดเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในด้านระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด โดยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำมัน เนื่องจากที่ความเข้มข้นน้ำมันสูงจะมีอนุภาคน้ำมันจำนวนมาก จึงต้องการระยะเวลายาวขึ้นในการทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สำหรับแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดเดียวกัน ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของชีวไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคืออัตราการบำบัดของชีวไฟฟ้ารูปแบบแผ่น แผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

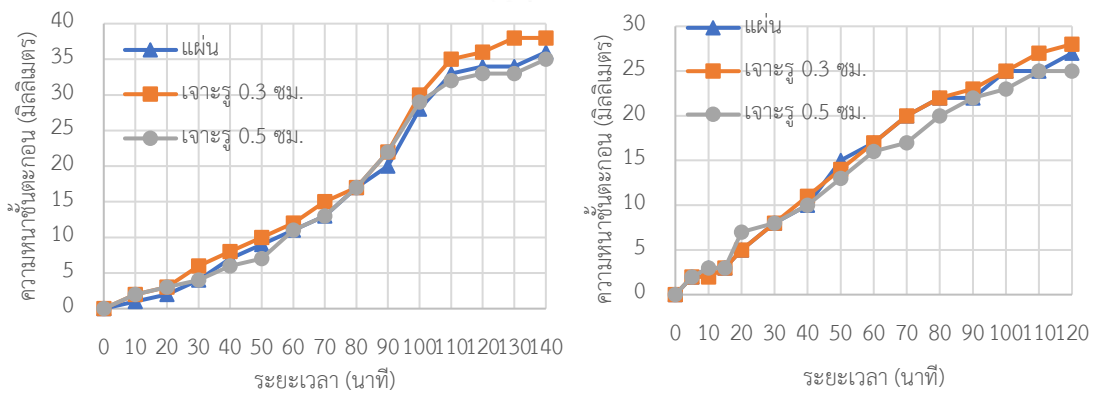
- ความหนาของชั้นตะกอน



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-16 ความหนาของชั้นตะกอนระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้
 ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก)

1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

จากรูปที่ 4-16 พบว่า ความหนาของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเดินระบบเช่นเดียวกับประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดี เนื่องจากปริมาณไอออนของสารโคแอกกูแลนต์ (Al^{3+} ions) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำปริมาณมาก จนเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นตะกอน (Floc) ลอยขึ้นไปสะสมบริเวณผิวน้ำ โดยชั้นตะกอนที่เกิดจากการทดลองด้วยขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ มีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่ของปฏิกรณ์ (k) จากตารางที่ 4-6 ที่แสดงให้เห็นว่าอัตราการบำบัดของขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบไม่แตกต่างกัน

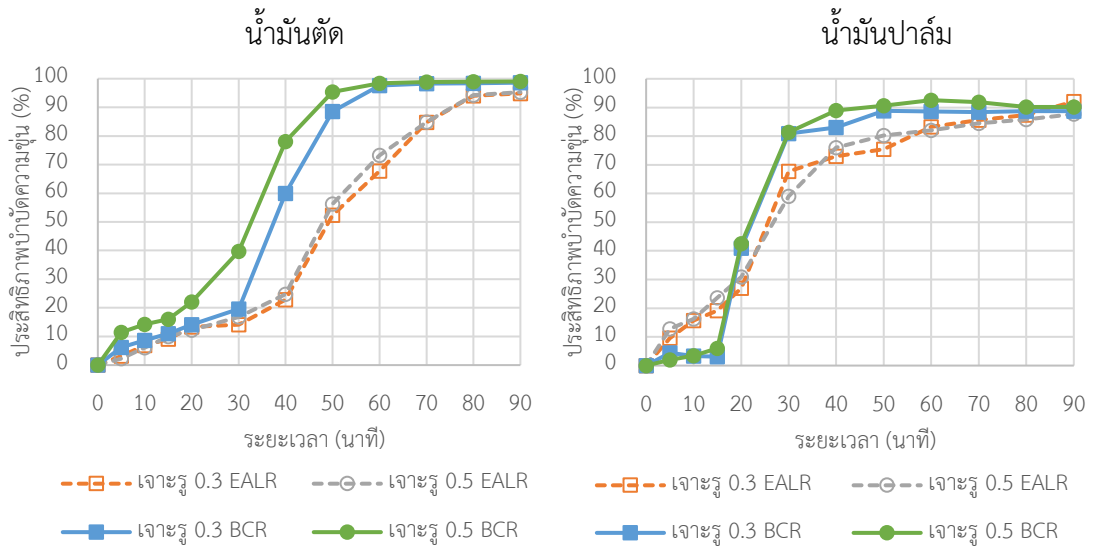
- **พีเอชที่เปลี่ยนแปลง**

ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกค่อนข้างคงที่ โดยอยู่ในช่วง 7-8 เช่นเดียวกับชุดการทดลองในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (ภาคผนวก ค) เนื่องจากปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ภายในถังปฏิกริยามีปริมาตรสูง (28 ลิตร) ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ที่เกิดจากการทำปฏิกริยาที่ขั้วแคโทดจึงไม่ส่งผลให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลง และเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า พีเอชหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดพีเอชของน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 5.5-9.0 (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539)

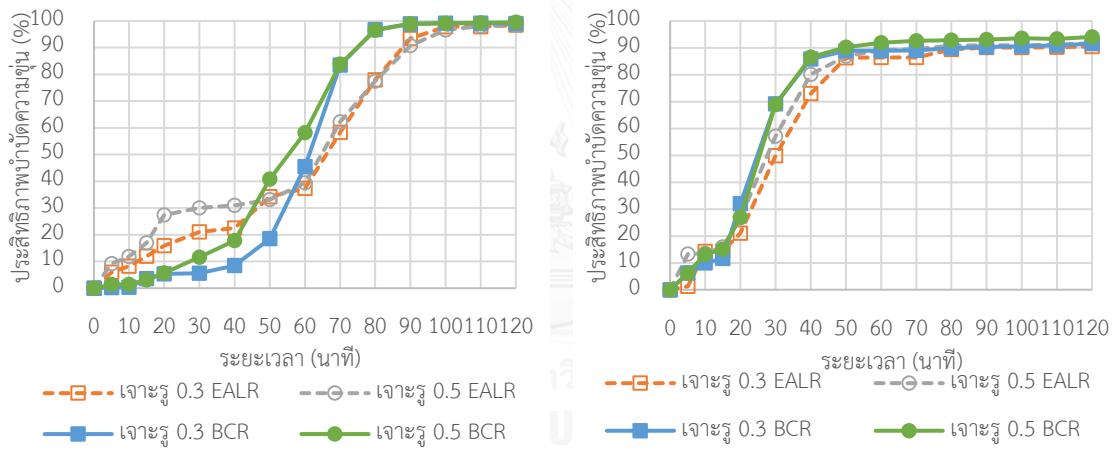
4.3.1.3 การเปรียบเทียบกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเดินระบบแบบที่ละเทในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column reactor) และแบบอากาศยก (Airlift reactor) ทำการทดลองภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม ได้แก่ ใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรูจำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านคุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัด ได้แก่ ค่าความขุ่น ซีโอดี พีเอช รวมไปถึงปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นภายในระบบ อัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้า และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด เพื่อคัดเลือกรูปแบบถังปฏิกริยาที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ให้ประสิทธิภาพสูง โดยผลการทดลองแสดงดังนี้

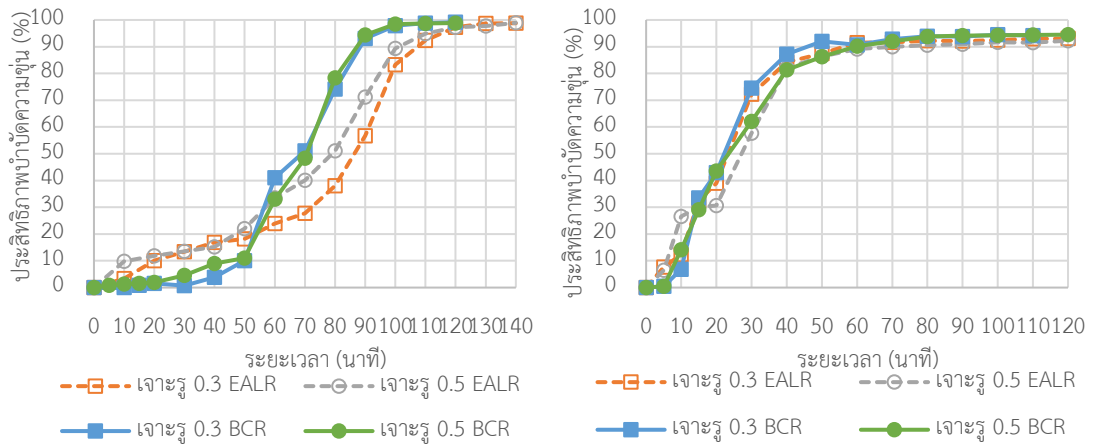
● ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



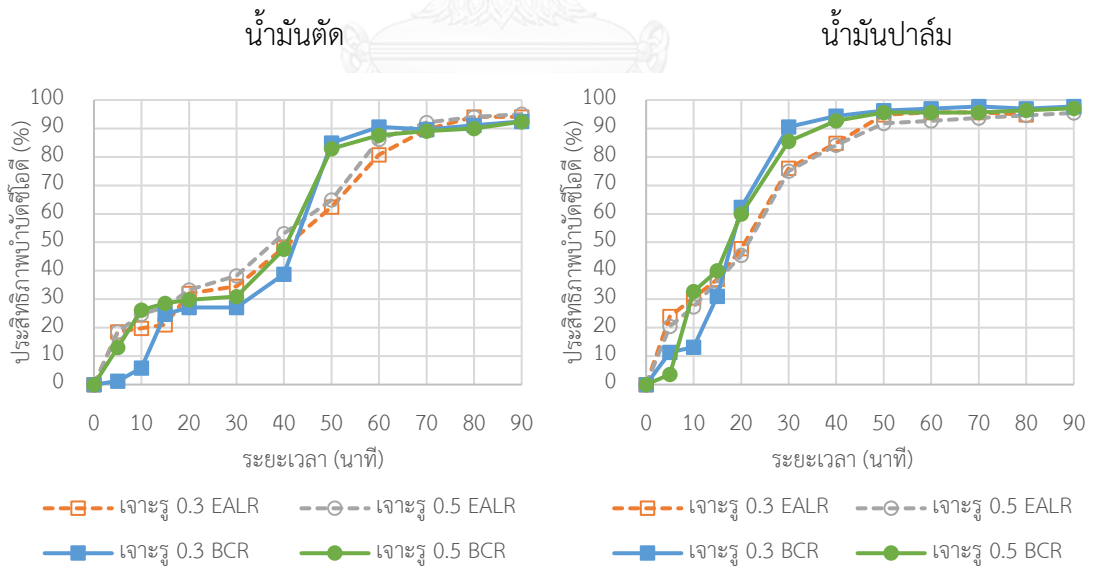
(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



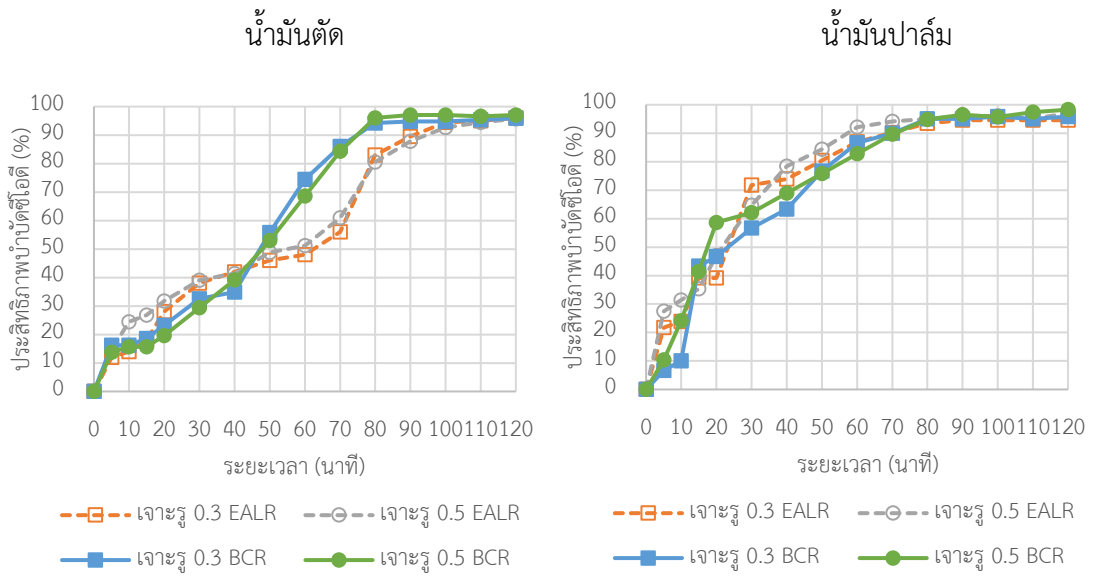
(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-17 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

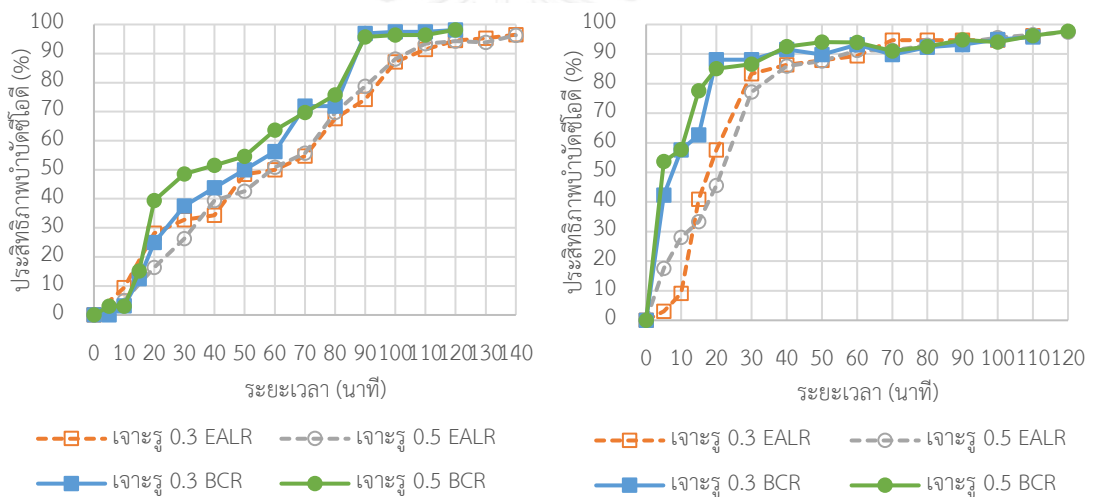
● ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-18 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

รูปที่ 4-17 และ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันคัตและน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรู (ขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร) จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ซึ่งเป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสม พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความ

ขุ่นและซีโอดีของชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงเริ่มต้น (Lag stage): เป็นช่วงที่ค่าความขุ่นและค่าซีโอดีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากค่าเริ่มต้น อลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จากขี้แอมโมเนียมละลายน้ำและทำหน้าที่ทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำ โดยระยะเวลาของช่วงเริ่มต้น (Lag stage) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน

ช่วงที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (Reactive stage): อลูมิเนียมไอออนละลายน้ำและกระจายทั่วถังปฏิกรณ์ ทำให้สามารถเข้าไปทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันและรวมตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนขนาดใหญ่ได้ง่าย (Floc) โดยอาศัยการลอยตัวของกลุ่มฟองก๊าซไฮโดรเจนขนาดไมครอน (Microbubbles) ซึ่งช่วยในการกวนผสมและพากลุ่มตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว

ช่วงสภาวะคงที่ (Steady stage): เป็นช่วงที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และค่อนข้างคงที่ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันในถังปฏิกรณ์เหลืออยู่น้อย จึงทำให้ละลายของอลูมิเนียมไอออนไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด (Ichikawa และคณะ 2007)

จากรูปที่ 4-16 และ 4-17 สังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความขุ่นและซีโอดีในแต่ละความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มและน้ำมันตัด (0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร) ของชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ช่วงที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (Reactive stage) ของชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเข้าสู่ช่วงสภาวะคงที่ (Steady stage) ได้เร็วกว่า ดังเช่น การทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัด 1.0 กรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีค่าสูงสุดและเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลา 90 นาที ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดของชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลา 100 นาที กล่าวได้ว่าชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศใช้ระยะเวลาในการบำบัดน้อยกว่าชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

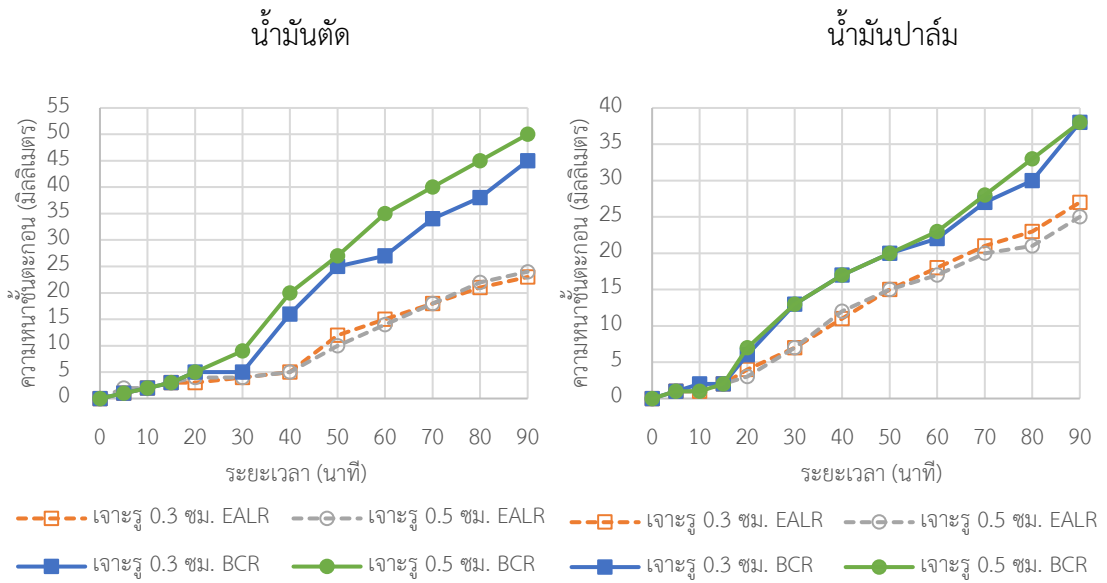
เมื่อพิจารณาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วยวิธีแบบอินทิกรัล (Integration method) โดยแนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ใกล้เคียงกับรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reactions) วิเคราะห์ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) และระยะเวลาในการบำบัดหรือใช้ในการทำปฏิกิริยา (t_{rxn}) ซึ่งได้จากการทดลอง เปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก แสดงดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 เปรียบเทียบค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) และระยะเวลาในการบำบัด (t_{rxn}) ที่น้ำมันตัด ความเข้มข้นต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

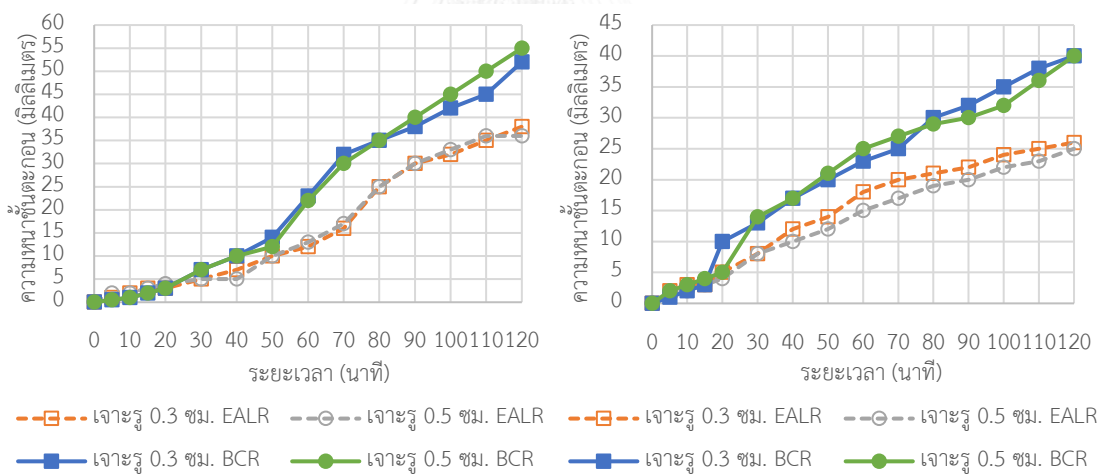
รูปแบบ ชีวไฟฟ้า	ความเข้มข้นของน้ำมันตัด (กรัมต่อลิตร)					
	0.5		1.0		1.5	
	k (นาที ⁻¹)	t_{rxn} (นาที)	k (นาที ⁻¹)	t_{rxn} (นาที)	k (นาที ⁻¹)	t_{rxn} (นาที)
ถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ						
แผ่นเจาะรู (Ø 0.3 cm)	0.0732	60	0.0889	90	0.0747	100
แผ่นเจาะรู (Ø 0.5 cm)	0.0714	60	0.0741	90	0.0736	100
ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก						
แผ่นเจาะรู (Ø 0.3 cm)	0.0526	80	0.0630	100	0.0543	120
แผ่นเจาะรู (Ø 0.5 cm)	0.0530	80	0.0614	100	0.0517	120

จากตารางที่ 4-9 สามารถสรุปได้ว่า ที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัดเดียวกัน ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของชุดการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศมีค่ามากกว่าชุดการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก จึงสามารถอธิบายได้ว่าถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศให้อัตราการบำบัด ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าที่เร็วกว่าถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาในการบำบัด (t_{rxn}) ของถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศที่มีค่าต่ำกว่าของถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกในทุกค่าความเข้มข้นของน้ำมันตัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกมีปริมาตรน้ำเสียมากกว่า โดยมีปริมาตร 28 ลิตร ขณะที่ถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศมีปริมาตร 25 ลิตร จึงต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น

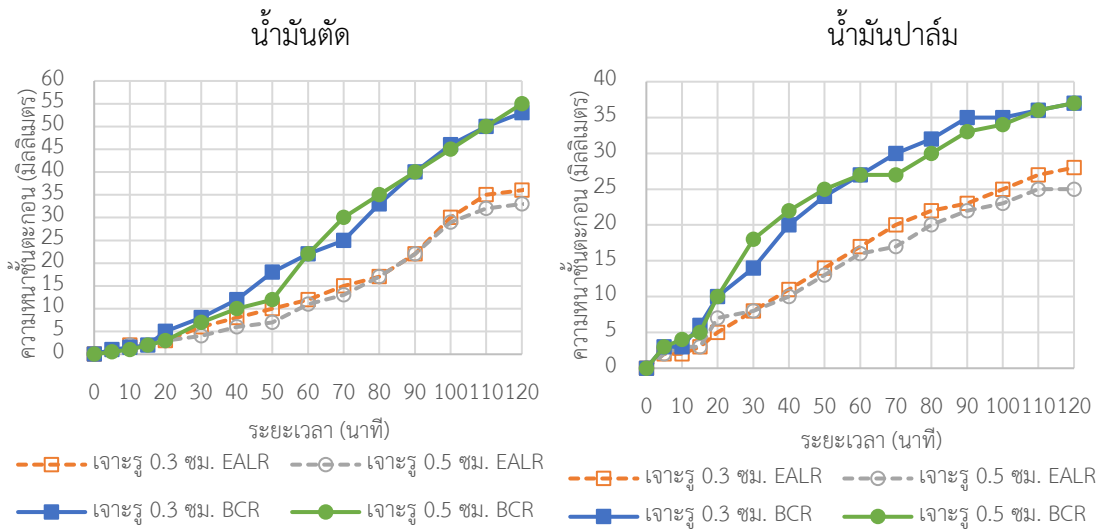
● ความหนาของชั้นตะกอน



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



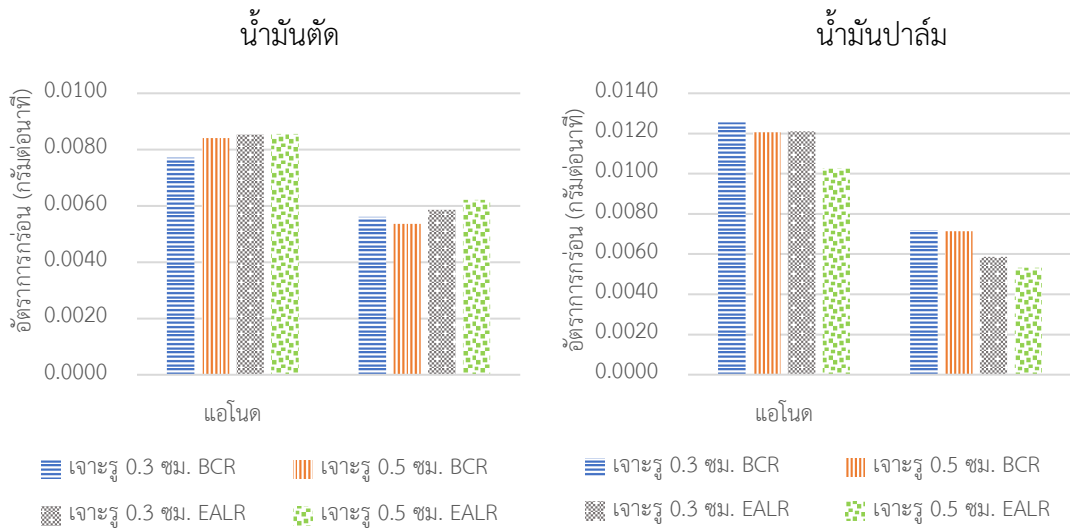
(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-19 ความหนาของชั้นตะกอนระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้
ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่ความเข้มข้นน้ำมัน

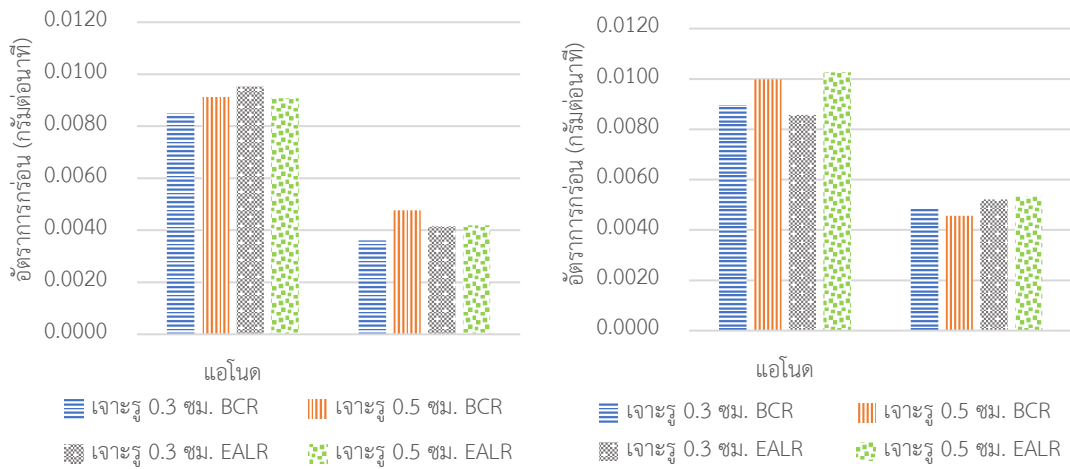
0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

จากรูปที่ 4-19 พบว่า ความหนาของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเดินระบบทั้งในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ซึ่งสัมพันธ์กับช่วงของการบำบัดความขุ่นและซีโอดี โดยช่วงเริ่มต้นของการบำบัด (Lag stage) ความหนาของชั้นตะกอนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยประมาณ 1-2 มิลลิเมตร และเมื่อเข้าสู่ช่วงที่เกิดปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว (Reactive stage) จนถึงช่วงการบำบัดค่อนข้างคงที่ (Steady stage) ความหนาของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปริมาณไอออนของสารโคแอกกูแลนต์ (Al^{3+} ions) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำปริมาณมาก จนเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นตะกอน (Floc) ลอยขึ้นไปสะสมบริเวณผิวน้ำ แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นระหว่างถังปฏิกรณ์ 2 รูปแบบ พบว่า ชั้นตะกอนที่เกิดจากการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีปริมาตรน้อยกว่าการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ เนื่องจากถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีการหมุนวนของของเหลวจากส่วนที่ไม่มีการเติมอากาศ (Downcomer zone) มายังส่วนที่เติมอากาศ (Riser zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกรณ์การบำบัดภายในถัง ทำให้เกิดการดันตัวของตะกอนให้มีการอัดแน่นขึ้น เป็นผลให้ความหนาของชั้นตะกอนในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีความหนาน้อยกว่าชั้นตะกอนในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่ระยะเวลาสิ้นสุดการทดลอง

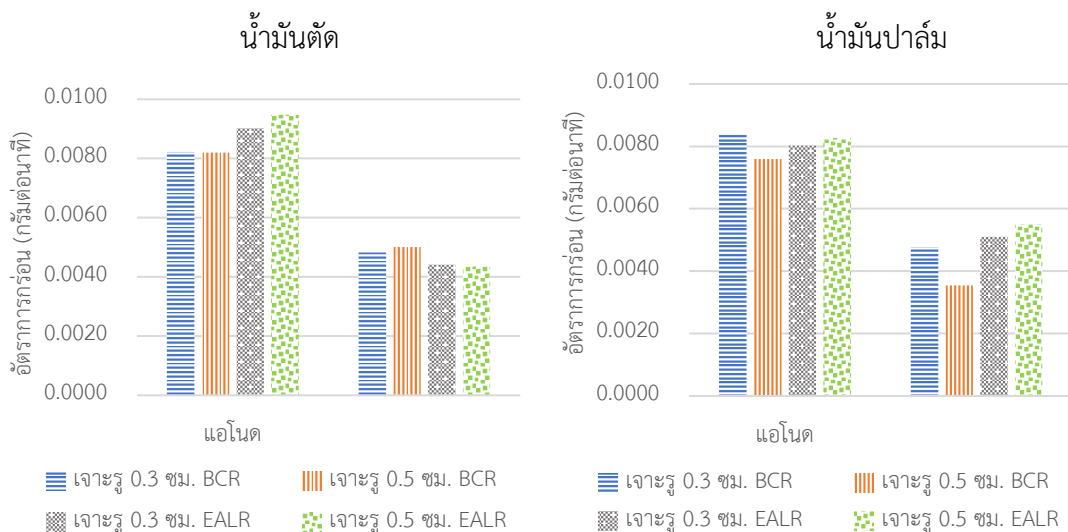
• อัตราการกร่อนของขั้วไฟฟ้า



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-20 อัตราการกรองของขั้วไฟฟ้าหลังการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

จากรูปที่ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการกรองของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่มีขนาดรู 0.3 และ 0.5 เซนติเมตร หลังจากการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก พบว่าการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ ให้อัตราการกรองของขั้วไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันในแต่ละความเข้มข้นของน้ำมัน โดยการกรองของขั้วไฟฟ้าจะเกิดที่ขั้วแอโนดเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดจะทำให้เกิดการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้าจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และละลายโลหะออกมาในรูปไอออนอลูมิเนียม (Al³⁺) ขณะที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ฟองก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และไฮดรอกไซด์ (OH⁻)

จากผลการเปรียบเทียบกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ ใกล้เคียงกันคือประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ แต่ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศใช้ระยะเวลาในการบำบัดรวดเร็วกว่าในทุกค่าความเข้มข้นของน้ำมัน เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามปริมาณชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีปริมาณน้อยกว่าถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ เนื่องจากถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีการหมุนวนของของเหลวจากส่วนที่ไม่มีอากาศ (Downcomer zone)

มายังส่วนที่เติมอากาศ (Riser zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการบำบัดภายในถัง ทำให้เกิดการดันตัวของตะกอนให้มีการอัดแน่นขึ้น เป็นผลให้ความหนาของชั้นตะกอนในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกมีความหนาน้อยกว่าชั้นตะกอนในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ โดยการเปลี่ยนแปลงความใสและความหนาชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4-21



รูปที่ 4-21 การเปลี่ยนแปลงความใสของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันและชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเริ่มต้นเดินระบบ (ก) ระหว่างการเดินระบบ (ข) และสิ้นสุดการเดินระบบ (ค)

4.4 การเดินระบบแบบต่อเนื่องและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา

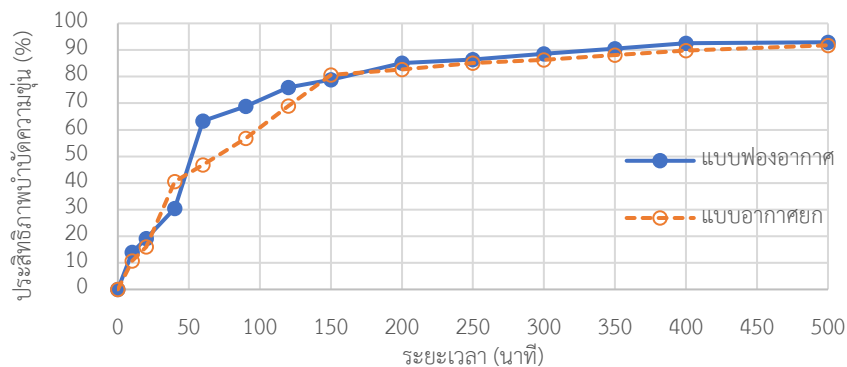
4.4.1 การเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ในการทดลองนี้เลือกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดเป็นตัวแทนในการทดลอง เนื่องจากเป็นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว ซึ่งมีเสถียรภาพสูง แยกออกจากน้ำได้ยากกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่เป็นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว ซึ่งอนุภาคน้ำมันมีโอกาสรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นได้เมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเดินระบบแบบต่อเนื่องของกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบพองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความเข้มข้นน้ำมันตัด 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร โดยอัตราการไหลของน้ำขาเข้าจะคำนวณจากระยะเวลาพักในผลการทดลองช่วงที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4-10

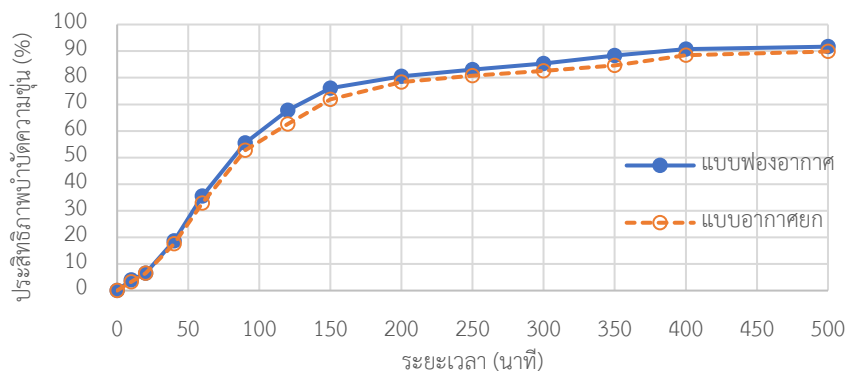
ตารางที่ 4-10 อัตราการไหลของน้ำขาเข้าของถังปฏิกริยาแบบพองอากาศและแบบอากาศยกจากการคำนวณด้วยระยะเวลาพักที่ความเข้มข้นน้ำมันต่าง ๆ

ความเข้มข้นน้ำมัน (กรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกริยาแบบพองอากาศ		ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก	
	เวลาพัก (นาที)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	เวลาพัก (นาที)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)
0.5	60	25	80	21
1.0	90	17	100	17
1.5	100	15	120	14

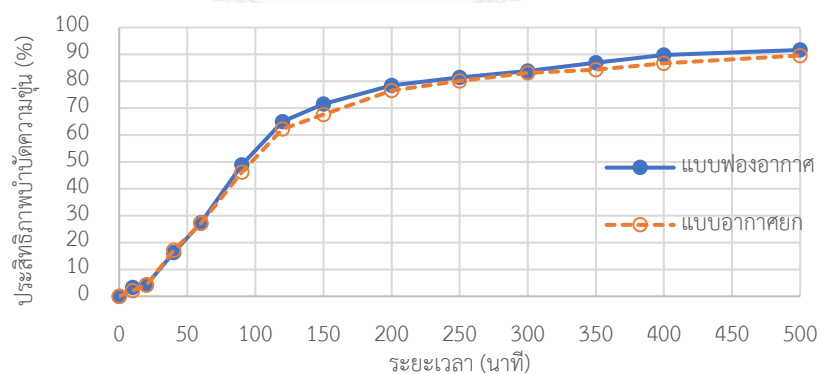
ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกริยาแบบพองอากาศและแบบอากาศยกที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้าข้างต้น ใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรูที่มีขนาดรู 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ วิเคราะห์ประสิทธิภาพการของระบบด้วยค่าความขุ่นและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น โดยผลการทดลองแสดงดังนี้



(ก) ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร



(ค) ความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4-22 ประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่มด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ก) 1.0 กรัมต่อลิตร (ข) และ 1.5 กรัมต่อลิตร (ค)

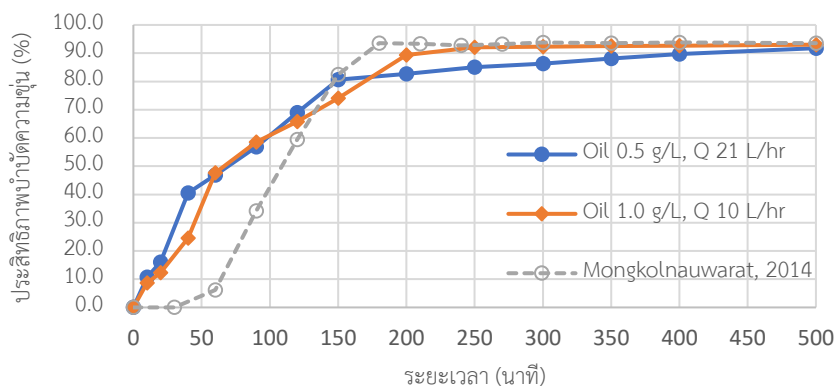
จากรูปที่ 4-22 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ปริมาตร 25 ลิตร) และถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ปริมาตร 28 ลิตร) โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลของน้ำขาเข้าที่คำนวณจากระยะเวลากักที่เหมาะสม พบว่าเมื่อเดินระบบเป็นเวลา 400 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นจะมีค่าสูงที่สุดในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ โดยมีค่าใกล้เคียงกันที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ในทุกความเข้มข้นของน้ำมันตัด จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลา (Detention time) ที่เหมาะสมของการเดินระบบแบบต่อเนื่องมีค่าประมาณ 400 นาที

อย่างไรก็ตามระยะเวลากักที่ใช้สำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่องมีค่าค่อนข้างสูงเพื่อศึกษาแนวทางในการลดระยะเวลาของกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า จึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำขาเข้าและความเข้มข้นของน้ำมันตัดในรูปของปริมาณน้ำมันที่เข้าระบบต่อชั่วโมง (Oil loading) แสดงดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ปริมาณน้ำมันที่เข้าระบบต่อชั่วโมง (Oil loading) ที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้าและความเข้มข้นของน้ำมันตัดต่างๆ

ความเข้มข้นน้ำมัน (กรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ		ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก	
	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ปริมาณน้ำมันเข้า ระบบ (กรัมต่อชั่วโมง)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ปริมาณน้ำมัน เข้าระบบ (กรัมต่อชั่วโมง)
0.5	25	12.5	21	10.5
1.0	17	17	17	17
1.5	15	22.5	14	21

จากตารางที่ 4-11 แสดงปริมาณน้ำมันที่เข้าระบบต่อชั่วโมงในแต่ละความเข้มข้นและอัตราการไหลของน้ำขาเข้า ซึ่งมีระยะเวลากักเท่ากันที่ 400 นาที เพื่อวิเคราะห์ผลของอัตราการไหลของน้ำขาเข้าและความเข้มข้นของน้ำมันตัดต่อประสิทธิภาพการบำบัดและระยะเวลากักของระบบ จึงเลือกน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของน้ำขาเข้า 10 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นปริมาณน้ำมันที่เข้าระบบ (Oil loading) 10 กรัมต่อชั่วโมง (Mongkolnauwarat, 2014) เป็นชุดเปรียบเทียบกับทดลองในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ที่ความเข้มข้นน้ำมันตัด 0.5 กรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของน้ำขาเข้า 21 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นปริมาณน้ำมันที่เข้าระบบ (Oil loading) 10.5 กรัมต่อชั่วโมง โดยผลการทดลองแสดงดังนี้



รูปที่ 4-23 การเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นน้ำมันและอัตราการไหลของน้ำขาเข้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดและระยะเวลาที่ที่เหมาะสม ที่ปริมาณน้ำมันเข้าระบบประมาณ 10 กรัมต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4-23 แสดงผลของความเข้มข้นน้ำมันและอัตราการไหลของน้ำขาเข้าที่แตกต่างกัน ภายใต้ปริมาณน้ำมันเข้าระบบ (Oil loading) ที่ใกล้เคียงกันประมาณ 10 กรัมต่อชั่วโมงต่อประสิทธิภาพและระยะเวลาที่ที่เหมาะสมของการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก พบว่าอัตราการไหลเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและระยะเวลาที่สังเกตได้จากการทดลองที่น้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร และลดอัตราการไหลของน้ำขาเข้าลงอยู่ที่ 10 ลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเพิ่มสูงขึ้น และมีระยะเวลาน้อยกว่าการทดลองที่ความเข้มข้นน้ำมันตัด 0.5 กรัมต่อลิตร และอัตราไหลของน้ำขาเข้า 21 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพบำบัดความขุ่นสูงสุดประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลากัก 250 นาที เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำขาเข้าที่ต่ำลงจะเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคน้ำมันและสารโคแอกกูแลนต์ รวมถึงสัดส่วนระหว่างจำนวนอนุภาคน้ำมันและสารโคแอกกูแลนต์ เพื่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพเป็นกลุ่มตะกอนลอยขึ้นสู่น้ำผิวน้ำ ขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้า ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง อนุภาคน้ำมันบางส่วนเหลืออยู่ในน้ำ ทำให้ค่าความขุ่นและซีไอดีที่เหลืออยู่ในน้ำมีค่าสูง จึงต้องใช้ระยะเวลากักที่สูงขึ้นตามไปด้วย

จากผลการเปรียบเทียบการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกสามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและระยะเวลากักของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบใกล้เคียงกัน กล่าวได้ว่าถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกมีความเหมาะสมในการใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ใช้เป็นเกณฑ์สำหรับคัดเลือกรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม โดยผลการเปรียบเทียบปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นและอัตราเกิดตะกอนต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ในระบบของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ สรุปดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ปริมาณและอัตราการเกิดตะกอนในระบบของถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ ที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดต่าง ๆ

ความเข้มข้นน้ำมัน (กรัมต่อลิตร)	ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ		ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก	
	ปริมาตร ตะกอน (มิลลิลิตร)	อัตราเกิดตะกอน (มิลลิลิตรต่อลิตร)	ปริมาตร ตะกอน (มิลลิลิตร)	อัตราเกิดตะกอน (มิลลิลิตรต่อลิตร)
0.5	770	30.8	693	24.8
1.0	770	30.8	693	24.8
1.5	770	30.8	724	25.9

จากตารางที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณและอัตราการเกิดตะกอนในระบบของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกในแต่ละความเข้มข้นของน้ำมันตัดโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง พบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีปริมาณน้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และมีอัตราการเกิดตะกอนต่อน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร ที่ต่ำกว่าในทุกความเข้มข้นของน้ำมันตัด เนื่องจากถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีการหมุนวนของของเหลวจากส่วนที่ไม่มีการเติมอากาศ (Downcomer zone) มายังส่วนที่เติมอากาศ (Riser zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกริยาการบำบัดภายในถัง ทำให้เกิดการดันตัวของตะกอนให้มีการอัดแน่นขึ้น เป็นผลให้ความหนาของชั้นตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีความหนาน้อยกว่าชั้นตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ จึงคำนวณเป็นปริมาตรตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบได้น้อยกว่า ทำให้ง่ายต่อการกำจัดออกจากผิวน้ำ และลดค่าใช้จ่ายในการส่งตะกอนไปกำจัด

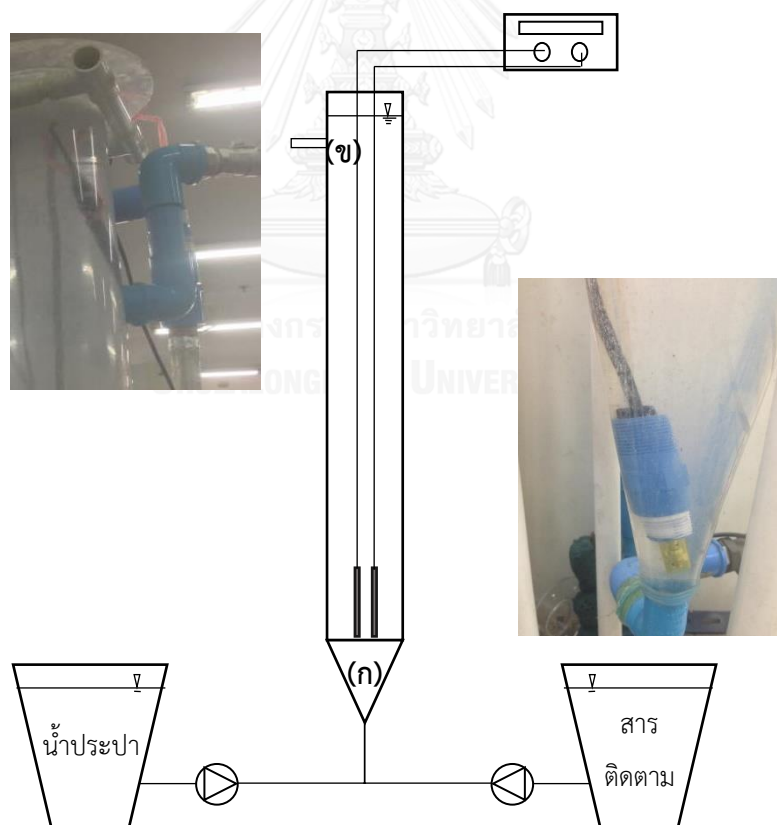
จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีปริมาณที่น้อยกว่าถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาจึงเป็นอีกตัวแปรสำคัญที่ต้องทำการศึกษาเพื่อใช้อธิบายกลไกการกวนผสมที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ

4.4.2 ศึกษาแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบพองอากาศและแบบอากาศยกจากการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution, RTD) เพื่ออธิบายความแตกต่างของกลไกที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ

4.4.2.1 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบพองอากาศ

ทำการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลด้วยน้ำประปาในถังปฏิกริยาแบบพองอากาศ ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.4.1 ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรู จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตรเป็นสารติดตาม (Tracer) วิเคราะห์รูปแบบการไหลด้วยการติดตามค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเดินระบบ โดยติดตั้งเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าจำนวน 2 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณทางน้ำเข้า (Inlet) และทางน้ำออก (Outlet) ดังรูปที่ 4-24



รูปที่ 4-24 ตำแหน่งการติดตามค่าความนำไฟฟ้าบริเวณ (ก) ทางน้ำเข้าและ (ข) ทางน้ำออก

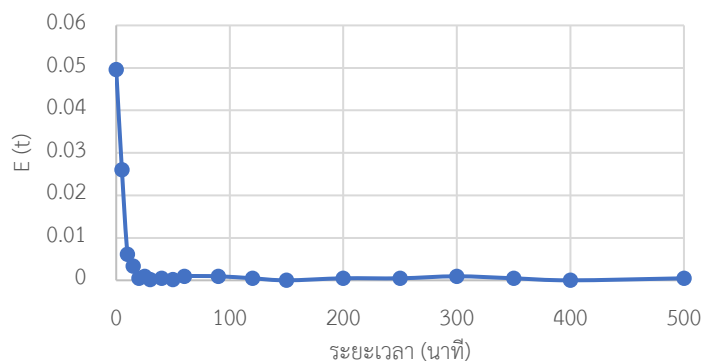
เมื่อติดตั้งเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าเสร็จสิ้น ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อให้ฟองอากาศอิมมิตัวภายในถังปฏิกิริยา จากนั้นจึงฉีดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาตร 300 มิลลิลิตร เข้าสู่ถังปฏิกิริยาบริเวณทางน้ำเข้าในรูปแบบพัลส์ (Pulse) โดยค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นการบ่งบอกถึงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่แพร่ในระบบ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์รูปแบบการไหลด้วยฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (Residence time distribution, RTD) ในรูปแบบของการสร้างกราฟ E-curve ดังสมการที่ 4-3

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (4-3)$$

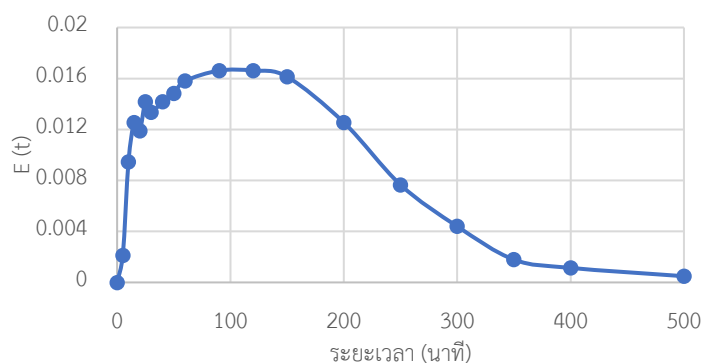
เมื่อ $E(t)$ = สัดส่วนความเข้มข้นของสารติดตามในช่วงเวลาที่ t ถึง $t + dt$
 $C(t)$ = ความเข้มข้นของสารติดตามที่ระยะเวลาใดๆ

โดยผลการติดตามค่าความนำไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศบริเวณทางน้ำเข้าและทางน้ำออก แสดงดังรูปที่ 4-25

ทางน้ำเข้า

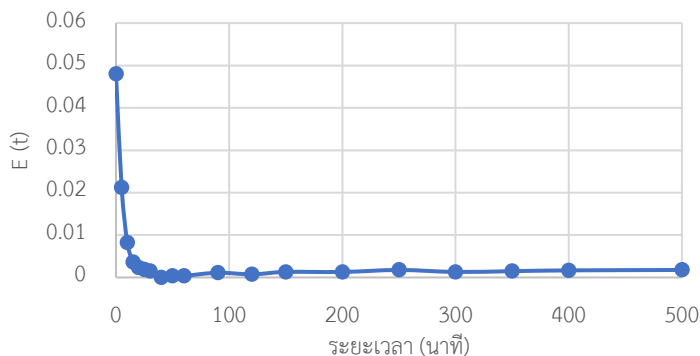


ทางน้ำออก

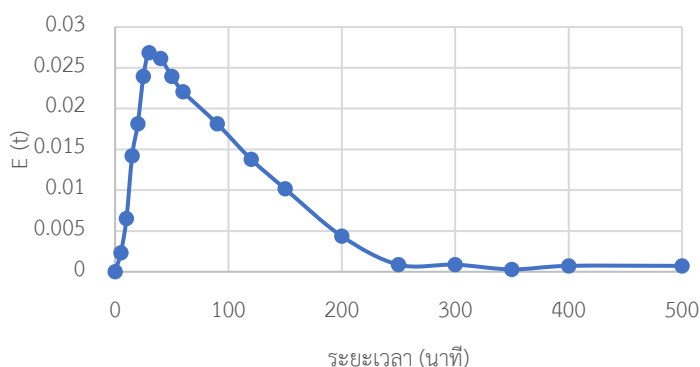


(ก) อัตราไหลของน้ำเข้า 15 ลิตรต่อชั่วโมง

ทางน้ำเข้า



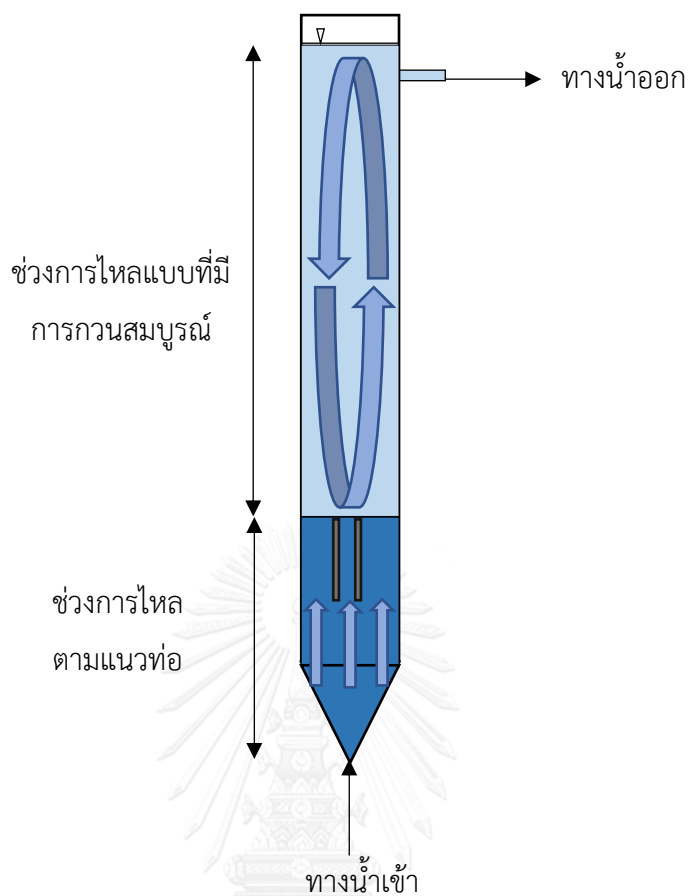
ทางน้ำออก



(ข) อัตราไหลของน้ำขาเข้า 25 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4-25 สัดส่วนความเข้มข้นของสารติดตาม หรือ $E(t)$ ในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 15 ลิตรต่อชั่วโมง (ก) และ 25 ลิตรต่อชั่วโมง (ข)

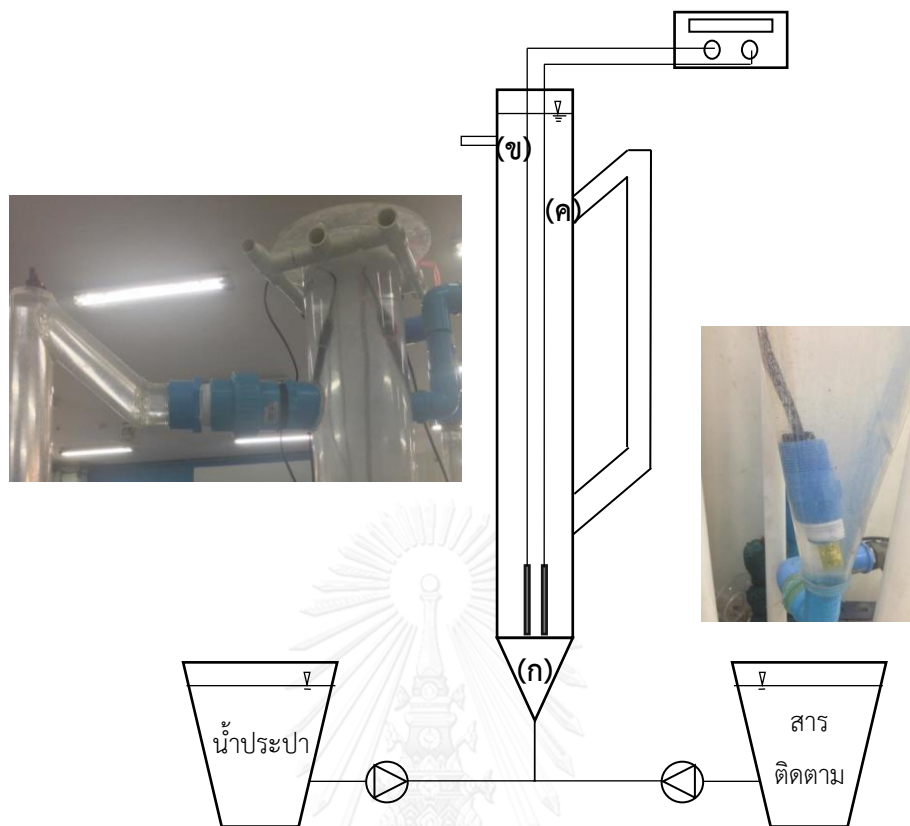
จากรูปที่ 4-25 แสดงสัดส่วนความเข้มข้นของสารติดตาม หรือ $E(t)$ ในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศบริเวณทางน้ำเข้าและทางน้ำออก ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 15 และ 25 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าเส้นกราฟ $E(t)$ บริเวณทางน้ำเข้าเป็นรูปแบบของการฉีดสารติดตามแบบพัลส์ ขณะที่บริเวณทางน้ำออกความเข้มข้นของสารติดตามเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 50 นาทีแรกของการเดินระบบ ก่อนที่จะค่อยๆ ลดลงจนมีค่าใกล้เคียง 0 ประมาณนาที่ 500 และ 300 ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 15 และ 25 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำขาเข้าที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการลดระยะเวลาพักของสารติดตามที่อยู่ในระบบ โดยรูปแบบการไหลบริเวณทางน้ำออก เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟ $E(t)$ พบว่ามีแนวโน้มเข้าใกล้รูปแบบการไหลแบบผสมระหว่างการไหลตามแนวท่อ (Plug flow) ต่ออนุกรมกับการไหลแบบที่มีการกวนสมบูรณ์ (Completely mixed) จึงสามารถสรุปได้ว่า ถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศมีช่วงการไหลภายในถังปฏิกรณ์ 2 รูปแบบ คือช่วงการไหลตามแนวท่อ เกิดขึ้นบริเวณทางน้ำเข้า ต่อด้วยช่วงการไหลแบบที่มีการกวนสมบูรณ์เกิดขึ้นตั้งแต่บริเวณการผลิตพองอากาศที่ขั้วไฟฟ้าไปจนถึงบริเวณทางน้ำออก แสดงดังรูปที่ 4-26



รูปที่ 4-26 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศขณะเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วย กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

4.4.2.2 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

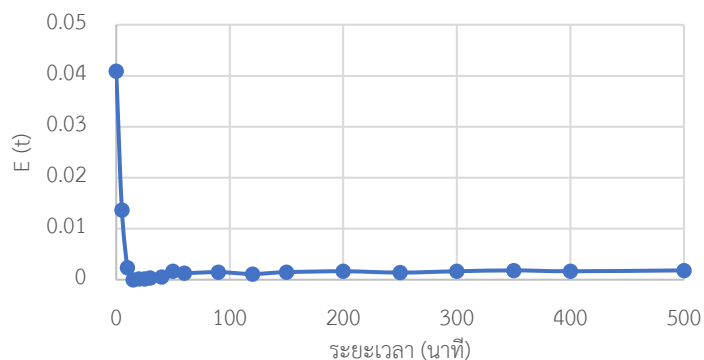
ทำการทดลองเพื่อศึกษาารูปแบบการไหลด้วยน้ำประปาในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.4.1 เดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยใช้ ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรู จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และ กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตรเป็นสารติดตาม (Tracer) วิเคราะห์รูปแบบการไหลด้วยการติดตามค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเดินระบบ โดยติดตั้งเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าจำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณทางน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ (Inlet) ทางน้ำเข้าส่วนไม่เติมอากาศ (Downcomer inlet) และทางน้ำออก (Outlet) ดังรูปที่ 4-27



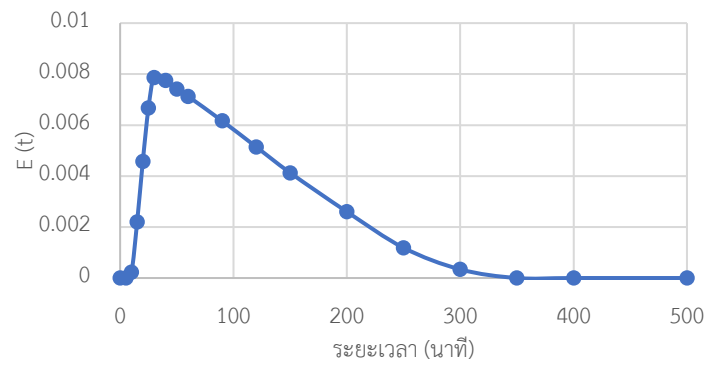
รูปที่ 4-27 ตำแหน่งการติดตามค่าความนำไฟฟ้าบริเวณทางน้ำเข้าถึงปฏิกิริยา (ก)
ทางน้ำออก (ข) และทางน้ำเข้าส่วนไม่เต็มอากาศ (ค)

เมื่อติดตั้งเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าเสร็จสิ้น ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อให้ฟองอากาศอิมัลชันภายในถังปฏิกิริยา เช่นเดียวกับการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ จากนั้นจึงฉีดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาตร 300 มิลลิลิตร เข้าสู่ถังปฏิกิริยาบริเวณทางน้ำเข้าในรูปแบบพัลส์ (Pulse) โดยผลการติดตามค่าความนำไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกทั้ง 3 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 4-28

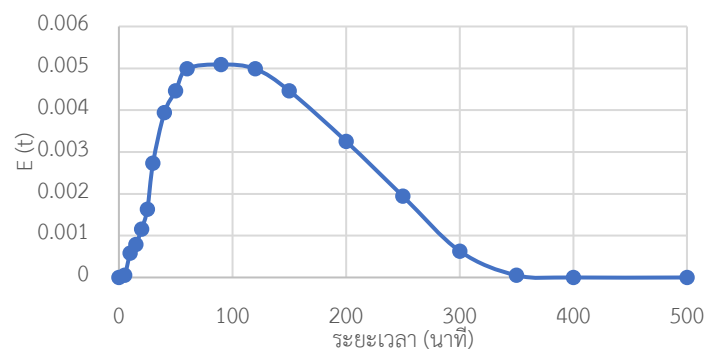
ทางน้ำเข้า



ทางน้ำเข้าส่วน
ไม่เต็มอากาศ

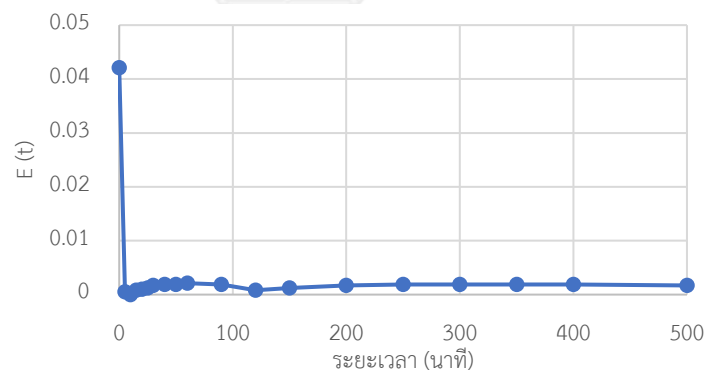


ทางน้ำออก

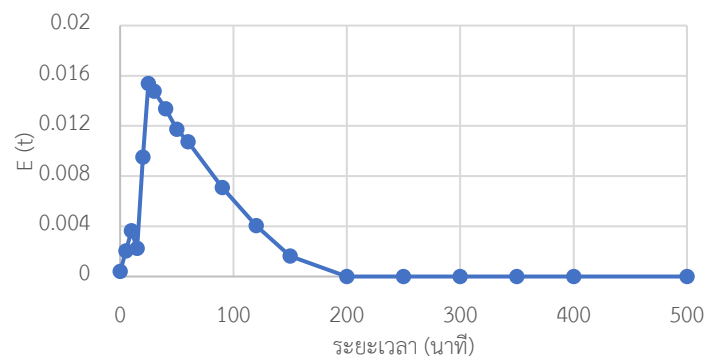


(ก) อัตราไหลของน้ำเข้า 14 ลิตรต่อชั่วโมง

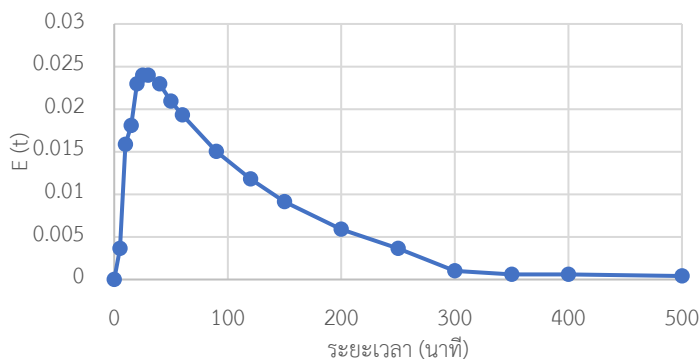
ทางน้ำเข้า



ทางน้ำเข้าส่วน
ไม่เต็มอากาศ



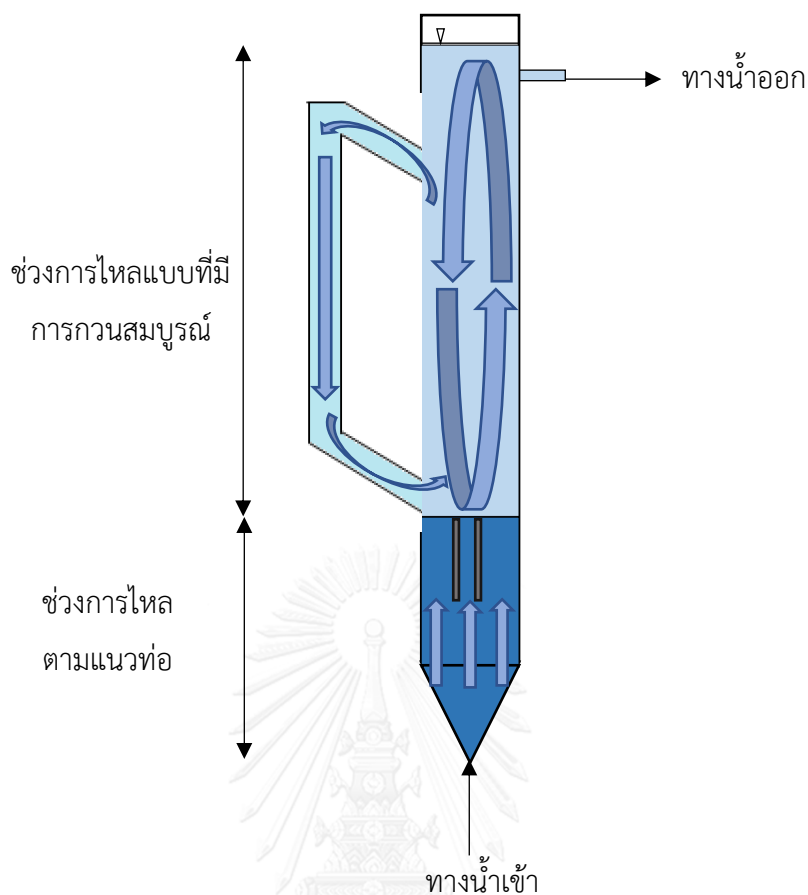
ทางน้ำออก



(ข) อัตราไหลของน้ำขาเข้า 21 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4-28 สัดส่วนความเข้มข้นของสารติดตาม หรือ $E(t)$ ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 14 ลิตรต่อชั่วโมง (ก) และ 21 ลิตรต่อชั่วโมง (ข)

จากรูปที่ 4-28 แสดงสัดส่วนความเข้มข้นของสารติดตาม หรือ $E(t)$ ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกบริเวณทางน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ ทางน้ำเข้าส่วนไม่เต็มอากาศ และทางน้ำออก ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 14 และ 21 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าเส้นกราฟ $E(t)$ บริเวณทางน้ำเข้าถังปฏิกรณ์เป็นรูปแบบของการฉีดสารติดตามแบบพัลส์ ขณะที่เส้นกราฟ $E(t)$ บริเวณทางน้ำออกมีลักษณะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟ $E(t)$ บริเวณทางน้ำออกของถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศ กล่าวได้ว่า รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกเป็นการไหลตามแนวท่อต่ออนุกรมกับการไหลแบบที่มีการกวนสมบูรณ์ เช่นเดียวกับถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟ $E(t)$ บริเวณทางน้ำเข้าส่วนไม่เต็มอากาศ พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับบริเวณทางน้ำออก จึงสรุปได้ว่าบริเวณที่ไม่มีการเติมอากาศ (Downcomer zone) มีรูปแบบการไหลเช่นเดียวกับบริเวณที่มีการเติมอากาศ (Riser zone) คือการไหลแบบที่มีการกวนสมบูรณ์ (Completely mixed) เนื่องมาจากเคลื่อนที่ของของไหลไปยังส่วนไม่เต็มอากาศแล้วกลับสู่ส่วนเติมอากาศอีกครั้ง ดังรูปที่ 4-29



รูปที่ 4-29 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกขณะเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

นอกเหนือจากการวิเคราะห์รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์โดยการติดตามค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปภายในระบบแล้ว ข้อมูลดังกล่าวที่ได้จากกราฟ $E(t)$ สามารถนำคำนวณหาระยะเวลากักเฉลี่ยที่อนุภาคคงอยู่ในถังปฏิกรณ์ ซึ่งการเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลากักเฉลี่ย (Mean residence time) ที่คำนวณได้จากข้อมูลการศึกษาารูปแบบการไหลกับระยะเวลาที่ได้อาจได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน (Design residence time) จะช่วยอธิบายพฤติกรรมของการไหลภายในถังปฏิกรณ์ โดยสามารถคำนวณระยะเวลาเฉลี่ยของอนุภาคในระบบได้จากสมการที่ 4-4

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

เมื่อ	t_m	=	ระยะเวลาเฉลี่ยที่สารติดตามอยู่ในระบบ
	t	=	ระยะเวลาที่ของของเหลวในระบบ
	$E(t)$	=	RTD function ในช่วงเวลาที่ t ถึง $t + dt$

โดยการเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาทั้ง 2 แบบของถังปฏิกริยาแบบ
ฟองอากาศและแบบอากาศยกที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 ระยะเวลาที่เฉลี่ยและระยะเวลาที่จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน
ของถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ

อัตราการไหล ของน้ำเข้า (ลิตรต่อชั่วโมง)		ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ		ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก	
		Mean residence time (นาท)	Design residence time (นาท)	Mean residence time (นาท)	Design residence time (นาท)
15	14*	89	100	108.3	120
25	21*	58.6	60	57.1	80

หมายเหตุ * : อัตราการไหลน้ำเข้าของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

จากตารางที่ 4-13 เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่เฉลี่ยที่ได้จากการศึกษา
รูปแบบการไหลกับระยะเวลาที่คำนวณจากผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันในแต่ละ
อัตราการไหลของน้ำเข้า พบว่า ระยะเวลาที่เฉลี่ยของถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ มีค่าน้อยกว่า
ระยะเวลาที่จากการบำบัดน้ำเสียในทุกค่าอัตราการไหลของน้ำเข้า อาจเกิดจากพื้นที่ภายในถัง
ปฏิกริยาบางบริเวณเกิดการหยุดนิ่งของของเหลว (Dead zone) โดยเฉพาะบริเวณใต้หัวไฟฟ้าที่ไม่เกิด
การกวนผสมของน้ำด้วยฟองอากาศ จึงทำให้ปริมาตรโดยรวมภายในถังปฏิกริยาลดลง อนุภาคจึงออก
จากถังปฏิกริยาเร็วขึ้น

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วย
กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าทั้งหมดข้างต้น สามารถสรุปตัวแปรสำคัญสำหรับ
การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ปริมาตร 28 ลิตร และ
สภาวะการทดลองที่เหมาะสม ดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 ตัวแปรการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอน และทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ปริมาตร 28 ลิตร

ตัวแปรการออกแบบ	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)		
	0.5	1.0	1.5
เดินระบบแบบทีละเท			
รูปแบบขั้วไฟฟ้า	แผ่นอลูมิเนียมเจาะรู (Ø 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร)		
ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (เซนติเมตร)	2		
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	118		
ระยะเวลาการทำปฏิกริยา (นาที)	80	100	120

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีจาร์เทสต์ ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดแบบทั่วไป และการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการทางเลือก ในด้านผลของขั้วไฟฟ้า สภาวะการทดลอง และรูปแบบถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า รวมถึงศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยาเพื่ออธิบายกลไกที่เกิดขึ้น โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- จากการศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง พบว่าขนาดของอนุภาคน้ำมันตัดเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร เนื่องจากในน้ำมันตัดมีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้อนุภาคน้ำมันมีเสถียรภาพสามารถแขวนลอยอยู่ในสารละลายได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน ยากต่อการแยกด้วยแรงโน้มถ่วง ขณะที่อนุภาคน้ำมันปาล์มมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคน้ำมันตัด โดยมีขนาดตั้งแต่ 22 ถึง 100 ไมโครเมตร เนื่องจากน้ำมันปาล์มไม่มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว จัดเป็นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้อนุภาคน้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพน้อย สามารถรวมตัวกันได้เองจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกัน และมีแนวโน้มที่จะกลับมาแยกชั้นอีกครั้งเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน โดยค่าความขุ่น และซีไอดี มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำมัน (0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร) เนื่องจากที่ความเข้มข้นของน้ำมันสูงจะมีอนุภาคน้ำมันปริมาณมากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้ค่าความขุ่น และซีไอดี มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์ม ขณะที่ความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มไม่ส่งผลต่อค่าพีเอชเริ่มต้น โดยค่าพีเอชที่วัดได้เป็นค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำประปาที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

- ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยวิธีจาร์เทสต์ สรุปดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5-1 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวแปรที่วิเคราะห์	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)		
	0.5	1.0	1.5
น้ำมันตัด			
ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	120	160	200
ประสิทธิภาพบำบัดความขุ่น (%)	92.9	93.9	96.4
ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (%)	86.3	94.7	93.6
น้ำมันปาล์ม			
ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	100	120	160
ประสิทธิภาพบำบัดความขุ่น (%)	83.2	90.5	94
ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (%)	89.2	89.8	94.3

- การศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าและสภาวะการทดลองที่เหมาะสมต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า พบว่า ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมรูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น วางขั้วไฟฟ้าห่างกัน 2 เซนติเมตร เติมน้ำที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

- การศึกษารูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบการเดินระบบแบบที่ละเทระหว่างถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก พบว่าถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ มีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีที่ใกล้เคียงกัน ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ มีค่าซีโอดีหลังผ่านการบำบัดประมาณ 80, 100 และ 115 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของน้ำมัน 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกใช้เวลาในการบำบัดมากกว่าถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศเนื่องจากในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีปริมาณน้ำเสียมากกว่า โดยมีปริมาตร 28 ลิตร ขณะที่ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีปริมาตร 25 ลิตร จึงต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเดินระบบภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีข้อดีว่าการเดินระบบภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ คือ ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่า จึงมีแนวโน้มในการประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับกำจัดตะกอนหากนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนตะกอนที่เกิดขึ้นกับปริมาณน้ำเสียที่บำบัดระหว่างกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ากับการทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมีโดยวิธีจาร์เทสต์ พบว่ากระบวนการรวม

ตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ามีอัตราการเกิดตะกอนที่น้อยกว่าการทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมี โดยที่ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตรมีอัตราการเกิดตะกอนประมาณ 30.8 และ 55 มิลลิลิตรต่อลิตร ตามลำดับ และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันในทุกความเข้มข้นของน้ำมัน

- การศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องภายในถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ พบว่าอัตราการไหลของน้ำเข้ามีผลต่อประสิทธิภาพและระยะเวลาในการบำบัด เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าจะเป็นการลดระยะเวลาในการทำปฏิกริยาระหว่างอนุภาคน้ำมันและสารโคแอกกูแลนต์ อนุภาคน้ำมันบางส่วนเหลืออยู่ในน้ำ ทำให้ค่าความขุ่นและซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำมีค่าสูง จึงต้องใช้ระยะเวลาที่สูงขึ้นตามไปด้วย ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและระยะเวลาของถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีข้อได้เปรียบจากตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาตรน้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ทำให้ง่ายต่อการกำจัดออกจากผิวน้ำ และลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการจัดการตะกอน กล่าวได้ว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีความเหมาะสมในการใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

- การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก พบว่า ถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ มีรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาเป็นการไหลตามแนวท่อต่ออนุกรมกับการไหลแบบที่มีการกวนสมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่เฉลี่ยที่ได้จากการศึกษารูปแบบการไหล (Mean residence time) กับระยะเวลาที่คำนวณจากผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน (Design residence time) พบว่า ระยะเวลาที่เฉลี่ยของถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ มีค่าน้อยกว่าระยะเวลาที่คำนวณจากการบำบัดน้ำเสียในทุกค่าอัตราการไหลของน้ำเข้า อาจเกิดจากพื้นที่ภายในถังปฏิกริยาบางบริเวณเกิดการหยุดนิ่งของของเหลว (Dead zone) โดยเฉพาะบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าที่ไม่เกิดการกวนผสมของน้ำด้วยฟองอากาศ จึงทำให้ปริมาตรโดยรวมภายในถังปฏิกริยาลดลง อนุภาคจึงออกจากถังปฏิกริยาเร็วขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

- ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้ากับน้ำเสียจริง เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต

- จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ซึ่งใช้อัตราการไหลของน้ำขาเข้าที่คำนวณจากระยะเวลาการทำปฏิกริยาที่เหมาะสมของถังปฏิกริยาแต่ละชนิดในการเดินระบบแบบที่ละเทะ จึงได้ค่าอัตราการไหลของน้ำขาเข้าที่ต่างกัน ดังนั้นอาจมีการศึกษาประสิทธิภาพในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยใช้อัตราการไหลของน้ำขาเข้าที่เท่ากัน เพื่อยืนยันผลของปริมาตรน้ำเสียในถังปฏิกริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการบำบัด

- จากผลการศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ พบว่า พื้นที่ภายในถังปฏิกริยาบางบริเวณเกิดการหยุดนิ่งของของเหลว (Dead zone) โดยเฉพาะบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าที่ไม่เกิดการกวนผสมของน้ำด้วยฟองอากาศ และบริเวณส่วนที่ไม่มีการเติมอากาศ (Downcomer zone) ของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ซึ่งมีการไหลวนของน้ำค่อนข้างต่ำ เนื่องจากระดับน้ำสูงสุดในส่วนที่มีการเติมอากาศ (Riser zone) กับระดับน้ำในส่วนที่ไม่มีการเติมอากาศมีระดับที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้แรงดันน้ำระหว่าง 2 บริเวณมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้เกิดเป็นบริเวณที่มีการหยุดนิ่งของของเหลว ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปควรมีการศึกษาเพื่อลดบริเวณที่มีการหยุดนิ่งของของเหลวให้เหลือน้อยที่สุด เช่น การเพิ่มระดับความสูงของน้ำในบริเวณที่มีการเติมอากาศให้แตกต่างกับระดับน้ำในบริเวณที่ไม่มีการเติมอากาศอย่างชัดเจน เพื่อเพิ่มแรงดันน้ำสำหรับการไหลวนของน้ำเข้าสู่บริเวณที่ไม่มีการเติมอากาศ

- ควรมีการทดลองเพิ่มเติมในถังปฏิกริยาแบบอื่นๆ และใช้งานขั้วไฟฟ้าหลายคู่ เพื่อจำลองการใช้งานในสภาวะจริง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กชกร ก้องกังวาลย์ (2552). การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กันตพงศ์ ฝิวเหลือง (2552). การศึกษาถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชฎานิน พรหมจันทร์ (2554). การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา (2552). การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พชร โพธิ์ทอง, ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา, ชัยพร ภูประเสริฐ และพิสุทธิ์ เพ็ญรมนกุล. (2554). "การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย." วารสารวิศวกรรมศาสตร์ 3(4): 1-14.

มันสิน ตันฑุลเวศม์ (2542). วิศวกรรมประปา. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมพงษ์ ทิรัญมาศสุวรรณ (2551). "กระบวนการโคแอกูเลชันด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)." วารสารเทคนิค ฉบับที่ 283.

ภาษาอังกฤษ

- Aurelle, Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok: Chulalongkorn.
- Bai, Z. S., Wang, H. L. and Tu, S. T. (2011). "Oil-water separation using hydrocyclones enhanced by air bubbles." Chemical Engineering Research and Design 89: 55-59.
- Balla, W., Essadki, A. H., Gourich, B., Dassaa, A., Chenik, H. and Azzi, M. (2010). "Electrocoagulation/electroflotation of reactive, disperse and mixture dyes in an external-loop airlift reactor." Journal of Hazardous Materials 184(1-3): 710-716.
- Behin, J., Farhadian, N., Ahmadi, M. and Parvizi, M. (2015). "Ozone assisted electrocoagulation in a rectangular internal-loop airlift reactor: Application to decolorization of acid dye." Journal of Water Process Engineering 8: 171-178.
- Bensadok, K., Belkacem, M. and Nezzal, G. (2007). "Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation." Desalination 206: 440-448.
- Bensadok, K., Benammar, S., Lopicque, F. and Nezzal, G. (2008). "Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes." Journal of Hazardous Materials 152(1): 423-430.
- Canizares, P., Martinez, F., Jimenez, C., Saez, C. and Rodrigo, M. A. (2008). "Coagulation and electrocoagulation of oil-in-water emulsions." Journal of Hazardous Materials 151(1): 44-51.
- Chenik, H., Elhafdi, M., Dassaa, A., Essaski, A. H. and Azzi, M. (2013). "Removal of Real Textile Dyes by Electrocoagulation/Electroflotation in a Pilot External-Loop Airlift Reactor." Journal of Water Resource and Protection 05(10): 1000-1006.

- Chisti, M. Y. and M. Moo-Young (1987). "Airlift reactors: Characteristics, applications and design considerations." Chemical Engineering communication 60: 195-242.
- El-Naas, M. H., Al-Zuhair, S., Al-Lobaney, A. and Makhlof, S. (2009). "Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater." Journal of Environmental Management 91(1): 180-185.
- Essadki, A. H., Gourich, B., Vial, Ch., Delmas, H. and Bennajah, M. (2008). "Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor— Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study." Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 47(8): 1211-1223.
- Essadki, A. H., et al. (2009). "Defluoridation of drinking water by electrocoagulation/ electroflotation in a stirred tank reactor with a comparative performance to an external-loop airlift reactor." Journal of Hazardous Materials 168(2-3): 1325-1333.
- Gao, S., Yang, J., Tian, J., Ma, F., Tu, G. and Du, M. (2010). "Electro-coagulation-flotation process for algae removal." Journal of Hazardous Materials 177(1-3): 336-343.
- Hamdan, S. S. and El-Naas, M. H. (2014). "An electrocoagulation column (ECC) for groundwater purification." Journal of Water Process Engineering 4: 25-30.
- Heidmann, I. and Calmano, W. (2008). "Removal of Cr(VI) from model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes." Separation and Purification Technology 61(1): 15-21.
- Ichikawa, T. (2007). "Electrical demulsification of oil-in-water emulsion." Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 302: 581-586.
- Khemis, M., Tanguy, G., Leclerc, J. P., Valentin, G. and Lopicque, F. (2005). "Electrocoagulation for the Treatment of Oil Suspensions." Process Safety and Environmental Protection 83(1): 50-57.

- Koby, M., Sentruk, E. and Bayramoglu, M. (2006). "Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation." Journal of Hazardous Materials 133(1-3): 172-176.
- Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Ramo, J. and Lassi, U. (2015). "Electrocoagulation treatment of peat bog drainage water containing humic substances." Water Research 79: 79-87.
- Kuroda, Y., Kawada, Y., Takahashi, T., Ehara, Y., Ito, T., Zukeran, A., Kono, Y. and Yasumoto, K. (2003). "Effect of electrode shape on discharge current and performance with barrier discharge type electrostatic precipitator." Journal of Electrostatics 57(3-4): 407-415.
- Malakootian, M., Mansoorian, H. J. and Moosazadeh, M. (2010). "Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water." Desalination 255(1-3): 67-71.
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K. and Chibane, M. (2009). "Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique A case study." Journal of Hazardous Materials 164(1): 215-222.
- Mongkolnauwarat, J (2014). Treatment of cutting oily wastewater by electrocoagulation/flotation (ECF): Reactor configurations and oil concentration. Degree of Master of Science Program in Environmental Management. Graduate School. Chulalongkorn University.
- Montgomery, D. C. (2001). Design and analysis of experiments. United States of America, John Wiley & sons, Inc.
- Perez, M., Rodriguez-Cano, R., Romero, L. I. and Sales, D. (2006). "Anaerobic thermophilic digestion of cutting oil wastewater: Effect of co-substrate." Biochemical Engineering Journal 29: 250-257.

- Reymond A. Serway. (1998). " Principles of physics (2nd ed.)." Fort Worth, Texas; London: Saunders College Pub. p. 602.
- Tezcan Un, U., Savas Koparal, A. and Bakir Ogutveren, U. (2009). "Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes." Journal of Environmental Management 90(1): 428-433.
- Wang, C. T., Chou, W. L. and Kuo, Y. M. (2009). "Removal of COD from laundry wastewater by electro-coagulation/electroflotation." Journal of Hazardous Materials 164(1): 81-86
- Yang, B. and Chen, G. (2012). "Submerged membrane bioreactor in treatment of simulated restaurant wastewater." Separation and Purification Technology 88: 184-190.







ภาคผนวก ก

การศึกษาความสามารถในการทำลายเสถียรภาพด้วยวิธีจาร์เทสต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการศึกษาความสามารถในการรวมตะกอนด้วยสารเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันโดยวิธี
จาร์เทสต์

● น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด

ตารางที่ ก-1 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอติของน้ำเสีย
ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร

ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH หลังบำบัด
	ความขุ่น	ซีโอติ	
0	0.00	0.00	7.20
40	1.27	6.46	7.09
80	44.59	45.49	6.85
120	92.93	86.29	6.42
160	70.38	71.90	6.29
200	58.92	45.97	6.17
240	52.07	35.73	6.02

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอติของน้ำเสีย
ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร

ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH หลังบำบัด
	ความขุ่น	ซีโอติ	
0	0.00	0.00	7.30
40	25.90	9.79	7.15
80	30.72	29.25	7.02
120	51.65	59.32	6.71
160	93.88	94.69	6.50
200	60.58	82.31	6.39
240	35.54	72.57	6.25

ตารางที่ ก-3 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร

ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH หลังบำบัด
	ความขุ่น	ซีโอติ	
0	0.00	0.00	7.72
40	2.20	6.87	7.49
80	27.22	33.91	7.17
120	51.54	54.99	7.03
160	64.56	79.52	6.86
200	96.36	93.63	6.45
240	85.02	88.20	6.29

- น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ ก-4 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร

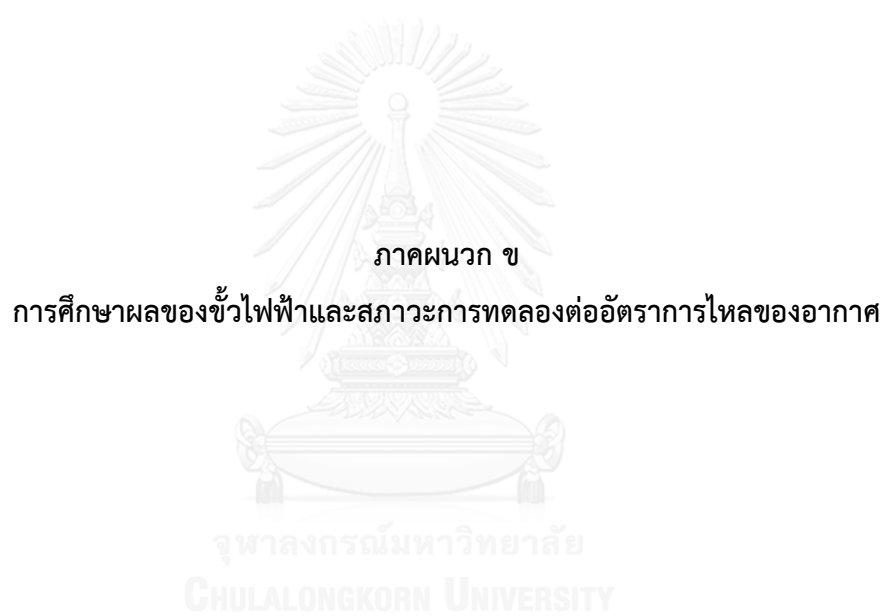
ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH หลังบำบัด
	ความขุ่น	ซีโอติ	
0	0.00	0.00	7.17
40	17.58	12.76	7.06
80	74.39	70.46	6.86
100	83.18	89.18	6.57
120	67.90	78.92	6.33
160	51.97	54.79	6.14
200	30.57	31.35	5.92

ตารางที่ ก-5 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร

ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH หลังบำบัด
	ความขุ่น	ซีโอติ	
0	0.00	0.00	7.31
40	19.85	10.31	7.12
80	51.50	47.36	6.86
100	82.73	62.70	6.64
120	90.50	89.75	6.47
160	87.88	82.30	6.21
200	70.28	75.24	5.93

ตารางที่ ก-6 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร

ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH หลังบำบัด
	ความขุ่น	ซีโอติ	
0	0.00	0.00	7.33
40	26.64	8.32	7.15
80	38.96	40.85	6.97
100	57.92	66.45	6.74
120	86.32	86.38	6.50
160	94.00	94.29	6.42
200	87.44	79.21	6.27



- **ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น**

ตารางที่ ข-1 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ

ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (เซนติเมตร)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)
1	0.75	0.28
1	1.00	0.39
1	1.25	0.43
2	0.75	0.25
2	1.00	0.39
2	1.25	0.52
3	0.75	0.31
3	1.00	0.41
3	1.25	0.56

- **ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแท่ง**

ตารางที่ ข-2 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแท่งภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ

ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (เซนติเมตร)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)
1	0.75	0.21
1	1.00	0.29
1	1.25	0.35
2	0.75	0.22
2	1.00	0.28
2	1.25	0.35
3	0.75	0.22
3	1.00	0.30
3	1.25	ขีดจำกัดของเครื่อง DC

● **ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรู**

ตารางที่ ข-3 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ

ขนาดรู (เซนติเมตร)	ระยะห่าง ระหว่างรู (เซนติเมตร)	ระยะห่าง ระหว่าง ขั้วไฟฟ้า (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหลเฉลี่ย ของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)
0.1	1	1	1.00	0.40
0.1	1	1	1.25	0.51
0.1	1	2	1.00	0.51
0.1	1	2	1.25	0.57
0.1	1	3	1.00	0.51
0.1	1	3	1.25	0.57
0.1	1.5	1	1.00	0.40
0.1	1.5	1	1.25	0.50
0.1	1.5	2	1.00	0.43
0.1	1.5	2	1.25	0.54
0.1	1.5	3	1.00	0.46
0.1	1.5	3	1.25	0.56
0.1	3	1	1.00	0.39
0.1	3	1	1.25	0.49
0.1	3	2	1.00	0.40
0.1	3	2	1.25	0.51
0.1	3	3	1.00	0.44
0.1	3	3	1.25	0.53
0.3	1	1	1.00	0.40
0.3	1	1	1.25	0.53
0.3	1	2	1.00	0.48

ตารางที่ ข-3 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ
(ต่อ)

ขนาดรู (เซนติเมตร)	ระยะห่าง ระหว่างรู (เซนติเมตร)	ระยะห่าง ระหว่าง ขั้วไฟฟ้า (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหลเฉลี่ย ของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)
0.3	1	2	1.25	0.58
0.3	1	3	1.00	0.51
0.3	1	3	1.25	0.62
0.3	1.5	1	1.00	0.40
0.3	1.5	1	1.25	0.50
0.3	1.5	2	1.00	0.46
0.3	1.5	2	1.25	0.56
0.3	1.5	3	1.00	0.47
0.3	1.5	3	1.25	0.58
0.3	3	1	1.00	0.40
0.3	3	1	1.25	0.49
0.3	3	2	1.00	0.43
0.3	3	2	1.25	0.53
0.3	3	3	1.00	0.46
0.3	3	3	1.25	0.56
0.5	1	1	1.00	0.42
0.5	1	1	1.25	0.54
0.5	1	2	1.00	0.48
0.5	1	2	1.25	0.59
0.5	1	3	1.00	0.52
0.5	1	3	1.25	0.63

ตารางที่ ข-3 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ
(ต่อ)

ขนาดรู (เซนติเมตร)	ระยะห่าง ระหว่างรู (เซนติเมตร)	ระยะห่าง ระหว่าง ขั้วไฟฟ้า (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหลเฉลี่ย ของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)
0.5	1.5	1	1.00	0.41
0.5	1.5	1	1.25	0.52
0.5	1.5	2	1.00	0.50
0.5	1.5	2	1.25	0.60
0.5	1.5	3	1.00	0.49
0.5	1.5	3	1.25	0.60
0.5	3	1	1.00	0.39
0.5	3	1	1.25	0.49
0.5	3	2	1.00	0.49
0.5	3	2	1.25	0.58
0.5	3	3	1.00	0.47
0.5	3	3	1.25	0.58

- **ขั้วไฟฟ้ารูปแบบเกลียว (แคโทด) จับคู่กับรูปแบบแท่ง (แอโนด)**

ตารางที่ ข-4 อัตราการไหลของอากาศของขั้วไฟฟ้ารูปแบบเกลียว (แคโทด) จับคู่กับรูปแบบแท่ง (แอโนด) ภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ

ขนาดเกลียว (เซนติเมตร)	ความยาวเกลียว (เซนติเมตร)	ระยะห่าง ระหว่าง ขั้วไฟฟ้า (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหลเฉลี่ยของ อากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)
0.46	68	1	1.00	0.29
0.46	68	1	1.25	0.36
0.46	68	2	1.00	0.30
0.46	68	2	1.25	0.37
0.46	68	3	1.00	ขีดจำกัดของเครื่อง DC
0.46	68	3	1.25	ขีดจำกัดของเครื่อง DC
0.6	53	1	1.00	0.29
0.6	53	1	1.25	0.35
0.6	53	2	1.00	0.29
0.6	53	2	1.25	0.36
0.6	53	3	1.00	ขีดจำกัดของเครื่อง DC
0.6	53	3	1.25	ขีดจำกัดของเครื่อง DC

ผลการศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟองอากาศระหว่างเดินระบบเป็นระยะเวลา 120 นาที

● **ข้อไฟฟ้ารูปแบบแผ่น**

ตารางที่ ข-5 อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของน้ำในระบบ และความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลว เมื่อทำการทดลองด้วยข้อไฟฟ้ารูปแบบแผ่นที่ระยะห่างระหว่างข้อไฟฟ้า 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เป็นระยะเวลา 120 นาที

ระยะเวลา (นาที)	อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)	อุณหภูมิของน้ำในระบบ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วเกรเดียนท์ (ต่อวินาที)
0	0.00	29	0.00000
5	0.43	29.5	0.00097
10	0.45	30.0	0.00099
15	0.47	30.0	0.00101
20	0.49	30.5	0.00103
25	0.51	31.0	0.00105
30	0.54	31.5	0.00108
40	0.59	32.5	0.00113
50	0.59	33.5	0.00113
60	0.60	35.0	0.00114
70	0.61	36.0	0.00115
80	0.63	37.2	0.00117
90	0.64	38.5	0.00118
100	0.64	40.0	0.00117
110	0.64	41.2	0.00118
120	0.65	42.0	0.00119

- **ข้าวไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร**

ตารางที่ ข-6 อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของน้ำในระบบ และความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลว เมื่อทำการทดลองด้วยข้าวไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรู (ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร) ที่ระยะห่างระหว่างข้าวไฟฟ้า 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เป็นระยะเวลา 120 นาที

ระยะเวลา (นาที)	อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)	อุณหภูมิของน้ำในระบบ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วเกรเดียนท์ (ต่อวินาที)
0	0.00	29.5	0.00000
5	0.46	30.0	0.00100
10	0.50	30.0	0.00104
15	0.52	30.5	0.00106
20	0.53	31.0	0.00107
25	0.57	31.5	0.00111
30	0.59	32.0	0.00113
40	0.60	33.0	0.00114
50	0.62	34.0	0.00116
60	0.63	35.5	0.00117
70	0.63	37.0	0.00117
80	0.65	38.0	0.00118
90	0.66	39.0	0.00119
100	0.66	40.0	0.00119
110	0.66	41.0	0.00119
120	0.66	42.0	0.00120

- **ชีวไฟฟ้ารูปแบบแห้ง**

ตารางที่ ข-8 อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของน้ำในระบบ และความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลว เมื่อทำการทดลองด้วยชีวไฟฟ้ารูปแบบแห้ง ที่ระยะห่างระหว่างชีวไฟฟ้า 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เป็นระยะเวลา 120 นาที

ระยะเวลา (นาที)	อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)	อุณหภูมิของน้ำในระบบ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วเกรเดียนท์ (ต่อวินาที)
0	0.00	30.0	0.00000
5	0.39	30.5	0.00092
10	0.41	31.0	0.00094
15	0.42	32.0	0.00095
20	0.43	33.5	0.00097
25	0.45	35.0	0.00098
30	0.45	35.5	0.00099
40	0.46	36.5	0.00100
50	0.46	37.5	0.00100
60	0.44	38.5	0.00098
70	0.46	39.5	0.00100
80	0.47	40.5	0.00101
90	0.47	41.5	0.00100
100	0.47	42.0	0.00101
110	0.48	42.5	0.00102
120	0.48	43.0	0.00102

ผลการศึกษาชนิดของข้าวไฟฟ้าต่ออัตราไหลของอากาศระหว่างเดินระบบเป็นระยะเวลา 120 นาที

● **ข้าวไฟฟ้าที่ทำจากแกรไฟต์**

ตารางที่ ข-10 อัตราการไหลของอากาศ และอุณหภูมิของน้ำในระบบ เมื่อทำการทดลองด้วยข้าวไฟฟ้ารูปแบบแผ่นที่ทำจากแกรไฟต์ ที่ระยะห่างระหว่างข้าวไฟฟ้า 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เป็นระยะเวลา 120 นาที

ระยะเวลา (นาที)	อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)	อุณหภูมิของน้ำในระบบ (องศาเซลเซียส)
0	0.00	30.0
5	0.22	30.5
10	0.22	31.0
15	0.23	31.5
20	0.23	32.0
25	0.23	33.0
30	0.23	33.5
40	0.24	35.5
50	0.25	37.0
60	0.27	38.0
70	0.27	39.0
80	0.27	39.5
90	0.27	40.0
100	0.27	40.0
110	0.28	41.0
120	0.28	41.0

- **ข้าวไฟฟ้าที่ทำจากไทเทเนียม**

ตารางที่ ข-11 อัตราการไหลของอากาศ และอุณหภูมิของน้ำในระบบ เมื่อทำการทดลองด้วยข้าวไฟฟ้า รูปแบบแผ่นเจาะรู (ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร) ที่ทำจากไทเทเนียม ที่ระยะห่างระหว่างข้าวไฟฟ้า 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เป็นระยะเวลา 120 นาที

ระยะเวลา (นาที)	อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศ (มิลลิลิตรต่อวินาที)	อุณหภูมิของน้ำในระบบ (องศาเซลเซียส)
0	0.00	30.0
5	0.29	30.5
10	0.29	31.0
15	0.30	31.5
20	0.30	32.0
25	0.30	33.0
30	0.31	33.5
40	0.30	35.0
50	0.31	36.5
60	0.31	38.0
70	0.31	39.0
80	0.31	40.0
90	0.32	40.5
100	0.31	41.0
110	0.31	41.0
120	0.31	41.5

ภาคผนวก ค

การศึกษารูปแบบถังปฏิกริยาต่อกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันโดยถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column reactor, BCR) ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม

- น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด 0.5 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ ค-1 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.20	0
5	2	2	7.53	1
10	6	2	7.65	2
15	7	7	7.65	2
20	7	6	7.75	3
30	6	14	7.76	5
40	19	29	7.78	10
50	77	76	7.83	20
60	94	84	7.82	24
70	98	90	7.79	30
80	98	91	7.71	30
90	99	91	7.71	30

ตารางที่ ค-2 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีไอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีไอดี		
0	0	0	7.19	0
5	6	1	7.25	1
10	9	6	7.29	2
15	11	25	7.32	3
20	14	27	7.37	5
30	20	27	7.41	5
40	60	39	7.45	16
50	89	85	7.43	25
60	98	91	7.54	27
70	98	90	7.56	34
80	98	91	7.71	38
90	99	92	7.72	45

ตารางที่ ค-3 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีไอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีไอดี		
0	0	0	7.19	0
5	11	13	7.15	1
10	14	26	7.33	2
15	16	29	7.33	3
20	22	30	7.29	5
30	40	31	7.15	9
40	78	48	7.20	20
50	95	83	7.25	27
60	98	88	7.33	35
70	99	89	7.58	40
80	99	90	7.54	45
90	99	92	7.60	50

● **น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด 1.0 กรัมต่อลิตร**

ตารางที่ ค-4 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีไอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีไอดี		
0	0	0	7.33	0
5	1	13	7.38	0.5
10	0	15	7.40	1
15	1	23	7.39	2
20	2	26	7.45	3
30	2	28	7.48	5
40	7	30	7.50	10
50	14	53	7.54	15
60	63	77	7.56	28
70	88	87	7.56	32
80	98	94	7.60	36
90	99	95	7.59	41
100	99	93	7.52	45
110	99	93	7.42	51
120	99	96	7.45	52

ตารางที่ ค-5 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีไอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีไอดี		
0	0	0	7.36	0
5	0	16	7.37	0.5
10	0	16	7.45	1
15	4	19	7.50	2
20	5	23	7.53	3
30	6	33	7.58	7
40	8	35	7.62	10
50	19	56	7.67	14
60	46	74	7.67	23
70	83	86	7.69	32
80	97	94	7.73	35
90	99	95	7.74	38
100	99	95	7.72	42
110	99	95	7.80	45
120	99	96	7.86	52

ตารางที่ ค-6 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีไอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีไอดี		
0	0	0	7.49	0
5	1	14	7.40	0.5
10	1	16	7.53	1
15	3	16	7.61	2
20	6	20	7.60	3
30	12	29	7.65	7
40	18	39	7.65	10
50	41	53	7.65	12
60	58	69	7.65	22
70	84	84	7.70	30
80	96	96	7.73	35
90	99	97	7.79	40
100	99	97	7.82	45
110	99	97	7.84	50
120	99	97	7.89	55

- น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด 1.5 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ ค-7 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีไอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีไอดี		
0	0	0	7.65	0
5	0	0	7.81	1
10	2	13	7.89	1
15	3	25	7.93	3
20	4	31	7.90	5
30	4	38	7.92	10
40	10	38	7.95	14
50	12	44	7.96	17
60	37	53	7.93	20
70	52	56	7.89	27
80	77	63	7.93	40
90	94	93	7.97	45
100	99	96	7.92	47
110	99	96	7.93	48
120	99	98	7.92	51

ตารางที่ ค-8 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีไอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีไอดี		
0	0	0	7.84	0
5	0	0	7.92	1
10	0	3	7.97	1.5
15	1	13	8.02	2
20	2	25	8.02	5
30	1	38	8.03	8
40	4	44	8.03	12
50	10	50	8.04	18
60	41	56	8.08	22
70	51	72	8.09	25
80	74	72	8.12	33
90	93	97	8.13	40
100	98	98	8.12	46
110	99	98	8.12	50
120	99	98	8.12	53

ตารางที่ ค-9 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีไอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีไอดี		
0	0	0	7.84	0
5	1	3	7.92	0.5
10	1	3	7.97	1
15	2	15	8.02	2
20	2	39	8.02	3
30	5	48	8.03	7
40	9	52	8.03	10
50	11	55	8.04	12
60	33	64	8.08	22
70	48	70	8.09	30
80	78	76	8.09	35
90	94	96	8.13	40
100	98	96	8.14	45
110	99	96	8.12	50
120	99	98	8.14	55

- น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 0.5 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ ค-10 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.17	0
5	3	9	7.27	1
10	5	27	7.35	2
15	1	35	7.39	3
20	44	62	7.38	8
30	88	75	7.42	15
40	90	91	7.40	20
50	90	94	7.46	23
60	90	93	7.41	26
70	90	94	7.49	30
80	90	95	7.54	35
90	91	94	7.59	37

ตารางที่ ค-11 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.16	0
5	4	11	7.22	1
10	3	13	7.27	2
15	3	31	7.31	2
20	41	62	7.34	6
30	81	91	7.56	13
40	83	94	7.47	17
50	89	96	7.50	20
60	89	97	7.51	22
70	88	98	7.49	27
80	89	97	7.51	30
90	89	98	7.56	38

ตารางที่ ค-12 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.15	0
5	2	4	7.19	1
10	3	33	7.23	1
15	6	40	7.27	2
20	42	60	7.34	7
30	81	85	7.49	13
40	89	93	7.47	17
50	91	96	7.50	20
60	93	96	7.51	23
70	92	96	7.49	28
80	90	96	7.51	33
90	90	97	7.56	38

● **น้ำเสี้ยวสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 1.0 กรัมต่อลิตร**

ตารางที่ ค-13 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น สีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	สีโอดี		
0	0	0	7.46	0
5	2	0	7.43	1
10	1	0	7.48	2
15	1	28	7.44	3
20	12	52	7.48	8
30	29	55	7.42	13
40	73	62	7.39	18
50	90	69	7.41	20
60	89	72	7.43	23
70	90	79	7.44	25
80	91	94	7.40	28
90	91	92	7.45	30
100	91	96	7.47	33
110	90	96	7.43	35
120	90	97	7.43	37

ตารางที่ ค-14 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.16	0
5	6	7	7.17	1
10	10	10	7.19	2
15	12	43	7.19	3
20	32	47	7.16	10
30	69	57	7.14	13
40	86	63	7.11	17
50	89	77	7.09	20
60	89	87	7.12	23
70	89	90	7.16	25
80	90	95	7.15	30
90	90	95	7.10	32
100	91	96	7.15	35
110	91	95	7.10	38
120	92	96	7.12	40

ตารางที่ ค-15 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น สีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	สีโอดี		
0	0	0	7.30	0
5	6	10	7.28	2
10	13	24	7.39	3
15	15	41	7.46	4
20	27	59	7.49	5
30	69	62	7.54	14
40	86	69	7.53	17
50	90	76	7.51	21
60	92	83	7.55	25
70	93	90	7.52	27
80	93	95	7.55	29
90	93	97	7.54	30
100	94	96	7.58	32
110	93	97	7.54	36
120	94	98	7.59	40

● **น้ำเสี้ยวสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 1.5 กรัมต่อลิตร**

ตารางที่ ค-16 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น สีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	สีโอดี		
0	0	0	7.35	0
5	2	57	7.41	3
10	3	72	7.49	4
15	24	78	7.53	5
20	30	78	7.50	5
30	50	80	7.52	7
40	71	88	7.45	20
50	86	88	7.46	25
60	89	90	7.53	25
70	89	92	7.49	27
80	90	94	7.53	30
90	90	94	7.47	31
100	92	92	7.52	35
110	92	95	7.53	37
120	93	97	7.52	37

ตารางที่ ค-17 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.35	0
5	1	42	7.37	3
10	7	58	7.41	3
15	34	63	7.45	6
20	43	88	7.42	10
30	75	88	7.47	14
40	87	92	7.51	20
50	92	90	7.49	24
60	91	93	7.47	27
70	93	90	7.45	30
80	94	92	7.42	32
90	94	93	7.44	35
100	94	95	7.47	35
110	94	96	7.45	36
120	94	98	7.41	37

ตารางที่ ค-18 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.30	0
5	1	54	7.33	3
10	14	58	7.39	4
15	29	78	7.42	5
20	44	85	7.44	10
30	62	87	7.47	18
40	81	93	7.43	22
50	86	94	7.44	25
60	90	94	7.48	27
70	92	91	7.44	27
80	94	93	7.46	30
90	94	95	7.44	33
100	94	94	7.45	34
110	94	96	7.45	36
120	94	98	7.46	37

ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันโดยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Air-lift reactor, ALR) ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม

- น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด 0.5 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ ค-19 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.21	0
5	1	18	7.41	2
10	3	20	7.48	2
15	5	23	7.47	3
20	8	28	7.54	4
30	13	32	7.56	4
40	15	45	7.51	5
50	32	60	7.49	10
60	65	77	7.46	15
70	84	87	7.42	20
80	94	93	7.45	22
90	95	95	7.43	25

ตารางที่ ค-20 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.25	0
5	3	19	7.41	1
10	7	20	7.45	2
15	9	21	7.50	3
20	13	32	7.54	3
30	14	35	7.57	4
40	23	48	7.54	5
50	52	62	7.50	12
60	68	81	7.51	15
70	85	90	7.53	18
80	94	94	7.55	21
90	95	94	7.53	23

ตารางที่ ค-21 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.17	0
5	2	19	7.35	2
10	6	25	7.42	2
15	10	27	7.45	3
20	12	33	7.49	4
30	17	38	7.53	4
40	25	53	7.51	5
50	56	65	7.53	10
60	73	86	7.48	14
70	85	92	7.45	18
80	94	94	7.45	22
90	95	95	7.43	24

● **น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด 1.0 กรัมต่อลิตร**

ตารางที่ ค-22 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.33	0
5	6	10	7.38	1
10	7	18	7.40	2
15	9	20	7.39	3
20	12	28	7.45	5
30	17	33	7.48	5
40	20	35	7.50	7
50	30	40	7.54	9
60	35	50	7.56	12
70	53	65	7.56	15
80	77	81	7.60	24
90	91	86	7.59	29
100	96	90	7.52	32
110	97	93	7.42	35
120	98	95	7.45	36

ตารางที่ ค-23 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิริยาแบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.43	0
5	6	12	7.48	1
10	8	14	7.50	2
15	12	18	7.49	3
20	16	28	7.45	3
30	21	38	7.48	5
40	23	42	7.50	7
50	34	46	7.54	10
60	37	48	7.56	12
70	58	56	7.56	16
80	78	83	7.60	25
90	93	90	7.59	30
100	98	95	7.62	32
110	98	95	7.62	35
120	98	96	7.65	38

ตารางที่ ค-24 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.46	0
5	9	15	7.47	2
10	12	24	7.45	2
15	17	27	7.50	3
20	27	32	7.53	4
30	30	39	7.58	5
40	31	41	7.60	5
50	33	49	7.62	10
60	39	51	7.65	13
70	62	61	7.69	17
80	78	80	7.70	25
90	91	88	7.68	30
100	97	93	7.72	33
110	98	95	7.70	36
120	98	96	7.70	36

- **น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด 1.5 กรัมต่อลิตร**

ตารางที่ ค-25 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.88	0
10	2	8	8.03	1
20	6	15	8.01	2
30	6	30	8.05	4
40	7	37	8.08	7
50	16	43	8.08	9
60	19	48	8.07	11
70	28	52	8.11	13
80	36	64	8.13	17
90	62	76	8.13	20
100	84	90	8.11	28
110	93	92	8.06	33
120	94	95	8.17	34
130	96	95	8.15	34
140	98	96	8.17	36

ตารางที่ ค-26 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.74	0
10	3	9	7.82	2
20	10	28	7.87	3
30	13	33	7.92	6
40	17	34	7.92	8
50	18	48	8.01	10
60	24	50	8.05	12
70	28	55	8.03	15
80	38	68	8.07	17
90	57	74	8.05	22
100	83	87	8.10	30
110	92	91	8.09	35
120	97	95	8.12	36
130	99	95	8.12	38
140	99	96	8.14	38

ตารางที่ ค-27 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้น ในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วย กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิริยาแบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบ แผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่าง ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.65	0
10	10	5	7.81	2
20	12	16	7.89	3
30	13	26	7.93	4
40	15	39	7.90	6
50	22	43	7.92	7
60	34	51	7.95	11
70	40	56	7.96	13
80	51	70	7.93	17
90	71	79	7.89	22
100	89	88	7.93	29
110	95	93	7.97	32
120	97	94	7.92	33
130	98	94	7.93	33
140	99	96	7.92	35

- **น้ำเสี้ยวสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 0.5 กรัมต่อลิตร**

ตารางที่ ค-28 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น สีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	สีโอติ		
0	0	0	7.06	0
5	9	16	7.11	1
10	19	23	7.24	1
15	33	30	7.31	1
20	39	42	7.35	2
30	53	67	7.38	8
40	69	79	7.37	11
50	72	93	7.39	15
60	76	93	7.39	18
70	82	95	7.40	21
80	83	94	7.39	23
90	85	93	7.38	25

ตารางที่ ค-29 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น สีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	สีโอดี		
0	0	0	7.07	0
5	10	24	7.13	1
10	16	30	7.15	1
15	19	37	7.17	2
20	27	48	7.19	4
30	68	76	7.17	7
40	73	85	7.18	11
50	75	95	7.20	15
60	83	96	7.18	18
70	86	96	7.21	21
80	87	95	7.22	23
90	92	97	7.25	27

ตารางที่ ค-30 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น สีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	สีโอดี		
0	0	0	7.09	0
5	13	20	7.11	1
10	16	27	7.13	1
15	24	36	7.15	2
20	31	45	7.12	3
30	59	75	7.13	7
40	76	84	7.15	12
50	80	92	7.15	15
60	82	93	7.18	17
70	84	94	7.20	20
80	86	95	7.25	21
90	88	95	7.23	25

● **น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 1.0 กรัมต่อลิตร**

ตารางที่ ค-31 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.10	0
5	4	23	7.12	1
10	15	39	7.15	2
15	15	42	7.12	4
20	19	52	7.15	5
30	46	68	7.10	8
40	68	74	7.14	12
50	82	84	7.15	17
60	84	90	7.12	18
70	87	93	7.16	20
80	89	93	7.15	24
90	90	94	7.10	26
100	90	94	7.15	27
110	90	95	7.10	30
120	90	95	7.12	30

ตารางที่ ค-32 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิริยาแบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.16	0
5	1	22	7.17	2
10	14	24	7.19	3
15	14	39	7.19	3
20	21	39	7.16	5
30	50	72	7.14	8
40	73	74	7.11	12
50	86	80	7.09	14
60	86	87	7.12	18
70	86	90	7.16	20
80	89	93	7.15	21
90	90	95	7.10	22
100	90	95	7.15	24
110	90	95	7.10	25
120	91	95	7.12	26

ตารางที่ ค-33 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.01	0
5	13	27	7.07	2
10	14	31	7.09	2
15	16	35	7.10	3
20	27	47	7.13	4
30	57	65	7.11	8
40	80	78	7.05	10
50	87	84	7.09	12
60	89	92	7.11	15
70	90	94	7.10	17
80	91	95	7.09	19
90	91	96	7.05	20
100	91	96	7.05	22
110	91	95	7.10	23
120	92	97	7.12	25

● **น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 1.5 กรัมต่อลิตร**

ตารางที่ ค-34 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่น จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.47	0
5	13	9	7.45	2
10	16	19	7.49	3
15	34	26	7.52	3
20	40	38	7.55	5
30	57	72	7.54	8
40	75	88	7.57	10
50	87	88	7.59	15
60	89	91	7.62	17
70	91	91	7.58	20
80	91	92	7.60	22
90	92	94	7.61	22
100	92	95	7.64	25
110	92	96	7.63	25
120	92	96	7.59	27

ตารางที่ ค-35 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.50	0
5	8	3	7.47	2
10	12	9	7.49	2
15	32	41	7.51	3
20	39	58	7.52	5
30	72	83	7.55	8
40	84	86	7.59	11
50	87	88	7.63	14
60	91	89	7.61	17
70	92	95	7.65	20
80	92	95	7.66	22
90	92	95	7.60	23
100	93	95	7.65	25
110	93	96	7.66	27
120	93	95	7.65	28

ตารางที่ ค-36 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ซีโอ ค่าพีเอช และความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ใช้ขั้วไฟฟ้ารูปแบบแผ่นเจาะรูที่ขนาดรู 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร และค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		pH ของน้ำใน ระบบ	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
0	0	0	7.35	0
5	6	18	7.41	2
10	27	28	7.45	3
15	30	33	7.49	3
20	31	46	7.55	7
30	58	77	7.52	8
40	82	86	7.51	10
50	86	88	7.46	13
60	89	91	7.53	16
70	90	91	7.58	17
80	91	93	7.54	20
90	91	94	7.53	22
100	92	96	7.52	23
110	92	96	7.53	25
120	92	97	7.52	25



ผลการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องสำหรับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

ตารางที่ ง-1 อัตราการไหลของน้ำขาเข้าของถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกจากการคำนวณด้วยระยะเวลาที่ความเข้มข้นน้ำมันต่างๆ

ความเข้มข้นน้ำมัน (กรัมต่อลิตร)	ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ		ถังปฏิบัติการแบบอากาศยก	
	เวลากัก (นาทีก)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	เวลากัก (นาทีก)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)
0.5	60	25	80	21
1.0	90	17	100	17
1.5	100	15	120	14

● ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ

ตารางที่ ง-2 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 25 ลิตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ปริมาณน้ำมันเข้าระบบ 12.5 กรัมต่อชั่วโมง)

ระยะเวลา (นาทีก)	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น (เปอร์เซ็นต์)	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
0	0.0	0
10	14.0	1
20	19.1	3
40	30.5	6
60	63.3	22
90	68.9	25
120	75.9	29
150	78.8	31
200	85.1	34
250	86.4	40
300	88.6	42

ตารางที่ ง-2 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ที่ความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ปริมาณน้ำมันเข้าระบบ 12.5 กรัมต่อชั่วโมง) (ต่อ)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น (เปอร์เซ็นต์)	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
350	90.5	44
400	92.5	45
500	92.9	50

ตารางที่ ง-3 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 17 ลิตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร (ปริมาณน้ำมันเข้าระบบ 17.0 กรัมต่อชั่วโมง)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น (เปอร์เซ็นต์)	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
0	0.0	0
10	4.0	2
20	6.6	4
40	18.7	6
60	35.6	10
90	55.5	16
120	67.7	31
150	76.1	34
200	80.6	37
250	83.1	39
300	85.4	40
350	88.4	44
400	90.8	46
500	91.7	50

ตารางที่ ง-4 ประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่มและความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 15 ลิตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร (ปริมาณน้ำมันเข้าระบบ 22.5 กรัมต่อชั่วโมง)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่ม (เปอร์เซ็นต์)	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
0	0.0	0
10	3.3	3
20	4.2	5
40	16.3	6
60	27.4	11
90	49.0	18
120	65.0	30
150	71.6	34
200	78.4	38
250	81.4	38
300	83.8	41
350	87.0	43
400	89.8	45
500	91.7	50

- **ถึงปฏิบัติการแบบอากาศยก**

ตารางที่ ง-5 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถึงปฏิบัติการแบบอากาศยก ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 21 ลิตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำมัน 0.5 กรัมต่อลิตร (ปริมาณน้ำมันเข้าระบบ 10.5 กรัมต่อชั่วโมง)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น (เปอร์เซ็นต์)	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
0	0.0	0
10	10.7	2
20	16.0	2
40	40.5	5
60	46.9	10
90	56.8	20
120	68.9	25
150	80.6	27
200	82.7	30
250	85.0	34
300	86.2	38
350	88.1	40
400	89.7	43
500	91.8	45

ตารางที่ ง-6 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 17 ลิตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำมัน 1.0 กรัมต่อลิตร (ปริมาณน้ำมันเข้าระบบ 17.0 กรัมต่อชั่วโมง)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น (เปอร์เซ็นต์)	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
0	0.0	0
10	3.3	2
20	6.5	4
40	17.6	5
60	32.9	9
90	52.7	15
120	62.6	27
150	71.9	31
200	78.4	34
250	80.8	35
300	82.6	37
350	84.6	40
400	88.5	41
500	89.9	45

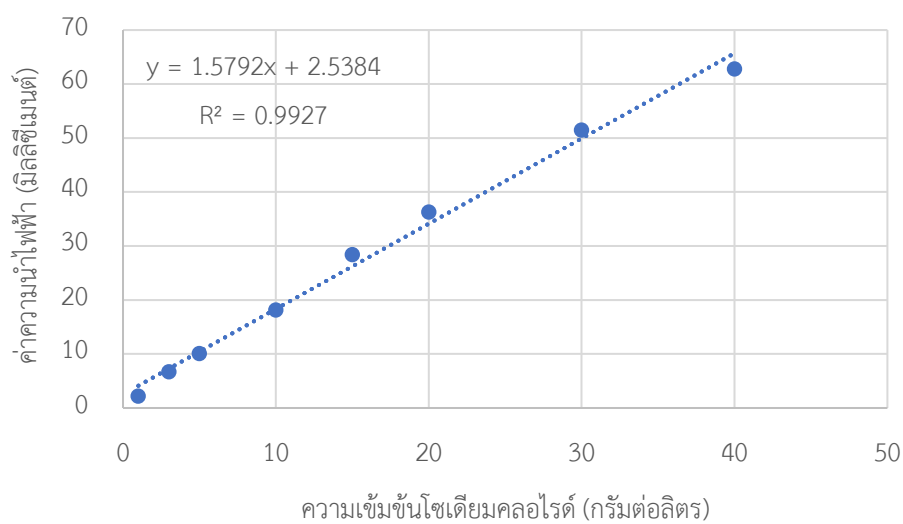
ตารางที่ ง-7 ประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่มและความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ที่อัตราไหลของน้ำขาเข้า 14 ลิตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำมัน 1.5 กรัมต่อลิตร (ปริมาณน้ำมันเข้าระบบ 21.0 กรัมต่อชั่วโมง)

ระยะเวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่ม (เปอร์เซ็นต์)	ความหนาชั้นตะกอน (มิลลิเมตร)
0	0.0	0
10	2.1	2
20	4.2	2
40	17.2	5
60	27.1	10
90	46.2	16
120	62.3	26
150	67.7	30
200	76.6	32
250	80.2	35
300	83.1	38
350	84.3	41
400	86.7	43
500	89.6	47

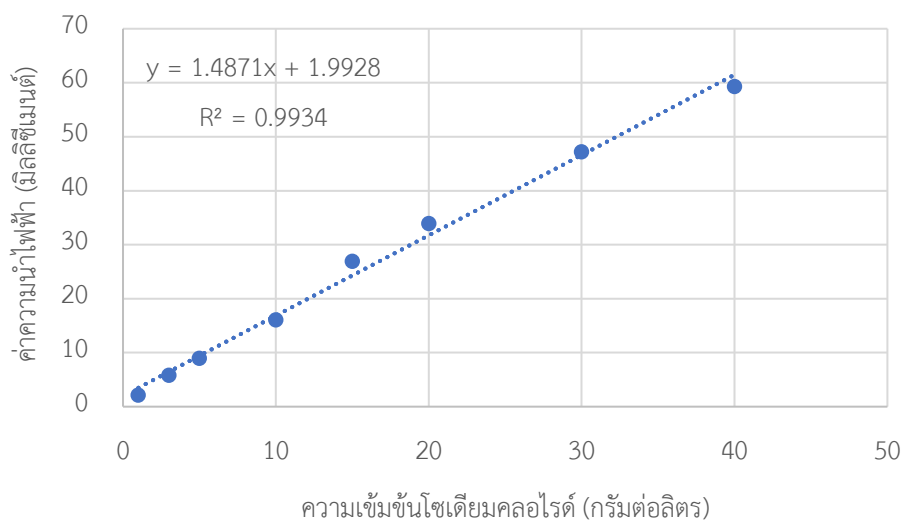
ผลการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบพองอากาศและแบบอากาศยก

ตารางที่ ง-8 กราฟมาตรฐานของเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าทั้ง 3 เครื่อง

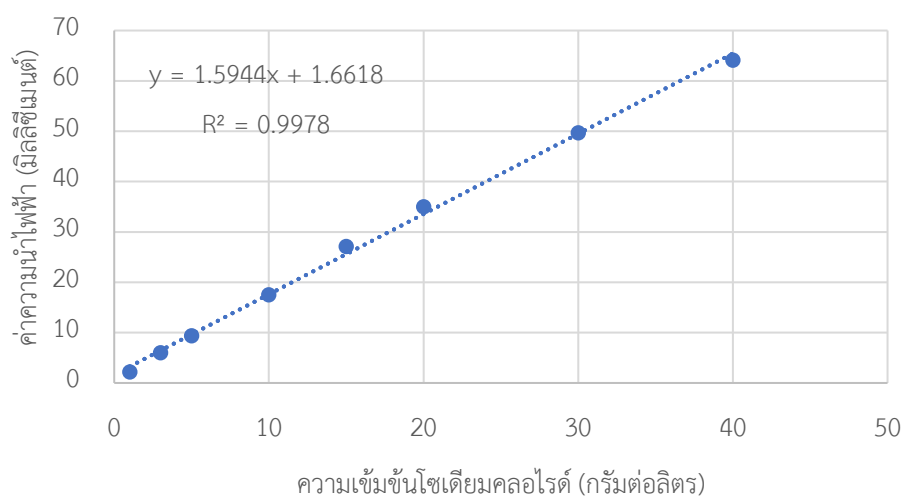
ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร)	ค่าความนำไฟฟ้า เครื่องที่ 1 (มิลลิซีเมนต์)	ค่าความนำไฟฟ้า เครื่องที่ 2 (มิลลิซีเมนต์)	ค่าความนำไฟฟ้า เครื่องที่ 3 (มิลลิซีเมนต์)
1	2.21	2.14	2.18
3	6.7	5.83	6.01
5	10.1	8.97	9.4
10	18.12	16.1	17.51
15	28.4	26.9	27.1
20	36.3	33.9	35
30	51.5	47.2	49.7
40	62.8	59.3	64.1



(ก) เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า เครื่องที่ 1



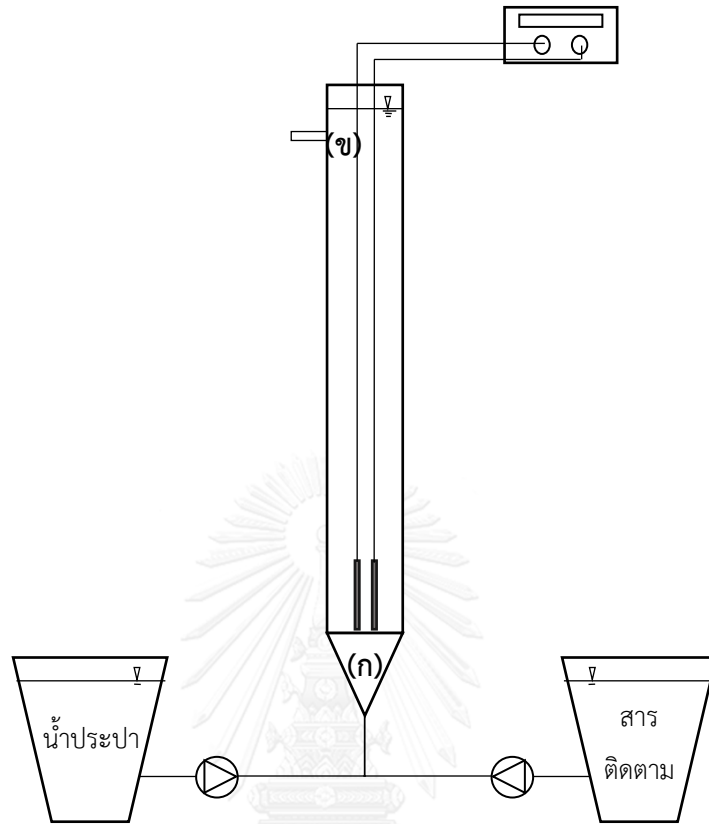
(ข) เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า เครื่องที่ 2



(ค) เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า เครื่องที่ 3

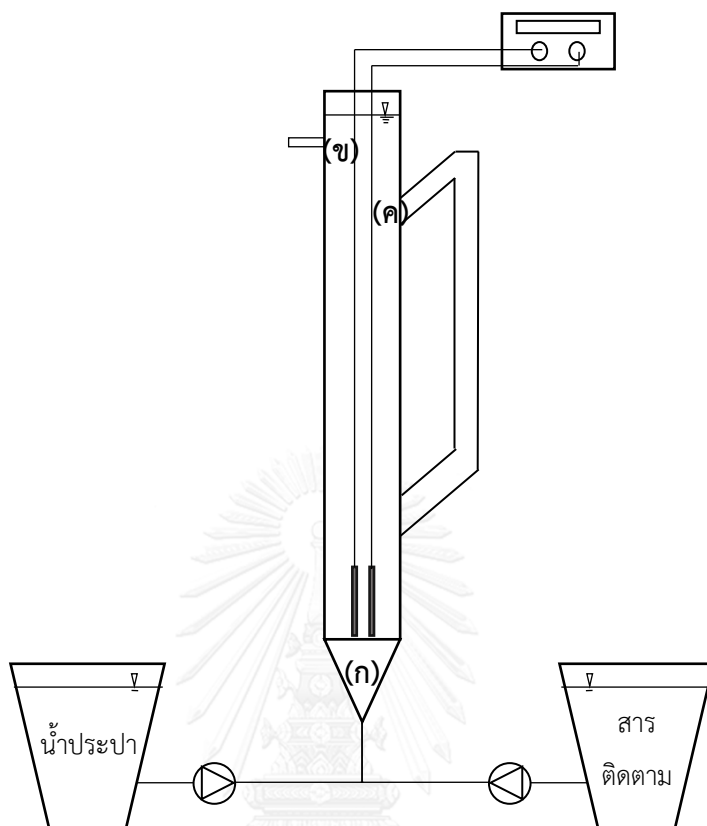
รูปที่ ง-1 กราฟมาตรฐานของเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าเครื่องที่ 1 (ก) เครื่องที่ 2 (ข) และเครื่องที่ 3 (ค)

- ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ



รูปที่ ง-2 ตำแหน่งการติดตามค่าความนำไฟฟ้าเครื่องที่ 1 บริเวณทางน้ำเข้า (ก)
และเครื่องที่ 2 บริเวณทางน้ำออก (ข)

- ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก



รูปที่ ง-3 ตำแหน่งการติดตามค่าความนำไฟฟ้าเครื่องที่ 1 บริเวณทางน้ำเข้าถังปฏิกริยา (ก) เครื่องที่ 2 บริเวณทางน้ำออก (ข) และเครื่องที่ 3 บริเวณทางน้ำเข้าส่วนไม่เต็มอากาศ (ค)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนวนล ทองตาล่วง เกิดเมื่อวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 จัดที่โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ ในหัวข้อ บทความปริทัศน์ กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน (Review paper on Electrocoagulation-flotation Process for Oily wastewater treatment) วันที่ 11 - 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 และการประชุมวิชาการนานาชาติ The 23rd Thailand-Korea Conference on Environmental Engineering จัดที่โรงแรมปทุมวัน ปริ้นเซส กรุงเทพฯ ในหัวข้อ Effects of electrode configuration on electrocoagulation-flotation for oily wastewater treatment วันที่ 5 - 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560