

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอย  
ภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก

นางสาวชฎานิน พรหมจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

TREATMENT OF CUTTING OILY-WASTEWATER BY ELECTRO-  
COAGULATION/FLOTATION PROCESS IN EXTERNAL-LOOP AIRLIFT REACTOR

Miss Chayanin Prommajun

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ  
รวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถัง  
ปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก

โดย

นางสาวชฎานิน พรหมจันทร์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป ผาริโน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ศรายุทธ ราชู)

ชฎานิน พรหมจันทร์ : การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก. (TREATMENT OF CUTTING OILY-WASTEWATER BY ELECTRO-COAGULATION/FLOTATION PROCESS IN EXTERNAL-LOOP AIRLIFT REACTOR) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล 192, หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอย (Electro-coagulation/flotation) ภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble Column Reactor, BCR) และถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก (Air-lift reactor, ALR) เพื่อลดปัญหาการเติมสารโคแอกกูแลนต์และความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์ของกระบวนการโคแอกกูแลนต์ โดยทำการศึกษาผลกระทบของชนิดของขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และจำนวนขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการเดินระบบแบบที่ละเท จากผลการทดลอง พบว่า สมภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม คือ ใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร จากการเปรียบเทียบการเดินระบบด้วยถังปฏิกริยาแบบ BCR และแบบ ALR พบว่าการใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ 100 - 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด 99 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อดีของการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก คือ มีการวนกลับของอะลูมิเนียมไอออน และใช้พลังงานน้อยกว่า ทำให้อายุการใช้งานของขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น รวมถึงตะกอนด้านบนมีความแน่นมากกว่าตะกอนในถังปฏิกริยาแบบ BCR และจากการพิจารณาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศพบว่ามีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพและอัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยถังปฏิกริยาทั้งสองแบบ จากการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกริยาทั้ง 2 แบบ พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าต่ำกว่า 15 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 85% โดยผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเรซีเดนซ์ไทม์ พบว่า ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกสามารถรักษารูปแบบการไหลเป็นแบบไหลในท่อ (Plug flow reactor) ได้มากกว่าถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ดังนั้น จึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสูงขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554.....

# # 5270258721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ELECTRO-COAGULATION/FLOTATION PROCESS / CUTTING OILY WASTEWATER / AIR LIFT REACTOR

CHAYANIN PROMMAJUN : TREATMENT OF CUTTING OILY-WASTEWATER BY ELECTRO-COAGULATION/FLOTATION PROCESS IN EXTERNAL-LOOP AIRLIFT REACTOR. ADVISOR : ASST. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 192 pp.

The objective of this research was to study the treatment of cutting oily-wastewater by the electro-coagulation/flotation process (ECF) in the bubble column (BCR) and the air-lift reactor (ALR) in order to reduce the problems of chemical usage and equipment set-up in coagulation process. The effects of electrode types, distance between electrodes, and number of electrode on the treatment efficiency were evaluated in batch operation. After that, the comparison of the ECF in the BCR and ALR was conducted. The results showed that the highest removal efficiency of 99% was achieved at the optimal condition, which was the usage of 2 aluminium electrodes with 2 cm in distance between plates, with the current density of 100 - 125 A/m<sup>2</sup> in both BCR and ALR. However, the ALR provided advantages in the recirculation of Al<sup>3+</sup> coagulant ions and less power consumption, which could result in longer lifetime of electrodes and less sludge production. The bubble hydrodynamic parameters were found to be related with the treatment efficiency and reaction rate of both reactors. Furthermore, the continuous operations for both reactors were performed at the optimal operating condition. The efficiency of 85% was obtained at the inlet flow rate lower than 15 LPH. From the residence time distribution (RTD) study, the ALR can maintain the plug flow condition more than the BCR as flow rates were increased. The efficiencies from ALR were therefore higher than the BCR at higher inlet flowrate conditions.

Department : Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่  
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.  
ชัยพร ภูประเสริฐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป ฝาริโน และดร. ศรายุทธ ราชู ที่กรุณาสละเวลา  
อันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ดิชม แก่ไข้งานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ  
ท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งานห้องปฏิบัติการ  
และเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ  
จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย น้องสาว ที่สนับสนุนและให้  
โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 น้ำมันปนเปื้อนน้ำมัน.....	5
2.2 สารลดแรงตึงผิว.....	8
2.3 ของเหลวที่ใช้ในกระบวนการตัด.....	10
2.4 น้ำมันตัด.....	11
2.5 กฎของสโตก.....	12
2.6 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย.....	13
2.7 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด.....	13
2.8 กระบวนการโคแอกกูแลชัน.....	18
2.9 ไฟฟ้า.....	21
2.10 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	28

	หน้า
2.11 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	36
2.12 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	40
2.13 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก.....	41
2.14 แนวคิดกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยก	52
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	53
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	65
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	65
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	68
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	82
4.1 การศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและการรวม ตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์.....	82
4.2 การศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองในถังปฏิกริยา แบบฟองอากาศ แบบที่ละเท.....	92
4.3 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอน ด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก.....	103
4.4 การเปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก	107
4.5 การศึกษาค่าทางการศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและเฟส ของเหลว.....	125
4.6 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอน ด้วยไฟฟ้า โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	131
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และบทประยุกต์เชิงวิศวกรรม.....	141
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	141
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	142
5.3 บทประยุกต์เชิงวิศวกรรม.....	143



	หน้า
รายการอ้างอิง.....	144
ภาคผนวก.....	149
ภาคผนวก ก.....	150
ภาคผนวก ข.....	156
ภาคผนวก ค.....	161
ภาคผนวก ง.....	180
ภาคผนวก จ.....	184
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	192

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2-1	เปรียบเทียบกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการต่าง ๆ.....	16
ตารางที่ 2-2	ความหมายของเครื่องหมาย $\Delta G$ และ $\Delta E$ .....	25
ตารางที่ 2-3	ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส.....	33
ตารางที่ 3-1	ลักษณะสมบัติของน้ำมันตัด.....	67
ตารางที่ 3-2	ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	69
ตารางที่ 3-3	ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยวิธีจาร์เทสต์.....	70
ตารางที่ 3-4	ตัวแปรในการศึกษาชนิดขั้วไฟฟ้า.....	71
ตารางที่ 3-5	ตัวแปรในการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า.....	72
ตารางที่ 3-6	ตัวแปรในการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	73
ตารางที่ 3-7	ตัวแปรในการศึกษาระดับน้ำด้านบนถังปฏิกรณ์.....	74
ตารางที่ 3-8	ตัวแปรในการเปรียบเทียบถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก.....	75
ตารางที่ 3-9	ตัวแปรในการศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ.....	77
ตารางที่ 3-10	ตัวแปรในการศึกษาความเร็วของของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก.....	78
ตารางที่ 3-11	ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเข้าเฉพาะส่วนเติมอากาศ.....	79
ตารางที่ 3-12	ตัวแปรในการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์.....	80
ตารางที่ 3-13	สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์.....	81
ตารางที่ 4-1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด.....	83
ตารางที่ 4-2	เปรียบเทียบดัชนีคุณภาพน้ำจากการบำบัดด้วยวิธีจาร์เทสต์กับค่ามาตรฐาน.....	90
ตารางที่ 4-3	ปฏิกริยาอิเล็กโทรลิซิสของขั้วไฟฟ้าต่างๆ.....	94
ตารางที่ 4-4	การเปรียบเทียบการขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 และ 4 แผ่น โดยเดินระบบในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ แบบที่ละเท.....	102

	หน้า	
ตารางที่ 4-5	ลำดับชั้นของการเกิดปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก.....	110
ตารางที่ 4-6	เปรียบเทียบถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก โดยใช้หัวอะลูมิเนียมจำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างหัว 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	119
ตารางที่ 4-7	ขนาดของฟองอากาศจากหัวอะลูมิเนียม ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก.....	125
ตารางที่ 4-8	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ค่าเรซิเดนซ์ไทม์เฉลี่ย ( $\tau$ ) เพคเลตต์ (Pe) และจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) ส่วนตัวเติมอากาศ (riser) ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก.....	139
ตารางที่ 5-1	ตัวแปรการออกแบบการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร.....	143

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1	การผลักรันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว..... 6
ภาพที่ 2-2	ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว..... 7
ภาพที่ 2-3	การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม..... 8
ภาพที่ 2-4	โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว..... 8
ภาพที่ 2-5	ประเภทของสารลดแรงตึงผิวเมื่อแบ่งตามประจุไฟฟ้าในส่วนที่ชอบน้ำ... 10
ภาพที่ 2-6	ความสัมพันธ์ของเหลวที่ใช้ในกระบวนการตัด จำแนกตามส่วนผสม ทางเคมีและการประยุกต์ใช้งาน..... 11
ภาพที่ 2-7	องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี..... 29
ภาพที่ 2-8	การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี..... 30
ภาพที่ 2-9	การละลายของผลึกของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ เมื่อพิจารณา ในกลุ่มของอลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียว..... 31
ภาพที่ 2-10	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุม แบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่..... 37
ภาพที่ 2-11	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุม แบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับ เวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่..... 37
ภาพที่ 2-12	รูปแบบการแยกตัวของก๊าซในแบบต่างๆ..... 42
ภาพที่ 2-13	ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน (ก) แผ่นกั้นที่ตั้งใน แนวตั้งของถังปฏิกิริยา (ข) ท่อภายในในถังปฏิกิริยารูปทรงระบอกที่ตั้ง อากาศถูกพ่นในส่วนของท่อภายใน (ค) ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกชนิดที่ มีการไหลวนภายนอก..... 43
ภาพที่ 2-14	ความสัมพันธ์ของอุทกพลศาสตร์กับรูปแบบถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก... 45
ภาพที่ 2-15	ตัวอย่างการวัดขนาดฟองโดยใช้รูปที่ถ่ายได้จากการทดลอง..... 47

	หน้า
ภาพที่ 2-16	ขอบเขตการไหลในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน 51
ภาพที่ 2-17	แผนผังของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม..... 54
ภาพที่ 2-18	แผนผังการทดลองโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า..... 55
ภาพที่ 2-19	แผนผังของถังส้มผัสแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก ที่ใช้ในการทดลอง..... 56
ภาพที่ 2-20	แผนผังของถังส้มผัสแบบอากาศยกที่ใช้ในการทดลอง..... 57
ภาพที่ 2-21	(ก) รูปแบบถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่ใช้ในการทดลอง (ข) หัวเติมอากาศที่ใช้ในการทดลอง..... 58
ภาพที่ 2-22	เปรียบเทียบแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลอง.... 61
ภาพที่ 2-23	แผนผังของถังส้มผัสแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก มีการดัดแปลงส่วนไม่เติมอากาศ ที่ใช้ในการทดลอง..... 62
ภาพที่ 2-24	ตำแหน่งฟองอากาศในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก เมื่อมีการเปิดท่ออากาศในส่วนไม่เติมอากาศ..... 63
ภาพที่ 3-1	แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและ การทำให้อยู่ภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก..... 65
ภาพที่ 3-2	แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์..... 69
ภาพที่ 3-3	แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ 70
ภาพที่ 3-4	แผนผังการหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม..... 71
ภาพที่ 3-5	แผนผังการหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม..... 72
ภาพที่ 3-6	แผนผังการศึกษาจำนวนขั้วที่เหมาะสม..... 73
ภาพที่ 3-7	แผนผังการหาระดับน้ำด้านบนถังปฏิกริยา..... 74
ภาพที่ 3-8	แผนผังการเปรียบเทียบถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก... 75
ภาพที่ 3-9	แผนผังการศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ..... 77
ภาพที่ 3-10	แผนผังการศึกษารวดเร็วของของเหลวในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก..... 78
ภาพที่ 3-11	แผนผังการศึกษาลักษณะของอัตราการไหลของน้ำเข้า เฉพาะส่วนเติมอากาศ..... 79
ภาพที่ 3-12	แผนผังการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยา..... 80

	หน้า
ภาพที่ 4-1	ลักษณะน้ำมันตัดก่อน (ก) และหลังผสมน้ำ (ข)..... 84
ภาพที่ 4-2	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น..... 84
ภาพที่ 4-3	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดี เมื่อพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง..... 87
ภาพที่ 4-4	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดี ที่ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ต่างๆ..... 88
ภาพที่ 4-5	การเดินระบบด้วยกระบวนการจาร์เทสต์..... 91
ภาพที่ 4-6	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของขี้ไฟฟ้า 3 ชนิด (อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์)..... 92
ภาพที่ 4-7	พีเอชที่เปลี่ยนแปลงของขี้ไฟฟ้า 3 ชนิด (อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์) 95
ภาพที่ 4-8	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของขี้อะลูมิเนียม ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างขี้ต่างๆ..... 96
ภาพที่ 4-9	พื้นที่การทำปฏิกิริยา ที่ระยะห่างระหว่างขี้ 1 2 และ 4 เซนติเมตร ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร..... 97
ภาพที่ 4-10	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของขี้อะลูมิเนียม ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างขี้ต่างๆ..... 98
ภาพที่ 4-11	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของขี้อะลูมิเนียม จำนวน 2 และ 4 แผ่น ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ต่างๆ..... 99
ภาพที่ 4-12	พีเอชที่เปลี่ยนแปลงของขี้อะลูมิเนียม จำนวน 2 และ 4 แผ่น ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ต่างๆ..... 101
ภาพที่ 4-13	ระดับน้ำเหนือข้อต่อระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศ (ก) 0 เซนติเมตร (ข) 10 เซนติเมตร และ (ค) 20 เซนติเมตร..... 104
ภาพที่ 4-14	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ที่ระดับน้ำเหนือส่วนไม่เติมอากาศต่างๆ ในถัง ALR..... 105
ภาพที่ 4-15	พีเอชที่เปลี่ยนแปลง ที่ระดับน้ำเหนือส่วนไม่เติมอากาศต่างๆ ในถัง ALR 106
ภาพที่ 4-16	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ..... 107

	หน้า
ภาพที่ 4-17	ประสิทธิภาพการบำบัดความชื้น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก..... 108
ภาพที่ 4-18	กราฟแสดงการหาค่าอันดับปฏิกริยา (n) และค่าคงที่ปฏิกริยา (k)..... 109
ภาพที่ 4-19	ปริมาณ $Al^{3+}$ ที่ละลายในน้ำ ในถังปฏิกริยาฟองอากาศและแบบอากาศ ยกที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ..... 111
ภาพที่ 4-20	ประสิทธิภาพการบำบัดความชื้น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยการเดินระบบในถังปฏิกริยา แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก..... 112
ภาพที่ 4-21	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยการเดินระบบในถังปฏิกริยา แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก..... 112
ภาพที่ 4-22	ความหนาแน่นของชั้นตะกอนด้านบนบนถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ..... 113
ภาพที่ 4-23	ตะกอนด้านบน (ก) และด้านล่าง (ข) ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก..... 114
ภาพที่ 4-24	การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบในถังปฏิกริยา แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก..... 116
ภาพที่ 4-25	ปริมาณ $Al^{3+}$ ที่ละลายในน้ำ ในถังปฏิกริยาฟองอากาศและแบบอากาศยก 117
ภาพที่ 4-26	ลักษณะการเคลื่อนที่ของของเหลวใน (ก) ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และ (ข) ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก..... 118
ภาพที่ 4-27	การไหลภายในท่อไหลแบบอุดมคติและแบบที่มีการแพร่ภายในแนวแกนท่อ 122
ภาพที่ 4-28	การไหลภายในท่อไหลแบบอุดมคติที่เข้าใกล้กับถังปฏิกริยา แบบถังกวนอุดมคติ N ถัง..... 123
ภาพที่ 4-29	ฟังก์ชัน RTD ในการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและอากาศ ยก แบบที่ละเท..... 124
ภาพที่ 4-30	ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (ก) ที่ความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้าต่างๆ และ (ข) ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ ในถังปฏิกริยา แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก..... 127

	หน้า
ภาพที่ 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเกรเดียนท์ (ก) และอัตราส่วนค่าพื้นที่ผิว จำเพาะต่อความเร็วเกรเดียนท์ (ข) ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและ แบบอากาศยก.....	128
ภาพที่ 4-32 ความเร็วของความเร็วจนของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ ( $U_{LD}$ ) ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	130
ภาพที่ 4-33 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	132
ภาพที่ 4-34 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	133
ภาพที่ 4-35 พีเอชที่เปลี่ยนแปลง ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	134
ภาพที่ 4-36 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	135
ภาพที่ 4-37 ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	136
ภาพที่ 4-38 ความหนาของชั้นตะกอนด้านบนถังปฏิกริยาในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง	137
ภาพที่ 4-39 ลักษณะการไหลของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ ที่อัตราการไหลน้ำเข้า 5 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง.....	140



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาด้านอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ รวมไปถึงการใช้น้ำในการอุปโภคบริโภค ทำให้เกิดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเป็นจำนวนมาก น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันมี 4 รูปแบบ คือ น้ำมันที่ละลายน้ำ น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวและน้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ โดยน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว เช่น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด สามารถก่อให้เกิดปัญหาในการบำบัดมากเนื่องจากมีความคงตัวสูง ขนาดอนุภาคเล็ก ไม่แยกเป็นชั้นน้ำมัน และสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย (Aurelle, 1985)

น้ำมันตัด (Cutting oil) เป็นน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว ประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการตัดวัสดุ การหล่อเย็นและการขึ้นรูปโลหะ ขนาดอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก (1-2 ไมครอน) ทำให้มีความคงตัวของน้ำมันสูง ดังนั้นหากเกิดการปนเปื้อนในน้ำทำให้ยากแก่การบำบัดด้วยกระบวนการต่างๆ การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดทำได้โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ ทางเคมี ทางกายภาพ-เคมี และการใช้ไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีข้อดีข้อเสีย รวมถึงแนวทางการประยุกต์ใช้งานในสถานะที่แตกต่างกันออกไป (Battaler และคณะ, 2004) ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation process) เพื่อทำลายเสถียรภาพของสารอิมัลชันที่อยู่ในน้ำมัน และรวมอนุภาคน้ำมันจากอิมัลชันของสารโคแอกกูแลนต์ที่เกิดขึ้นจากขั้วแอโนดในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เพื่อให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และแยกอนุภาคน้ำมันโดยการทำให้ลอยขึ้นด้วยฟองก๊าซจากขั้วแคโทดในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Bensadok และคณะ, 2008)

ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air-lift Reactor, ALR) เป็นถังปฏิกริยารูปแบบหนึ่งที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเฟสก๊าซ-เฟสของเหลว หรือเฟสก๊าซ-เฟสของเหลว-เฟสของแข็ง อยู่ในถังปฏิกริยา โดยทั่วไปใช้งานในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวเคมี การหมัก การผลิตเบียร์ ไวน์ การดูดซับก๊าซ (Merchuk และ Glux, 2002) ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ประกอบด้วย ส่วนที่เติมอากาศ (Riser) ส่วนที่ไม่เติมอากาศ (Downcomer) ส่วนฐาน และส่วนที่มีการแยกตัวของก๊าซ (Gas-liquid separator) จำแนกตามโครงสร้างของถังปฏิกริยาได้ 2 รูปแบบ คือ แบบหมุนวนภายในและแบบที่มีการหมุนวนภายนอก โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกแบบที่มีการหมุนวนภายนอก (External-loop airlift reactor, EALR) ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือ ส่วนที่ไม่เติมอากาศ

แยกออกจากส่วนที่เติมอากาศอย่างชัดเจน ส่งผลดีต่อการแยกส่วนที่ทำปฏิกิริยาให้เกิดกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า โดยเฟสก๊าซที่เกิดขึ้นจะดันน้ำมันให้ลอยขึ้นในด้านบนของส่วนเติมอากาศ และมีการหมุนวนกลับของอิมulsionของสารโคแอกกูแลนต์ในส่วนที่ไม่เติมอากาศเข้าสู่ส่วนที่เติมอากาศ ในกรณีนี้ การศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและรูปแบบการไหล (กันตพงศ์ ผิวเหลือง, 2552) จึงมีความจำเป็นเพื่ออธิบายการเกิดกลไกการทำงานที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม รวมถึงแนวทางการออกแบบกระบวนการต่อไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอกเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยคาดว่าจะสามารถประหยัดและลดความยุ่งยากในการเติมสารเคมี ซึ่งการรวมกระบวนการทางเคมีและการทำให้ลอยเข้าด้วยกัน ระบบที่ได้จึงน่าจะมีประสิทธิภาพสูง มีขนาดเล็ก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการแบบผสมผสาน (Hybrid process) ระหว่างกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เช่น ชนิดขั้วไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า เป็นต้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและรูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด
- 1.2.4 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอกด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการทดลองในระบบปฏิบัติการ โดยดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเลียนแบบน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยเตรียมจากน้ำมันตัด ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552)
- 1.3.2 ถึงปฏิบัติการแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก ทำจากอะคริลิกใส โดยส่วนเติมอากาศ (riser) ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.4 เซนติเมตร สูง 195 เซนติเมตร เชื่อมต่อกับส่วนไม่เติมอากาศ (downcomer) ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างส่วนเติมอากาศและไม่เติมอากาศ คือ 20 เซนติเมตร (Essadki และคณะ, 2008)
- 1.3.3 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียมเหล็ก และแกรไฟต์ โดยขั้วไฟฟ้ามีขนาด กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร (สุดสิริ จิตสุภาวัฒน์, 2552)
- 1.3.4 การทดลองเพื่อหาค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ได้แก่
  - ขนาดของฟองอากาศ
  - พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ
  - ความเร็วของก๊าซ
  - ความเร็วของเหลวในส่วนที่ไม่เติมอากาศ
- 1.3.5 วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางกายภาพและเคมี ด้วยวิธีมาตรฐานตามที่ระบุใน The Standard Methods for Determination of Water and Wastewater (2005)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเข้าใจกลไกและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการทำงานของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก
- 1.4.2 ทราบความเป็นไปได้ที่จะนำระบบนี้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจริง และนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง
- 1.4.3 เป็นทางเลือกใหม่ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและความขุ่น และไม่ต้องเติมสารเคมี

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

##### 2.1.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ (มันรัศ ัตถ์กุลเวศม์ และ มันลิน ัตถ์กุลเวศม์, 2545)

น้ำมันสามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย ซึ่งจะต้องพิจารณาจาก

- ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลงและเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าโพลาริตีที่สูงขึ้น
- ความสามารถในการระเหย (Volatility)
- ความสามารถของน้ำมันชนิดเบาจะดีกว่าน้ำมันชนิดหนัก ทั้งเรื่องความสามารถในการละลายน้ำและความสามารถในการระเหย

หากน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำอยู่ในรูปละลายน้ำได้ ส่งผลให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและรสของน้ำที่เปลี่ยนไป ดังนั้นถือได้ว่าน้ำมันที่ละลายน้ำเป็นสารมลพิษที่อันตรายรูปแบบหนึ่ง

##### 2.1.2 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

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

- ถ้าอนุภาคลอยและกระจายอยู่ในน้ำนานถือว่าอิมัลชันมีความคงตัวมาก
- ถ้าขนาดอนุภาคเล็กเวลาในการลอยขึ้นและรวมตัวกับอนุภาคอื่นจะมาก

ดังนั้นขนาดอนุภาคจึงขึ้นอยู่กับลักษณะการกวนผสม เช่น พลังงานที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนและแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน

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

- เมื่อ  $W_A$  : พลังงานกลที่ใช้ (ergs/cm<sup>3</sup> หรือ mN/m<sup>3</sup>)  
 $A_{OW}$  : พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำ (cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> หรือ m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)  
 $\gamma_{OW}$  : แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (ergs/cm<sup>2</sup> หรือ dyne/cm หรือ mN/m)

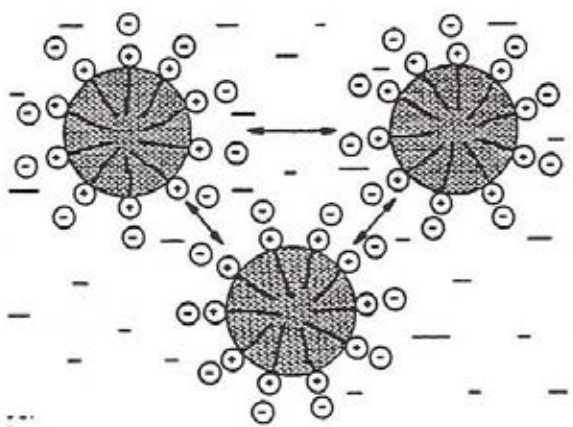
ดังนั้น พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำจึงมีค่าเท่ากับ

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

แต่จะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น เมื่อหยุดการปั่นกวนหยดน้ำมันเหล่านี้จะรวมตัวกันและกลับมาแยกชั้นเช่นเดิม

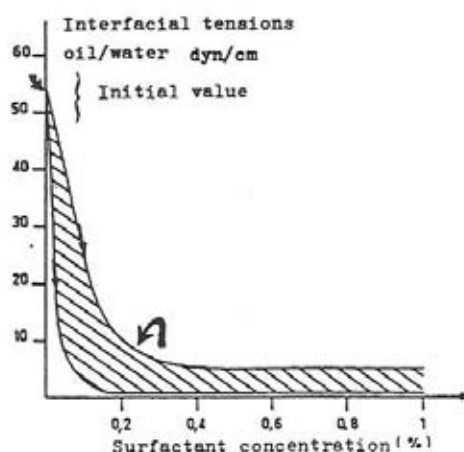
### 2.1.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

น้ำเสียดจากชุมชนหรือจากอุตสาหกรรม โดยมากมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวอยู่เสมอ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ โมเลกุลที่ชอบน้ำมันและโมเลกุลที่ชอบน้ำ จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 การผลักรันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

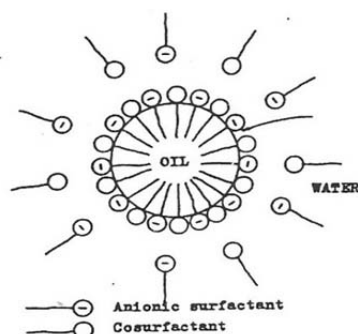
สารลดแรงตึงผิวจะทำให้แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำลดลง ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นต่ำก็ตาม ดังแสดงในภาพที่ 2-2 จะเห็นได้ว่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำจะลดลงตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น และจะลดลงจนมีค่าต่ำมาก ซึ่งภายใต้สภาวะนี้น้ำมันจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นอิมัลชันได้เองและเกิดเป็นอิมัลชันที่มีเสถียรภาพสูงมาก จึงเรียกอิมัลชันที่เกิดในสภาพที่มีสารลดแรงตึงผิวว่า “อิมัลชันที่มีเสถียรภาพ” (Stabilized emulsion)



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

อนุภาคน้ำมันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ดังนั้นความเร็วในการลอยขึ้นจึงมีค่าต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) และเนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน (Electrokinetic หรือ Zeta potential) จึงทำให้ไม่เกิดการชนและการรวมตัวกันในระหว่างการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า น้ำเสียมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวร่วม (Cosurfactant) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว คือจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมจะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และจะไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว (ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 อิมัลชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวร่วมจะมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กมาก โดยจะมีขนาดประมาณ 100-600 อังสตรอม



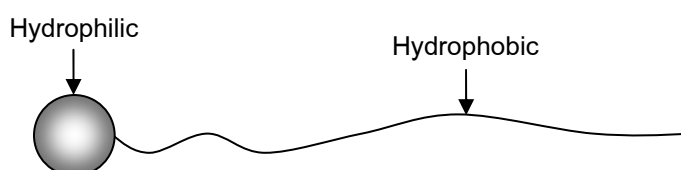
ภาพที่ 2-3 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle, 1985)

#### 2.1.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ

น้ำมันส่วนใหญ่จะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงมักจะลอยอยู่บนผิวน้ำในลักษณะของฟิล์มบางๆ ซึ่งจะไปขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสง ปัญหาของน้ำมันในลักษณะนี้ก็คือสามารถปนเปื้อนได้เป็นพื้นที่กว้าง ถึงแม้จะมีน้ำมันปริมาณน้อยก็ตาม เพราะจะมีการแพร่กระจายออกไปในลักษณะของแผ่นฟิล์มโมเลกุลเดี่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะแพร่กระจายได้เป็นพื้นที่กว้างมาก ซึ่งการปนเปื้อนในลักษณะนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า คือจะสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งลอยอยู่บนผิวน้ำ

#### 2.2 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) (Rosen, 1989)

สารลดแรงตึงผิว หรือ Surfactant (Surface active agent) เป็นสารมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ผิวระหว่างเฟส ทำให้แรงตึงผิว (Surface tension) ลดลง สารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นส่วนหัวของโมเลกุล และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นส่วนหางของโมเลกุล ซึ่งจะเป็นอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ ไช่ยาวดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (Rosen, 1989)



สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนชอบน้ำออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

### 2.2.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าเป็นลบในส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุล อยู่ในรูปของ carboxylate, sulfate, sulfonate หรือ phosphate สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้มากในอุตสาหกรรม การผลิตผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาล้างจาน เป็นต้น โดยใช้มากถึง 49 เปอร์เซ็นต์ ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ขจัดคราบสกปรกได้ดี

### 2.2.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าเป็นบวกในส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุล ส่วนมาก จะเป็นพวก quaternary ammonium สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะ แวดล้อมที่เป็นด่างสูง (พีเอช 10-11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้ เกิดการตกตะกอนได้ สารลดแรงตึงผิวประเภทประจุบวกจะทำให้เกิดการระคายเคืองน้อยกว่าสาร ลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบ จึงนิยมใช้ในการทำน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์ เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น

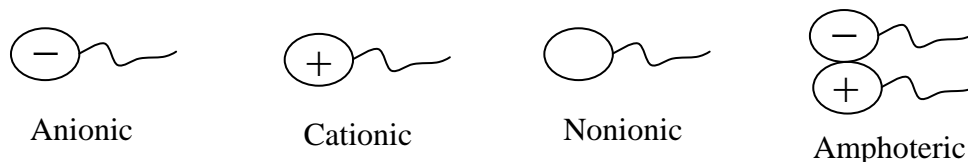
### 2.2.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าในส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุล โดยจะมีพวก polyether หรือ polyhydroxyl เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

### 2.2.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวก (Amphoteric surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าเป็นได้ทั้งประจุบวกและลบในส่วนที่ชอบน้ำ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่าง ( $\text{pH} > 7$ ) ประจุไฟฟ้าในส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นประจุลบ ถ้าสภาวะ แวดล้อมเป็นกรด ( $\text{pH} < 7$ ) ประจุไฟฟ้าในส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลาง

จะไม่เกิดประจุไฟฟ้า สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม ในปัจจุบัน  
ยังใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น



ภาพที่ 2-5 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวเมื่อแบ่งตามประจุไฟฟ้าในส่วนที่ชอบน้ำ (Rosen, 1989)

## 2.3 ของเหลวที่ใช้ในกระบวนการตัด (Cutting Fluids)

ของเหลวที่ใช้ในกระบวนการตัด (Cutting Fluids) เป็นของเหลวที่ใช้ในกระบวนการตัด  
เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการตัด มีหน้าที่ คือ

- ลดความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณที่เกิดการสัมผัสกันของเครื่องมือและชิ้นงาน
- ลดความเสียดทานในบริเวณที่เครื่องมือกับเศษตัด และเครื่องมือกับชิ้นงานสัมผัสกัน
- ล้างเศษตัดที่ละเอียดออกจากชิ้นงาน ลดอุณหภูมิชิ้นงาน ลดแรงตัดและกำลังที่ใช้ในการตัด รวมถึงปรับปรุงผิวสำเร็จรูปของชิ้นงาน

### 2.3.1 การจำแนกประเภทของ Cutting Fluids

การจำแนกประเภทของน้ำมันตัด สามารถแยกประเภทตามหน้าที่การทำงานหรือ  
ส่วนผสมทางเคมี ดังนี้

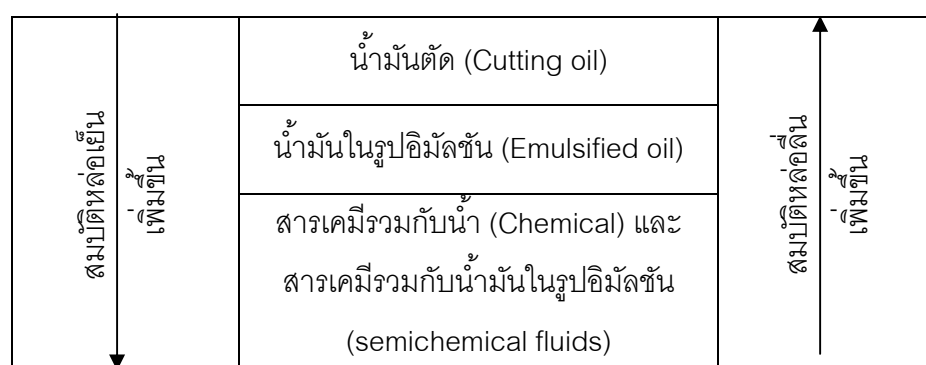
#### 2.3.1.1 จำแนกตามหน้าที่การทำงาน (Function) มี 2 ประเภท คือ

1. สารหล่อเย็น (Coolant) เป็นสารช่วยในการลดความร้อน ใช้กับการตัดด้วยความเร็วสูง
2. สารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นสารช่วยลดแรงเสียดทาน ใช้ในการตัดด้วยความเร็วต่ำ

2.3.1.2 จำแนกตามส่วนผสมทางเคมี (Chemical formulation) มี 3 ประเภท คือ

1. น้ำมันตัด (Cutting oil) อยู่ในรูปของน้ำมัน ขนาดน้ำมันมีขนาดเล็ก มีการเติมสารเพิ่มคุณภาพและสารอิมัลซิฟายเออร์
2. น้ำมันในรูปอิมัลชัน (Emulsified oil) สัดส่วนน้ำต่อน้ำมันคือ 30:1 มีการเติมซัลเฟต คอลลอยด์ และฟอสฟอรัส
3. การใช้สารเคมีรวมกับน้ำ (Chemical) และ การใช้สารเคมีรวมกับน้ำมันในรูปอิมัลชัน (semichemical fluids) ที่มีการเติมซัลเฟต คอลลอยด์ และฟอสฟอรัส

ความสัมพันธ์ของการจำแนกโดยอาศัยลักษณะส่วนผสมทางเคมีและหน้าที่การทำงานดังแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 ความสัมพันธ์ของเหลวที่ใช้ในกระบวนการตัด จำแนกตามส่วนผสมทางเคมี และการประยุกต์ใช้งาน (El Baradie, 1996)

## 2.4 น้ำมันตัด (Cutting oil)

น้ำมันตัด (Cutting oil) อยู่ในรูปของน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการตัด กลึง โลหะ มีหน้าที่ในการลดความร้อนและเพิ่มการหล่อลื่นขณะมีการตัด กลึง โลหะ โดยทั่วไปแล้วน้ำมันตัดมีส่วนผสมของน้ำมันแร่ (mineral oil) สารลดแรงตึงผิว (surfactant) บางครั้งมีการเติมสารอื่นๆ เข้าไปด้วย เช่น กรดไขมัน สารเพิ่มคุณภาพ สารป้องกันการสึกกร่อน และสารยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Bataller และคณะ, 2004) เมื่อมีการใช้น้ำมันตัดไปนานๆ จะทำให้สมบัติการหล่อลื่นลดลงและมีสมบัติการเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการสะสมของเศษโลหะต่างๆ ทำให้มีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเป็นพิษต่อคนที่รับสัมผัส (Burke, 1991)

น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันตัดเป็นตัวอย่างหนึ่งของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในรูปแบบอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ จะเป็นอิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion) โดยที่สารลดแรงตึงผิวจะแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมันเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กจนไม่สามารถรวมตัวกันได้ อนุภาคน้ำมันจึงมีเสถียรเพิ่มขึ้นและยากต่อการบำบัด

## 2.5 กฎของสโตก (Stoke's law)

กระบวนการแยกสารออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของสารที่ต้องการแยกนั้น จะพบว่า ความเร็วในการตกตะกอนหรือความเร็วในการลอยขึ้นของอนุภาคทรงกลม ที่มีค่า Reynolds number น้อยกว่า 1 จะเป็นไปตามกฎของสโตก ซึ่งแสดงดังสมการ

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

เมื่อ  $W$  : ความเร็วในการตกตะกอนหรือการลอยขึ้นของเฟสกระจาย (Dispersed phase)  
 $\Delta\rho$  : ผลต่างของความหนาแน่นของเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase)  
 $d_d$  : เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟสกระจาย  
 $\mu_c$  : ความหนืดพลศาสตร์ของเฟสต่อเนื่อง  
 $g$  : อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ในกรณีของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เฟสกระจายก็คือน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องซึ่งก็คือน้ำนั่นเอง จากสมการที่ (2-3) จะเห็นได้ว่า การเพิ่มความเร็วในการลอยขึ้นของอนุภาคน้ำมันสามารถทำได้ 4 วิธี คือ

1. การเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมัน
2. การเพิ่มผลต่างของความหนาแน่น
3. การเพิ่มค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
4. การลดค่าความหนืดพลศาสตร์ของเฟสต่อเนื่อง

ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันต่อมาอีกมากมาย

## 2.6 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

การแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย มีหลายกระบวนการที่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเลือกเทคนิคที่จะใช้ในการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำจะขึ้นอยู่กับสภาพการผสมกันของน้ำมันและน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาคุณลักษณะของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนที่จะตัดสินใจเลือกกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป

หลักการพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบกระบวนการแยกน้ำมันกับน้ำเสียมีดังนี้

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

## 2.7 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดสามารถทำได้หลายกระบวนการดังนี้

### 2.7.1 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological processes)

เป็นการบำบัดที่สามารถกำจัดน้ำมันออกจากน้ำได้โดยการย่อยสลายทางชีวภาพ เพื่อลดความเป็นพิษของน้ำมันตัดที่มีการใช้งานในระยะเวลานาน จะจำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อน และมีข้อจำกัดคือปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต้องมีปริมาณน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 5) เช่น การบำบัดด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิสูง (anaerobic thermophilic fluidized bed) (Peres และคณะ, 2007)

## 2.7.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical processes)

เป็นการบำบัดโดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิว โดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ( $\text{AlCl}_3$ ) เพื่อให้เกิดการรวมตัว (Coagulation) ของอนุภาคน้ำมันตัดและลอยตัวอยู่ด้านบน (Rios และคณะ, 1998)

## 2.7.3 กระบวนการกายภาพ (Physical processes)

2.7.3.1 การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane processes) เป็นการกำจัดสารแขวนลอย น้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่กระจายในน้ำ โดยผ่านแผ่นเมมเบรน ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด นิยมใช้กระบวนการอัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) (Belkacem และคณะ, 1999) และนาโนฟิวเตรชัน (nanofiltration) (Hilal และคณะ, 2004) กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องการพลังงานมากในการทำให้ น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดผ่านเมมเบรน อุดตันได้ง่ายและอายุการใช้งานมีจำกัด

2.7.3.2 การทำให้ลอย (Floatation) เป็นกระบวนการที่ฟองอากาศพุงน้ำมันหรือไขมันให้ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ เป็นกระบวนการที่นิยมนำมาบำบัดน้ำมันและไขมัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างสูง สามารถรับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันในความเข้มข้นที่สูงได้ ตัวอย่าง เช่น

- Dissolved Air Flotation (DAF) คือการอัดอากาศให้มีความดันสูงถึงประมาณ 4-5 บรรยากาศ จากนั้นจึงปล่อยอากาศที่มีความดันสูงนี้เข้าสู่ น้ำเสีย ทำให้ความดันของอากาศที่ปล่อยเข้าไปลดลงสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30-100 ไมครอน ซึ่งจะเกาะและพุงสารที่เป็นของแข็งต่างๆ และอนุภาคน้ำมันให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ระบบนี้เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียเนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมากในการเดินระบบ เพราะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อทำให้เกิดความดันตามต้องการ

บางกรณีมีการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันตัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เพื่อให้เกิดการรวมตัวให้น้ำมันตัดมีอนุภาคใหญ่ขึ้น แล้วตามด้วย Dissolved Air Flotation เพื่อให้อนุภาคน้ำมันลอยขึ้น เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการใช้ Dissolved Air Flotation เพียงอย่างเดียว (Bensadok และคณะ, 2007)

- **Induce Air Flotation (IAF)** กระบวนการอินดิวิจแออร์โฟลเทชันเป็นการสร้างฟองอากาศที่ความดันบรรยากาศ โดยการทำให้เกิดฟองอากาศจากการทำงานของเครื่องจักรกลต่างๆ โดยการปั่นกวนน้ำเสีย หรือการพ่นอากาศผ่านหัวเติมอากาศเข้าสู่ น้ำเสียโดยตรง ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเข้าไปเกาะกับน้ำมันและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ จึงทำให้น้ำมันและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยแรงลอยตัวที่เกิดจากฟองอากาศ (สุรารักษ์ อวณญวน, 2552)

**2.7.3.3 การใช้ความร้อน (Thermal processes)** ที่อุณหภูมิของน้ำมันในน้ำสูงขึ้น ค่าความตึงผิวเฉพาะของน้ำมันจะลดลงทำให้น้ำมันสามารถลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำได้ง่าย เป็นวิธีการที่ง่าย แต่ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีปริมาณมาก เพราะจะต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนสูง

**2.7.3.4 การใช้ความเย็นและร้อน (Freezing and thawing)** เป็นการแยกน้ำมันโดยให้น้ำมันอยู่ในสภาวะที่ร้อนและเย็น เมื่อน้ำมันอยู่ในสภาวะที่ -40 องศาเซลเซียส น้ำจะอยู่ในสภาวะแข็งตัว และจะแยกน้ำมันออกมาจากน้ำได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย แต่เปลืองพลังงาน (Chen และ He, 2003)

**2.7.3.5 การใช้คลื่นรังสีไมโครเวฟ (Microwave irradiation)** เป็นกระบวนการแยกน้ำมันตัดออกจากน้ำเสียโดยไม่ต้องเติมสารเคมี น้ำมันตัดที่แยกได้สามารถนำกลับมาใช้ได้เลย มีข้อเสียคือในการทำต้องมีการสัมผัสกับรังสีไมโครเวฟ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ทำการบำบัดได้ (Kuo และ Lee, 2009)

**2.7.3.6 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation processes)** เป็นการนำกระบวนการออกซิเดชันมาบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด เช่น การใช้โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ บางครั้งมีการใช้รังสียูวี รวมด้วย

## 2.7.4 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemistry/Electrostatic processes)

การทำลายเสถียรภาพและการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coagulation) และการแยกสารโดยทำให้ลอยขึ้น (Flotation) ด้วยไฟฟ้า โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับปริมาณและขนาดของขั้วไฟฟ้า แต่จะขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้คือ ควบคุมง่าย ประสิทธิภาพการบำบัดสูงและระบบมีขนาดเล็ก ในการบำบัดน้ำเสียมี 3 ประเภท คือ

**2.7.4.1 กระบวนการรวมตัวด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)** เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้า เช่น อะลูมิเนียมหรือเหล็ก จะเกิดการสึกกร่อนในขั้วแอโนด เกิดเป็นไอออนโลหะละลายในน้ำ ไอออนโลหะดังกล่าวจะไปทำลายเสถียรภาพของน้ำมันและเกิดการรวมตัวขึ้น และเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด ทำให้อนุภาคน้ำมันที่รวมตัวกันลอยขึ้น

**2.7.4.2 กระบวนการลอยตัวด้วยไฟฟ้า (Electroflotation)** เป็นการลอยตัวของมลสารในน้ำ โดยฟองไฮโดรเจนหรือฟองออกซิเจนเล็กๆ ที่เกิดจากขั้วแอโนดและแคโทด หลังจากการให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเป็นพวกแร่ต่างๆ เช่น แกร์ไฟต์

**2.7.4.3 อิเล็กโทรออกซิเดชัน (Electrooxidation)** กระบวนการออกซิไดซ์ด้วยไฟฟ้า เมื่อให้กระแสไฟฟ้าจะไปกระตุ้นให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือโอโซนในขั้วบวก และทำให้เกิดก๊าซออกซิเจนขึ้นมาก ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและรวดเร็ว

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการต่างๆ (Bande และคณะ, 2008)

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravity separator • API • Corrugated plate separator	- สามารถกำจัดน้ำมันอิสระและน้ำมันที่ลอยสูผิวน้ำได้ - ประหยัดและง่ายต่อการเดินระบบ	- ไม่สามารถกำจัดอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมครอนได้
Air flotation • Dissolved air flotation, DAF • Induced air flotation, IAF	- กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชันได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีช่วย - รับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันในความเข้มข้นที่สูงได้	- มีการเติมสารเคมี - ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น ถ้าใช้สารเคมีช่วยสร้างตะกอน
Filtration	- กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชันได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีช่วย	- มีการอุดตัน ต้องการการล้างย้อน
Chemical coagulation, flotation and sedimentation	- ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้	- ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น - ต้องใช้สารเคมีในปริมาณมาก



ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการต่างๆ (ต่อ)  
(Bande และคณะ, 2008)

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
Membrane process (ultrafiltration)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้</li> <li>- ประสิทธิภาพการบำบัดสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่ายและอายุการใช้งานจำกัด</li> <li>- ต้องมีการบำบัดขั้นต้น</li> <li>- อัตราการบำบัดต่ำ</li> <li>- ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการในน้ำเสียที่มีปริมาณมาก</li> <li>- ใช้พลังงานมาก</li> </ul>
Biological treatment	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการการบำบัดในขั้นต้นก่อน</li> <li>- สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำเมื่อมีความเข้มข้นต่ำ</li> </ul>
Carbon adsorption	<ul style="list-style-type: none"> <li>- บำบัดน้ำมันได้ทุกชนิด และให้ประสิทธิภาพสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> <li>- ค่าใช้จ่ายสูง</li> <li>- ต้องมีการฟื้นฟูหรือเปลี่ยนคาร์บอน</li> <li>- ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบระบบใหญ่</li> </ul>
Electrocoagulation Electroflotation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ต้องเติมสารเคมี</li> <li>- ประสิทธิภาพสูง</li> <li>- ดำเนินการง่าย</li> <li>- กำจัดคอลลอยด์ขนาดเล็กได้</li> <li>- ระยะเวลาดำเนินระบบสั้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง</li> <li>- ใช้ไประยะหนึ่งต้องเปลี่ยนขั้วไฟฟ้า</li> </ul>

## 2.8 กระบวนการโคแอกกูแลชัน (Coagulation) (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

### 2.8.1 อนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคขนาดเล็กหรืออนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง  $10^{-6}$  ถึง  $10^{-3}$  มิลลิเมตร เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจําตัว โดยกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือสารจําพวกสารลดแรงตึงผิว ส่วนกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีประจุลบ เช่น หยदनํ้ามันและเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดเป็นแรงผลักระหว่างอนุภาคมีเสถียรภาพสูงทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับเป็นกลุ่มก้อน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

#### 2.8.1.1 การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization)

เสถียรภาพของหยदनํ้ามันเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันบนหยदनํ้ามัน สามารถอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหยदनํ้ามันโดยใช้ทฤษฎี Electric Double Layer Theory โดยอิออนประจุลบบนหยदनํ้ามันสร้างแรงดึงดูดที่ให้อิออนประจุบวกมาแอ็ดอยู่ที่ใกล้ผิวหยदनํ้ามัน ความหนาแน่นของอิออนประจุบวกจะสูงที่สุดในบริเวณที่ติดกับหยदनํ้ามันและลดลงตามระยะห่างจากหยदनํ้ามันทั้งนี้เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของหยदनํ้ามันมีค่าสูงสุดที่ผิวและลดน้อยลงเมื่อห่างออกไป ดังนั้นการทำลายเสถียรภาพของหยदनํ้ามันจะต้องทำให้อิออนประจุบวก (Van der Waals Force) ของหยदनํ้ามันมีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างหยदनํ้ามันซึ่งเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของหยदनํ้ามันหรือค่า Zeta Potential โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

1. กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) โดยเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับหยदनํ้ามันในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวนอกสุดของน้ำลดลงตามด้วย
2. กลไกดูดติดผิวและการทำลายประจุของหยदनํ้ามัน (Adsorption and Charge Neutralization) โดยการเติมสารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงข้ามกับหยदनํ้ามัน ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงเช่นกัน

3. กลไกการสร้างผลึกเพื่อให้หยดน้ำมันเกาะจับ (Sweep Coagulation) การใส่สารส้มทำให้เกิดผลึก  $Al(OH)_3$  เหมือนรู้น้ำสีขาวเพื่อเป็นเป้าสัมผัสให้น้ำมันมาเกาะและรวมตัวเป็นฟล็อก

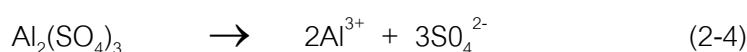
4. กลไกการสร้างสะพานเชื่อมต่อ (Polymer Bridging) เมื่อใส่สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ลงในน้ำจะเกิดการเกาะจับกับหยดน้ำมันและยังมีแขนเพื่อเชื่อมต่อกับอนุภาคคอลลอยด์อื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟล็อกได้อีกด้วย

### 2.8.1.2 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

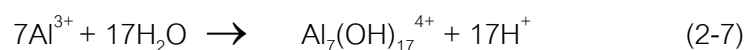
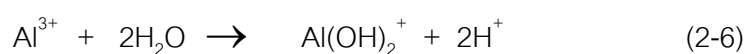
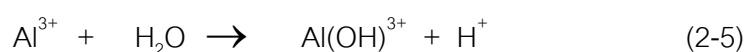
เนื่องจากหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กเกินไปไม่สามารถแยกได้ด้วยวิธีตกตะกอน จึงมักต้องทำการโคแอกกูเลชันก่อนเพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในด้านการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น เช่น การทำให้สารแขวนลอยมีขนาดใหญ่ขึ้น

1. ส่วนประกอบของกระบวนการ จะเติมโคแอกกูแลนท์ถังกวนเร็ว (Rapid mixing tank) เพื่อกระจายสารเคมีไปยังส่วนต่างๆ ของน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อให้มีการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันขึ้นและถังกวนช้า (Flocculation tank) จะได้รับน้ำต่อจากถังกวนเร็วเพื่อสร้างสัมผัสให้กับหยดน้ำมันเกิดการรวมตัวเป็นฟล็อก โดยสารเคมีที่ใช้ เรียกว่า โคแอกกูแลนท์ (Coagulant) หรือฟล็อกคูแลนท์ (Flocculants) เช่น สารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ ปูนขาว เป็นต้น

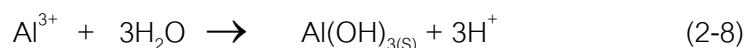
2. กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม นิยมใช้สารส้มเนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง สูตรโมเลกุล  $Al_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$  เมื่อลงในน้ำจะเกิดการแตกตัว ดังปฏิกิริยา ที่ 2-4



เมื่อเติมสารส้มในน้ำอะลูมิเนียมไอออนจาก  $Al_2(SO_4)_3$  จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้  $Al(H_2O)_3^{3+}$  โดยการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ  $Al^{3+}$  จะเกิดขึ้นทันที โดยลิแกนด์ (Ligands) ชนิดต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $OH^-$  จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอะลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังปฏิกิริยาที่ 2-5 - 2-7 (Hamza และคณะ, 1996)



ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $\text{Al(OH)}_3$  ดังปฏิกิริยาที่ 2-8



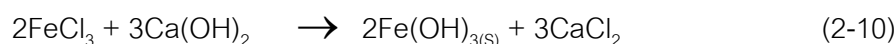
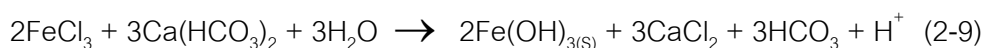
ผลของปฏิกิริยาที่เกิดจากการดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์คือ สารคอมเพล็กซ์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างไฮโดรไลซิสจาก  $\text{Al}^{3+}$  ถึง  $\text{Al(OH)}_3$  สารคอมเพล็กซ์อาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ถ้าพีเอชน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero point of charge) ของ  $\text{Al(OH)}_{3(\text{s})}$  ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น  $\text{Al(OH)}_4^-$  แต่ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ  $\text{Al(OH)}_{3(\text{s})}$  ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น  $\text{Al(OH)}^{2+}$  โดยสารส้มที่เติมลงในน้ำจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกหลักดังนี้

- กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวก ทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ที่มีประจุลบให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีความเหมาะสมกับที่แคบจึงควบคุมการทำงานได้ยากเพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณต่ำเกินไปกระบวนการโคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคมากทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวกและเกิดเสถียรภาพขึ้นอีก แต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

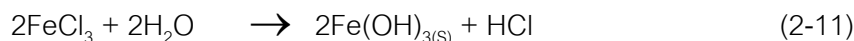
- กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มมากเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้  $\text{Al(OH)}_3$  ดังปฏิกิริยาที่ 2-8 การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารส้มเป็นจำนวนมากพอจนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ซึ่งทำให้ผลึก  $\text{Al(OH)}_3$  ที่มีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียวไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า จึงทำหน้าที่สร้างเป้าสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์จนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง พีเอช 6.8-8.2 ให้ผลดีที่สุด

- กลไกแบบโคแอกกูแลชันแบบร่วม (Combination Coagulation) เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและแบบกวาด โดยที่มีความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัด

3) กลไกโคแอกกูแลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ สูตรโมเลกุล  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เป็นผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง ปกติจะละลายน้ำได้ดีโดยสารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรดและกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวแล้วจะให้สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำมีประจุบวกสามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอนด้วยเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอร์ริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนรูปร่างเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ Bicarbonate alkalinity ดังปฏิกิริยาที่ 2-9



การสร้างโคแอกกูแลชันด้วยสารส้มไม่อาจได้ผลดีมากนักกับน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม กรณีเช่นนี้เฟอร์ริกคลอไรด์ให้ผลดีกว่าเมื่อเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ให้กับน้ำมีผลึกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น ดังปฏิกิริยาที่ 2-11



## 2.9 ไฟฟ้า

### 2.9.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้า

2.9.1.1 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งของการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า วัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Amp) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density,  $J$ ) คือ กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ผ่านไปหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) ดังแสดงในสมการ

$$J = \frac{I}{A} \quad (2-12)$$

เมื่อกระแสผ่านเข้าไปในวัสดุเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) โดยที่โลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม พบว่า เมื่อความต่างศักย์คงที่ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าคงที่ กระแสจะคงที่ด้วย โดยความหนาแน่นของกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้า ได้คือ

$$J = \sigma \cdot E_0 \quad (2-13)$$

พิจารณาตัวนำยาว  $l$  มีความต่างศักย์  $V$  ดังนั้น

$$J = \sigma \cdot \frac{V}{l} \quad (2-14)$$

$$\frac{I}{A} = \sigma \cdot \frac{V}{l} \quad (2-15)$$

$$V = \sigma \cdot \left( \frac{l}{\sigma A} \right) I \quad (2-16)$$

ความต่างศักย์กับกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรง ด้วยค่าคงที่  $\left( \frac{l}{\sigma A} \right)$  ซึ่ง  $\left( \frac{l}{\sigma A} \right)$  เรียกว่าความต้านทาน (Resistance, R) ดังนั้น

$$R = \frac{l}{\sigma A} = \frac{V}{I} \quad (2-17)$$

ส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้า  $\sigma$  คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า  $\rho$  ซึ่ง  $\rho = 1/\sigma$  ดังนั้น

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2-18)$$

- โดยที่
- J : ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density), แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
  - I : กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน, แอมแปร์ (A) หรือ คูลอมบ์ต่อวินาที
  - A : พื้นที่, ตารางเซนติเมตร
  - $E_0$  : ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า, โวลต์/เซนติเมตร
  - $\sigma$  : สภาพความนำไฟฟ้า (conductivity), โอห์ม/เซนติเมตร
  - $\rho$  : สภาพความต้านทานไฟฟ้า, เซนติเมตร/โอห์ม
  - V : ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุด, โวลต์
  - R : ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด, โอห์ม ( $\Omega$ )
  - l : ความยาวของตัวนำไฟฟ้า, เซนติเมตร

2.9.1.2 **สภาพความนำไฟฟ้า ( $\sigma$ )** คือ สภาพการยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน หรือการเคลื่อนที่ของประจุในวัสดุหรือตัวกลาง หน่วยเป็น โอห์ม/เซนติเมตร

2.9.1.3 **ความต่างศักย์ไฟฟ้า** จากกฎของโอห์ม ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) เป็น พลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยประจุที่สูญเสียไประหว่างจุด 2 จุด โดยกระแสไฟฟ้าในวงจรเท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า (R)

2.9.1.4 **ความต้านทานไฟฟ้า (R)** เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาร เป็นค่าคงที่ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ถ้ามีความต้านทานน้อยกระแสไฟฟ้าจะไหลมาก โลหะจะนำไฟฟ้าได้ดีที่สุดเมื่อ ความต้านทานเป็นศูนย์ และเป็นส่วนกลับกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) นอกจากนี้ค่าการ นำไฟฟ้ายังสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้า เคมี จะมีค่าเท่ากับ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

$$R = \frac{D}{C \times A} \quad (2-19)$$

โดยที่ R : ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์, โอห์ม

D : ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด, เซนติเมตร

C : ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์, โอห์ม

A : พื้นที่หน้าตัดที่อิเล็กโทรดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์, ตารางเซนติเมตร

2.9.1.5 **กระแสไฟฟ้า (I)** เป็นปริมาณของประจุทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่าน พื้นที่หน้าตัดขวางของตัวนำใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทิศทางของกระแสจะเป็นไปตามการ เคลื่อนที่ของประจุบวก ซึ่งจะไหลจากศักย์ที่สูงกว่าไปยังศักย์ที่ต่ำกว่า เมื่อประจุไฟฟ้าได้รับ พลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้า ผ่านขดลวดความ ต้านทานไปยังขั้วลบของเซลล์ ทั้งนี้กระแสอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไหลต่อเนื่องบนตัวนำไฟฟ้าที่เป็น ของแข็งซึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด ซึ่งจะไหลจากศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าไป ยังศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า

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

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมป์} \times \text{โวลต์} \quad (2-20)$$

เนื่องจากงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้ามาจากการถ่ายอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมป์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมล ของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมป์ สมมติว่าในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายอิเล็กตรอน  $n$  โมลจะมีปริมาณประจุเท่ากับ  $n \times 96,487$  หรือ  $nF$  คูลอมป์ ในเมื่อ  $F$  คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมป์/โมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการ (2-21) จะเปลี่ยนเป็น

$$W_{\text{elec}} = (nF) (E) \quad (2-21)$$

$$= nE \times 96,487 \quad (2-22)$$

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

$$\Delta G = -nFE \quad (2-23)$$

เครื่องหมายของ  $\Delta G$  มีความหมายสำคัญมาก คือ ถ้าที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งๆ  $\Delta G$  มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นไม่ได้เอง ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล  $\Delta G$  จะเท่ากับศูนย์ แต่  $\Delta G$  และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทำให้สามารถระบุได้ว่าปฏิกิริยาในเซลล์เป็นแบบเกิดได้เองหรือเกิดไม่ได้เองหรืออยู่ในภาวะสมดุล (ดังตารางที่ 2-2)



ตารางที่ 2-2 ความหมายของเครื่องหมาย  $\Delta G$  และ  $\Delta E$  (กัณฑ์มาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539)

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมายของ $\Delta G$	เครื่องหมายของ $\Delta E$
เกิดได้เอง	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดเองไม่ได้	บวก (+)	ลบ (-)
ที่ภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

2.9.1.7 กฎฟาราเดย์ ทางไฟฟ้าเคมี ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติก เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชัน หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$1 \text{ F (Faraday)} = eN \quad (2-24)$$

$$= (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \quad (2-25)$$

$$= 96487 \text{ C mol}^{-1} \quad (\text{C} = \text{coulomb}) \quad (2-26)$$

$$\text{จะได้ } Q \text{ (coulomb)} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)} \quad (2-27)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

$$W = \frac{I \cdot t \cdot M}{Z \cdot F} \quad (2-28)$$

- เมื่อ
- e : ประจุของอิเล็กตรอน 1 ตัว เท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์ (Coulomb, C)
  - F : ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 แอมแปร์·วินาทีต่อประจุ หรือคูลอมบ์ (Coulomb, C)
  - I : ค่ากระแสไฟฟ้า, แอมแปร์ (Ampere, A)
  - M : น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด, กรัมต่อโมล (g/mol)
  - N : จำนวนอิเล็กตรอน ต่อ 1 โมล เท่ากับ  $6.02 \times 10^{23}$  ต่อโมล ( $\text{mol}^{-1}$ )
  - Q : ปริมาณไฟฟ้า, คูลอมบ์ (Coulomb, C)
  - t : เวลาที่ใช้, วินาที (second, s)
  - W : ปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ, กรัม (g)
  - Z : จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์, ประจุต่อโมล

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎีหมายความว่า กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากความต้านทานต่างๆ เนื่องจากมีตัวออกซิไดซ์หลายชนิดละลายอยู่รวมกันในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส (Essadki และคณะ, 2008)

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2-29)$$

## 2.9.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) (ทบทวมหาวิทยาลัย, 2528)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ขั้วที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active Electrodes) ขั้วที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Inert Electrodes) และขั้วก๊าซ (Gas Electrodes) โดยวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็กไทเทเนียม แพลทินัม และแกรไฟต์ เป็นต้น

**2.9.2.1 อะลูมิเนียม (Aluminium)** มีลักษณะสีขาวเหมือนเงิน เนื้อเป็นมันเงาไม่หมอง มีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ไม่สึกกร่อนได้ง่าย ทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น และแข็งมากไม่ค่อยมีรอยแตกร้าว สามารถทำให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เช่น ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา โดยอะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโควาเลนต์ เมื่ออยู่ในน้ำ  $\text{Al}^{3+}$  จะเกิด ไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส เกลือซัลเฟต ไนเตรท และเฮไลต์ของอะลูมิเนียมละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายน้ำ การใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสขึ้นทำให้อะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายในสารละลาย ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก

**2.9.2.2 เหล็กกล้า (Steels)** เป็นโลหะหนัก ที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้างแต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรงถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้น

มักจะกลายเป็นสีน้ำตาลที่ผิวที่เรียกว่าสนิมเหล็ก เหล็กทำปฏิกิริยารวมกับออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้เกือบทั้งหมด เมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ  $Fe^{2+}$  ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไอออน  $(Fe(H_2O)_6)^{2+}$  สารละลาย  $Fe^{2+}$  นี้ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศกลายเป็น  $Fe^{3+}$  ได้  $Fe^{3+}$  อยู่ในสารละลายของน้ำเป็น hydrated ion เนื่องจาก  $Fe^{3+}$  มีขนาดไอออนเล็กและมีประจุมากจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้ง  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้ การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูป  $Fe^{2+}$  ที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่า pH ของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น  $Fe(OH)_2$  ได้ ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้วแคโทดและค่า pH ของน้ำเสีย ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่งโดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดี จึงเป็นที่นิยม

**2.9.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)** เป็นเหล็กกล้าที่จัดอยู่ในขอบข่ายเหล็กกล้าผสม ธาตุผสมที่สำคัญ คือ โครเมียมซึ่งจะมีตั้งแต่ร้อยละ 11 ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้าฟิล์มจะมีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิมให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงางาว

**2.9.2.4 ไทเทเนียม (Titanium)** โลหะทรานซิชันลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงแข็งและเหนียว สามารถดึงเป็นเส้นได้ มีความหนาแน่นต่ำที่สุดที่สภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อยมาก สามารถทนก๊าซคลอรีนแห้งได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับออกซิเจนได้สารประกอบโควาเลนต์ เช่น  $TiO_2$ ,  $TiCl_4$  เป็นต้น สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน +2, +3 และ +4 ซึ่งจะเสถียรที่ +4 ไทเทเนียมขาวถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ และไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ยิ่งไปกว่านั้นที่ขั้วลบพบว่าจะมีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายใสไม่มีตะกอน อีกทั้งยังเป็นตัวนำ

ไฟฟ้าที่ดีเพราะจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับ แต่ข้อเสียคือไทเทเนียมมีราคาสูง หาซื้อได้ยาก

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

**2.9.2.6 แกรไฟต์ (Graphite)** ธาตุรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน มีชื่อสามัญเรียกว่าพลัมเบโก (Plumbago) หรือแร้ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็งเป็นผลึกแผ่นบางๆ ทึบแสงและเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้มากในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย อะตอมของแกรไฟต์จะจัดตัวเป็นระนาบเป็นชั้นๆ อะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นจะอยู่ที่มุมของรูป regular hexagon การยึดกันระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์บอนด์ แต่ปิดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม ซึ่งสั้นพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนยึดกับอะตอมข้างเคียงด้วยพันธะโควาเลนต์ได้ แกรไฟต์มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ใต้ถ่านไฟฉาย ใต้ไฟอาร์ก รวมทั้งยังช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

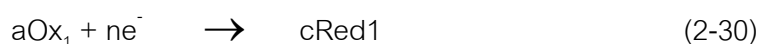
## 2.10 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

### 2.10.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

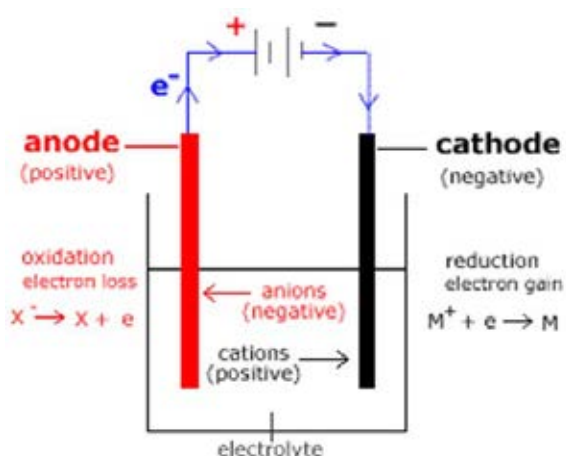
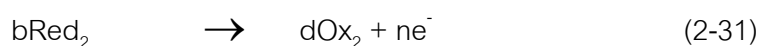
เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลซิส (electrolysis) ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายนำไฟฟ้า ดังภาพที่ 2-7 เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ถึงปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็กและอลูมิเนียม เป็นต้น ปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าที่

เกิดขึ้นที่ขั้วบวก (anode) จะทำให้เกิดการสีก่อนของอิเล็กโทรดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ขณะที่อิเล็กโทรดที่ขั้วลบ (cathode) เกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และ ไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ )

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

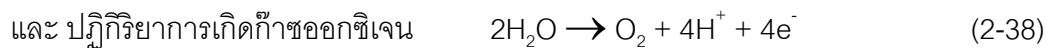
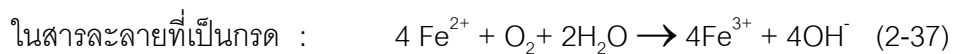
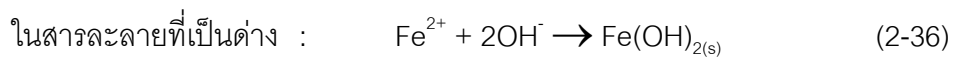
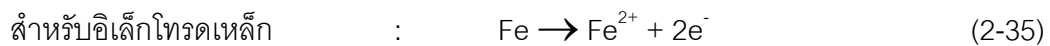
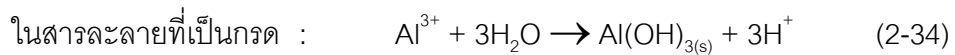
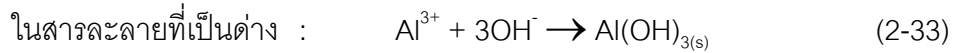
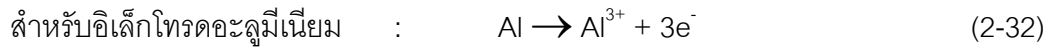


ภาพที่ 2-7 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

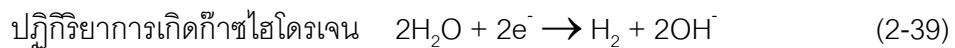
### 2.10.2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น (สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2551)

ปฏิกิริยาเคมีและกลไกการเกิดโคแอกกูเลชันที่เกิดขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำ ได้แก่ การนำไฟฟ้า พีเอช ขนาดของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีในน้ำ กลไกการเกิดอออนจะขึ้นกับชนิดของอิเล็กโทรดที่ใช้ต่อไปนี้

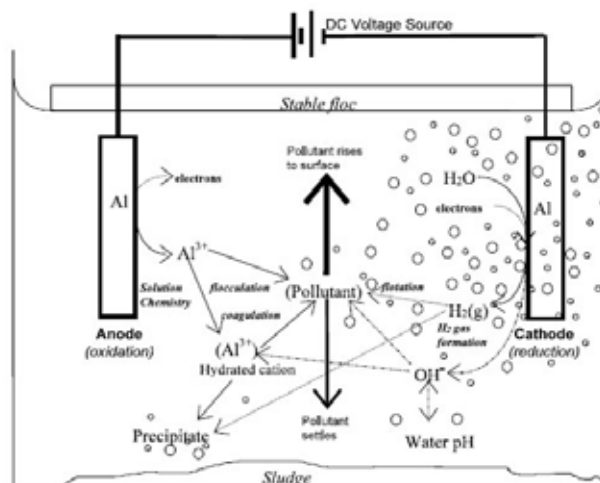
### ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก (Anode) มีดังต่อไปนี้



### ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) มีดังต่อไปนี้



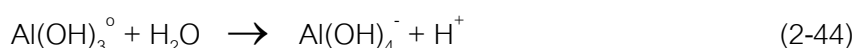
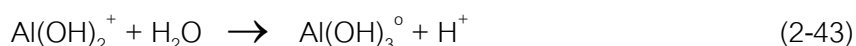
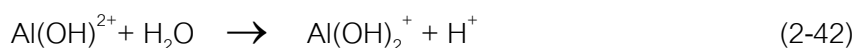
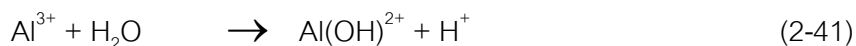
ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะไปเกาะติดกับของแข็งแขวนลอย และลอยตัวขึ้นผิวน้ำ แสดงในภาพที่ 2-8



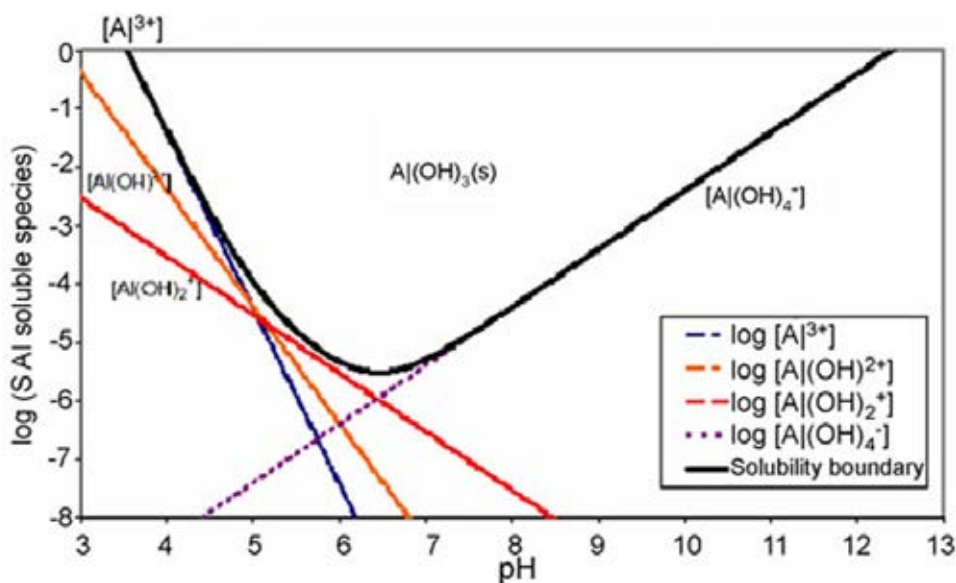
ภาพที่ 2-8 การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Holt และคณะ, 2002)

สำหรับการใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วบวก (Anode)  $\text{Al}^{3+}$  ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำ และไฮดรอกไซด์ไอออน (hydroxyl ion,  $\text{OH}^-$ ) ให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ (hydroxydes) หรือโพลีไฮดรอกไซด์ (polyhydroxides) โดยอยู่ในกลุ่มของ

- กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียว (Monomeric species) เช่น  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  และ  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$
- กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอม (Polymeric species) เช่น  $\text{Al}_2(\text{OH})^{4+}$  และ  $\text{Al}_2(\text{OH})_5^+$
- กลุ่มที่มีลักษณะไม่แน่นอนหรือละลายน้ำได้น้อย เช่น  $\text{Al}(\text{OH})_3$



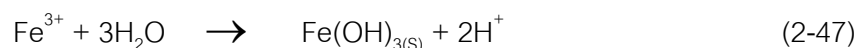
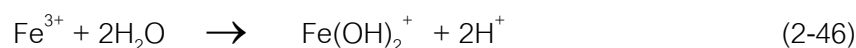
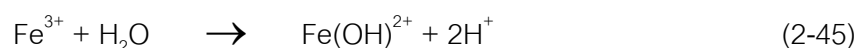
เมื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียว พีเอชของน้ำเป็นปัจจัยกำหนดความเข้มข้นและชนิดสารประกอบไอออนต่างๆ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (ดังภาพที่ 2-9)



ภาพที่ 2-9 การละลายของผลิตภัณฑ์ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์  $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$  เมื่อพิจารณาในกลุ่มของอะลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียว (mononuclear aluminium species) (Holt และคณะ, 2005)

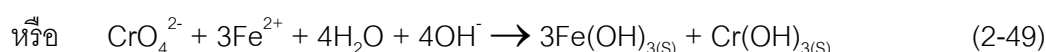
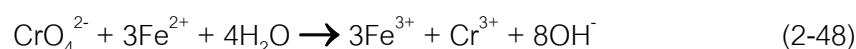
จากภาพที่ 2-9 แสดงว่าน้ำที่มีพีเอชต่ำ จะมี  $\text{Al}^{3+}$  มากที่สุด เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะได้ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกลดลง เมื่อพีเอชเข้าใกล้ความเป็นกลาง สารประกอบ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ซึ่งเป็นของแข็งจะเกิดขึ้นมากกว่าไอออนอื่นๆ พื้นที่ในเขตที่  $\text{Al}(\text{OH})_3$  แสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ตามทฤษฎี อะลูมิเนียมคอมเพล็กซ์ที่แสดงในปฏิกิริยาจะดูดติดผิวของอนุภาค อนุภาคมีประจุเป็นกลางหรือเปลี่ยนเป็นประจุตรงข้าม จึงเป็นผลให้มีการรวมตัวของอนุภาค ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดในขั้วลบจะดูดติดผิวที่อนุภาค เป็นผลให้มีอนุภาคเกิดการลอยตัว

กรณีที่ใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วบวก (Anode)  $\text{Fe}^{3+}$  ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับน้ำโดยขึ้นกับค่า pH ในสถานะที่เป็นกรดจะได้  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$   $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ดังสมการต่อไปนี้

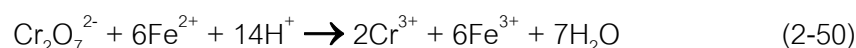


ในสถานะที่เป็นด่างจะได้  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  และอาจพบ  $\text{Fe}(\text{OH})_6^-$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  ร่วมด้วย

สำหรับน้ำเสียที่มี  $\text{Cr}^{6+}$  หรือ  $\text{CrO}_4^{2-}$  เป็นองค์ประกอบสามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดที่เป็นเหล็ก โดยไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  ที่เกิดขึ้นสามารถรีดิวซ์  $\text{Cr}^{6+}$  ให้เป็น  $\text{Cr}^{3+}$  ในสถานะที่เป็นด่าง ดังสมการต่อไปนี้



$\text{Cr}^{3+}$  จะถูกกำจัดได้ด้วยการตกผลึกเป็น  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  เมื่อเพิ่มค่า pH ของน้ำเสีย นอกจากนี้  $\text{Fe}^{3+}$  ยังสามารถรีดิวซ์  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ในสถานะที่เป็นกรดดังสมการต่อไปนี้



### 2.10.3 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด (ในทางปฏิบัตินั้นไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรงจึงต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์) เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น



เช่น  $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$  เป็นต้น โดยนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดมาตรฐานและวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน ( $E^0$  cell) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว ( $E^0$  cell) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐานโดยการทำให้เหมือนกับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ (ดังตารางที่ 2-3)

เช่น  $\text{MnO}_4^-$  กับ  $\text{Fe}^{2+}$  ในสารละลายกรดพบว่า จากตารางที่ 2-3 ค่า  $E^0$  ของระบบ  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = +0.77$  โวลต์ และค่า  $E^0$  ของ  $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+} = +1.52$  โวลต์ แสดงว่าระบบ  $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$  มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐานหรือที่สภาวะใดๆ คำนวณได้จากสมการ 2-51

$$E^0 \text{ cell} = E^0 (\text{ขั้วบวก}) - E^0 (\text{ขั้วลบ}) \quad (2-51)$$

ตารางที่ 2-3 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2528)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$\text{I}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^-$	0.536
$\text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^-$	0.5355
$\text{I}_2(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^-$	0.620
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$	0.521
$\text{H}_2\text{SO}_3 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{S}(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$	0.45
$\text{Ag}_2\text{CrO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ag}(\text{s}) + \text{CrO}_4^{2-}$	0.446
$\text{VO}^{2+} + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{V}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	0.361
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0.36
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$	0.337
$\text{UO}_2^{2+} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{U}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.334
$\text{BiO}^+ + 2\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Bi}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$	0.32
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}(\text{l}) + 2\text{Cl}^-$	0.268

ตารางที่ 2-3 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$\text{AgCl(s)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)} + \text{Cl}^-$	0.222
$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	0.17
$\text{BiCl}_4^- + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Bi(s)} + 4\text{Cl}^-$	0.16
$\text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}$	0.154
$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+$	0.153
$\text{S(s)} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{S(g)}$	0.141
$\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	0.1
$\text{AgBr(s)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)} + \text{Br}^-$	0.095
$\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	0.08
$\text{Ag(S}_2\text{O}_3)_2^{3-} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)} + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	0.010
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$	0.000
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb(s)}$	-0.126
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn(s)}$	-0.136
$\text{AgI(s)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)} + \text{I}^-$	-0.151
$\text{CuI(s)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu(s)} + \text{I}^-$	-0.185
$\text{N}_2(\text{g}) + 5\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{N}_2\text{H}_5^+$	-0.23
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni(s)}$	-0.250
$\text{V}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{V}^{2+}$	-0.255
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co(s)}$	-0.277
$\text{Ti}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti(s)}$	-0.336
$\text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb(s)} + \text{SO}_4^{2-}$	-0.356
$\text{Ti}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{2+}$	-0.37
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd(s)}$	-0.403
$\text{Cr}^{3+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}^{2+}$	-0.41
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe(s)}$	-0.440

ตารางที่ 2-3 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$2\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	-0.49
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}(\text{s})$	-0.74
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}(\text{s})$	-0.763
$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}(\text{s})$	-1.18
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}(\text{s})$	-1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}(\text{s})$	-2.37
$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}(\text{s})$	-2.87
$\text{Ba}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ba}(\text{s})$	-2.90
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}(\text{s})$	-2.925
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}(\text{s})$	-2.714
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}(\text{s})$	-3.045
$\text{F}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{HF}(\text{aq})$	3.06
$\text{O}_3(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	2.07
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$	2.01
$\text{Co}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$	1.842
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.776
$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_2(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}$	1.695
$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1.23
$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
$\text{IO}_3^- + 6\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightarrow 1/2\text{I}_2(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$	1.195
$\text{HNO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	1.00
$\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0.94
$2\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}$	0.92
$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{OH}^-$	0.88
$\text{Cu}^{2+} + \text{I}^- + \text{e}^- \rightarrow \text{CuI}(\text{s})$	0.86

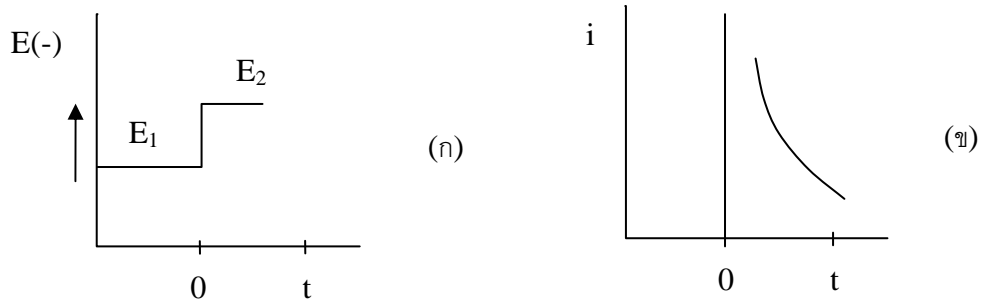
ตารางที่ 2-3 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส (ต่อ)

$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg(l)}$	0.854
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)}$	0.799
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg(l)}$	0.789
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	0.771
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.682
$\text{PtCl}_6^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PtCl}_4^{2+} + 2\text{Cl}^-$	0.68
$\text{Hg}_2\text{SO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg(l)} + \text{SO}_4^{2-}$	0.615

## 2.11 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

### 2.11.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method)

เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ดังภาพที่ 2-10) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก  $E_1$  เป็น  $E_2$  ที่ขั้วแคโทด โดย  $E_1$  คือค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ  $E_2$  คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในรูป (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ( $I = kC$ )

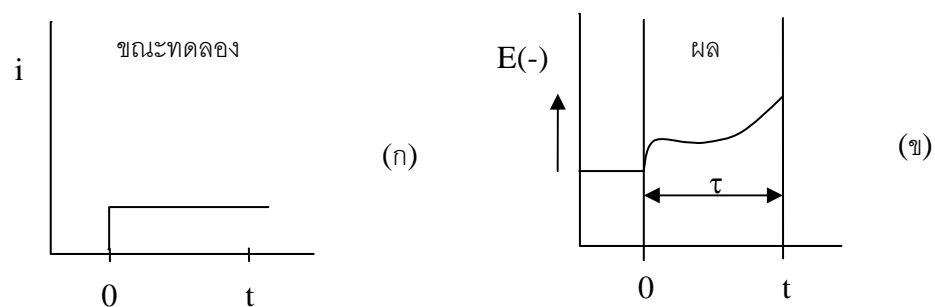


ภาพที่ 2-10 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

(Friedrich, 1962)

### 2.11.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique เป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ ( $Mn^+$ ) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่



ภาพที่ 2-11 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

(Friedrich, 1962)

ดังนั้นค่าความต่างศักย์ จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง  $Mn^+/M$  ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกันตามสมการของเนินสต์ ในช่วงเวลาที่เกิดการ

เปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time ( $\tau$ ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังภาพที่ 2-11 ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์สามารถแสดงได้ตามสมการของเนิร์นสต์ (Nerns's equation)

$$E = E^o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[red]} \quad (2-53)$$

- เมื่อ E : ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ณ สภาวะใดๆ, โวลต์  
 $E^o$  : ค่าความต่างศักย์มาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและสารละลาย, โวลต์  
 R : ค่าคงที่ของก๊าซเท่ากับ 8.314 จูลต่อโมลต่อเคลวิน  
 T : อุณหภูมิ, เคลวิน  
 n : จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา, ประจุต่อโมล  
 F : ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ  
 [Ox],[red] : ความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ตามลำดับ (โมลต่อลิตร)

เพื่อให้ได้อัตราในการกำจัดสูงสุด การรีดักชันของไอออนโลหะควรเป็นการควบคุมแบบถ่ายโอนมวลสาร (Mass transport control) สมการแสดงอัตราในการนำกลับโลหะออกจากสารละลาย เขียนได้ดังนี้

$$\frac{-Vdc}{dt} = \frac{-I_L}{nF} = k_m A_e \quad (2-54)$$

- เมื่อ V : ปริมาตรของสารละลาย, ลูกบาศก์เซนติเมตร  
 C : ความเข้มข้นของไอออนโลหะ, โมลต่อลิตร  
 t : เวลา, วินาที  
 $I_L$  : กระแสจำกัด (limiting current), แอมแปร์  
 $k_m$  : สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer coefficient), โมลต่อวินาที  
 $A_e$  : พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า, ตารางเซนติเมตร  
 n : จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา, ประจุต่อโมล  
 F : ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ

อินทิเกรตสมการข้างต้นเทียบกับเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\frac{C_{(t)}}{C_{(0)}} = \exp \frac{(-k_m A_e t)}{V} \quad (2-55)$$

เมื่อ  $C_{(0)}$  : ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเริ่มต้น, โมลต่อลิตร

$C_{(t)}$  : ความเข้มข้นไอออนโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเวลาเปลี่ยน, โมลต่อลิตร

จากสมการกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนโลหะขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญคือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า และการถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้าการกวนจะช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร

### 2.11.3 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

2.11.3.1 **แรงเคลื่อนไฟฟ้า** กระแสไฟฟ้ามีส่วนโดยตรงกับกระแสที่ให้แก่ระบบ (ดังสมการที่ 2-12)

2.11.3.2 **การเคลื่อนที่ของประจุไอออน** ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของไอออนขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของไอออน

2.11.3.3 **อุณหภูมิ** อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส

2.11.3.4 **พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า** ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่ดีสำหรับการถ่ายเทและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด

2.11.3.5 **ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า** จำนวนกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้า ถ้ามีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น

2.11.3.6 **จำนวนประจุของไอออน** เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น จำนวนประจุของไอออนจะเพิ่มมากขึ้น

2.11.3.7 **ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า** ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย ค่าการนำไฟฟ้ามีส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้านั้นๆ

## 2.12 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

### 2.12.1 ข้อได้เปรียบ

- การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นระบบที่ใช้เครื่องมือธรรมดาที่สามารถเดินระบบได้ง่าย
- น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า มีลักษณะใส ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น
- สลัดจ์ที่ได้จากการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าตกตะกอนเกิดเร็วและรีดน้ำออกได้ง่าย และเกิดสลัดจ์ในปริมาณที่น้อยกว่าการใช้สารเคมีในการตกตะกอน
- ตะกอนหรือฟล็อกที่เกิดขึ้นจากการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีลักษณะเดียวกับสลัดจ์ที่ได้จากการเติมสารเคมีแต่มีขนาดใหญ่กว่า และคงตัวกว่า ทำให้สามารถกำจัดออกด้วยการกรองได้เร็วกว่า
- น้ำทิ้งจากระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีค่าของแข็งละลายน้ำน้อยกว่าการใช้สารเคมีตกตะกอน ซึ่งทำให้ค่าบำบัดน้ำสำหรับการนำน้ำกลับไปใช้ใหม่มีค่าต่ำกว่า
- กระบวนการการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถกำจัดคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่า
- ระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าไม่ต้องใช้สารเคมี จึงไม่มีปัญหาการใช้สารเคมีในการปรับค่า pH เมื่อเกิดปัญหาการเติมสารเคมีที่มากเกินไป
- ฟองก๊าซขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะเกาะติดกับของแข็งแขวนลอยและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำทำให้สามารถกำจัดออกได้ง่าย
- ระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าใช้เครื่องมือแบบธรรมดาที่ไม่มีระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า จึงทำให้การบำรุงรักษาทำได้ง่าย
- สามารถนำไปใช้ในกรณีที่ไม่มีไฟฟ้า โดยสามารถใช้แผงผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ต่อเข้ากับแบตเตอรี่และจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบ ซึ่งอาจเพียงพอสำหรับการเดินระบบขนาดเล็กได้



## 2.12.2 ข้อเสียเปรียบ

- โลหะจากอิเล็กโทรดละลายลงสู่น้ำเสีย ทำให้ต้องทำการเปลี่ยนอิเล็กโทรดตามระยะเวลาการใช้งาน
- การใช้ไฟฟ้าอาจมีราคาแพงในบางพื้นที่
- อาจเกิดฟิล์มออกไซด์ของเกลือโลหะบนผิวของอิเล็กโทรด ทำให้ประสิทธิภาพของระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าลดลง ทำให้ต้องทำการล้างอิเล็กโทรดเป็นครั้งคราว
- น้ำเสียที่บำบัดด้วยระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าต้องมีค่าการนำไฟฟ้าสูงเพียงพอ
- เกลือไฮดรอกไซด์ที่ได้มีลักษณะเป็นเจลอาจละลายน้ำได้ในบางกรณี

## 2.13 ถังปฏิริยาแบบอากาศยก (Air-life reactor, ALR)

### 2.13.1 ถังปฏิริยาแบบอากาศยก (Merchuk และ Glux, 2002)

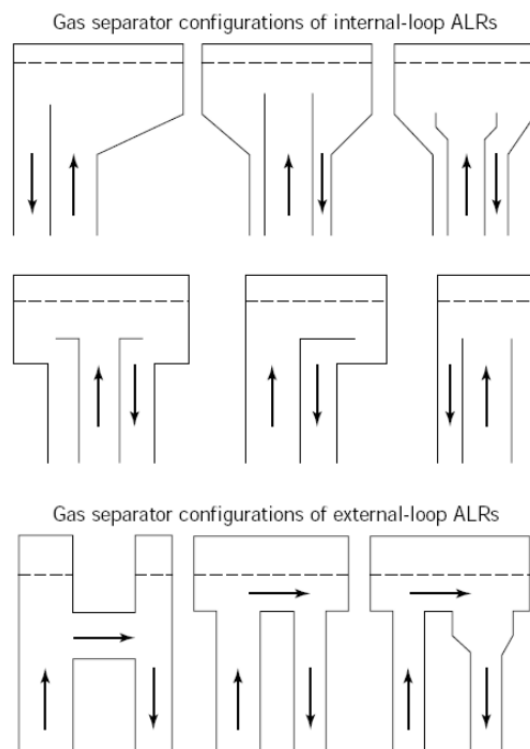
ถังปฏิริยาแบบอากาศยกเป็นถังปฏิริยารูปแบบหนึ่งที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง ก๊าซ-ของเหลว หรือ ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง อยู่ภายในถังปฏิริยา โดยส่วนใหญ่ถังปฏิริยาแบบอากาศยกจะมีการเติมอากาศโดยของเหลวจะมีการวนกลับผ่านช่องหรือส่วนที่บังคับให้น้ำไหลผ่าน การปั่นป่วนของของเหลวในถังปฏิริยาแบบอากาศยกจะเกิดจากการเติมอากาศหรือบางครั้งเกิดจากก๊าซอื่นๆ ที่เกิดขึ้นก็ได้ การไหลของอากาศเป็นส่วนสำคัญในการแลกเปลี่ยนสารระหว่าง ก๊าซและตัวกลางต่างๆ งานวิจัยที่ผ่านมาใช้งานถังปฏิริยาแบบอากาศยกในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวเคมี การหมัก การผลิตเบียร์ ไวน์ การดูดซับก๊าซ

โครงสร้างของถังปฏิริยาแบบอากาศยกคล้ายถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column reactor, BCR) คือมีการเติมอากาศในส่วนด้านล่างของถังปฏิริยา แตกต่างกันคือถังปฏิริยาแบบอากาศยกจะมีส่วนที่มีการไหลวนกลับของของเหลวซึ่งในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศไม่มี

### 2.13.2 กลไกการไหลของถังปฏิริยาแบบอากาศยก

ถังปฏิริยาแบบอากาศยกโดยทั่วไป ประกอบด้วย 4 ส่วน ที่เกี่ยวข้องกัน คือ

- ส่วนเติมอากาศ (Riser) เป็นส่วนที่มีหัวพ่นอากาศหรือส่วนที่มีการเกิดของฟองอากาศ อยู่ด้านล่างของถังปฏิกริยา โดยเมื่อเกิดฟองอากาศขึ้นจะเกิดการลอยตัวของก๊าซและของเหลวมีการเคลื่อนที่
- ส่วนไม่เติมอากาศ (Downcomer) ส่วนนี้จะทำให้เกิดการไหลเวียนของของเหลวในถังปฏิกริยา ซึ่งจากการที่มีท่อภายในเป็นผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนของฟองอากาศกับของเหลวได้ดีและทั่วถึง
- ส่วนฐาน (Base) เป็นส่วนที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกริยา เชื่อมต่อระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศ การออกแบบส่วนฐานของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่แตกต่างกันจะมีผลต่อสัดส่วนของก๊าซ (gas holdup) ความเร็วของของเหลว และการไหลของของแข็ง
- ส่วนที่มีการแยกตัวของก๊าซ (gas separator) เป็นส่วนที่อยู่บนสุดของถังปฏิกริยา ส่วนของเหลวหมุนวนกลับและก๊าซลอยตัวขึ้นด้านบนและเกิดการแยกตัวระหว่างชั้นของเหลวและก๊าซ รูปแบบการแยกตัวของก๊าซ ดังแสดงในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 รูปแบบการแยกตัวของก๊าซในแบบต่างๆ (Merchuk และ Glux, 2002)

### 2.13.3 การจำแนกชนิดของถังปฏิริยาแบบอากาศยก

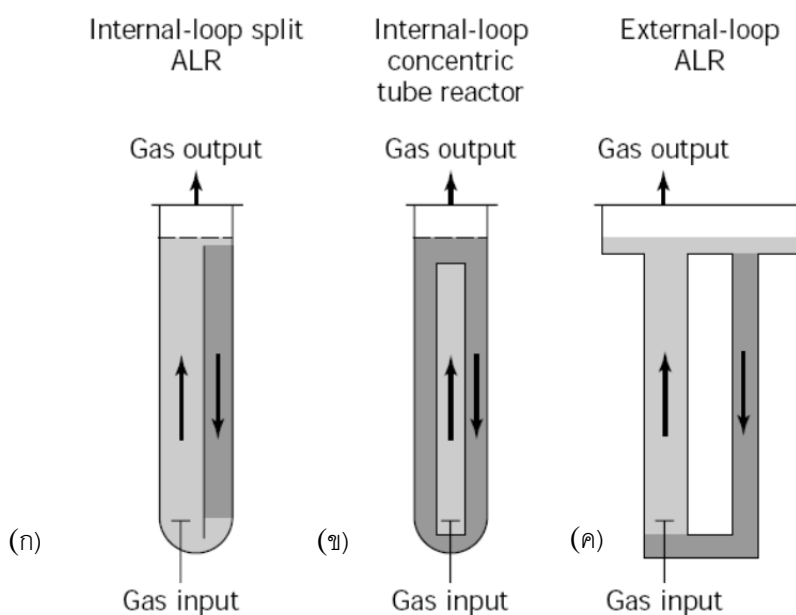
ถังปฏิริยาแบบอากาศยก สามารถจำแนกตามโครงสร้างของถังปฏิริยา ได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการไหลวนภายใน และชนิดที่มีการไหลวนภายนอกดังแสดงในภาพที่ 2-13

#### 2.13.3.1 ถังปฏิริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน

เป็นถังปฏิริยาที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นในแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่แสดงในภาพที่ 2-13(ก) หรือมีการติดตั้งท่อภายใน ในถังรูปทรงกระบอก 2-13(ข)

#### 2.13.3.2 ถังปฏิริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอก

เป็นถังปฏิริยาที่ประกอบไปด้วยถังสองถัง โดยในส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศแยกจากกันและเชื่อมต่อกันที่บริเวณด้านบนและด้านล่าง เมื่อมีการเติมอากาศในส่วนที่เติมอากาศ อากาศจะทำให้เกิดการปั่นป่วนและยกตัวขึ้นทำให้ระดับน้ำด้านบนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเกิดการไหลวนไปยังส่วนไม่เติมอากาศ โดยของเหลวจะไหลไปตามท่อและเชื่อมเข้ากับถังปฏิริยาส่วนเติมอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2-13 (ค)



ภาพที่ 2-13 ถังปฏิริยาแบบอากาศยก ชนิดที่มีการไหลวนภายใน (ก) แผ่นกั้นที่ตั้งในแนวดิ่งของถังปฏิริยา (ข) ท่อภายในในถังปฏิริยารูปทรงกระบอกที่ซึ่งอากาศถูกพ่นในส่วนหนึ่งของท่อภายใน (ค) ถังปฏิริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอก (Merchuk และ Glux, 2002)

### 2.13.4 ข้อดีของถังปฏิริยาแบบอากาศยก

ถังปฏิริยาแบบอากาศยกมีข้อดีหลายประการมากกว่าถังปฏิริยาชนิดอื่นๆ (ถังปฏิริยาแบบฟองอากาศและถังกวนแบบใช้ใบพัด) เช่น

- ออกแบบง่าย
- ดูแลรักษาง่าย
- ใช้พลังงานต่ำ
- กำหนดรูปแบบการไหลได้
- ควบคุมอัตราการไหลวนของของเหลวได้
- เวลาในการกวนผสมน้อย
- การกวนผสมไม่รุนแรงและคงที่

จากการจำแนกชนิดของถังปฏิริยาแบบอากาศยกผู้ทำงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอก (External Loop) ดังภาพที่ 2-13(ค) เนื่องจากถังปฏิริยาชนิดนี้มีคุณสมบัติในการไหลวนที่เหมาะสมกับการนำไปบำบัดน้ำมันตัดร่วมกับกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้ามากกว่าแบบที่ใช้แบบหมุนวนภายใน โดยจากโครงสร้างที่ส่วนเติมอากาศและไม่เติมอากาศแยกจากกันอย่างชัดเจน จึงสามารถใช้ส่วนที่ไม่เติมอากาศเป็นส่วนที่ทำปฏิริยาการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เมื่อเกิดฟองก๊าซจะลอยตัวขึ้นและดันน้ำมันให้ลอยตัวขึ้นแยกชั้นอยู่ด้านบน และส่วนที่ไม่เติมอากาศเป็นส่วนที่มีการวนกลับของของเหลวเพื่อกลับมาทำปฏิริยาใหม่

### 2.13.5 ค่าอุทกพลศาสตร์ในถังปฏิริยาแบบอากาศยก (Hydrodynamics)

#### 2.13.5.1 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์

1. การเกิดฟองอากาศจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเกิดจากเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) เมื่อเกิดปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิริยารีดอกซ์) ของขั้วไฟฟ้า ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดที่ขั้วลบ (cathode) ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) โดยปริมาณของฟองก๊าซจะเปลี่ยนแปลงตามกระแสที่ไฟฟ้าที่ได้รับเข้ายังเซลล์เคมีไฟฟ้า

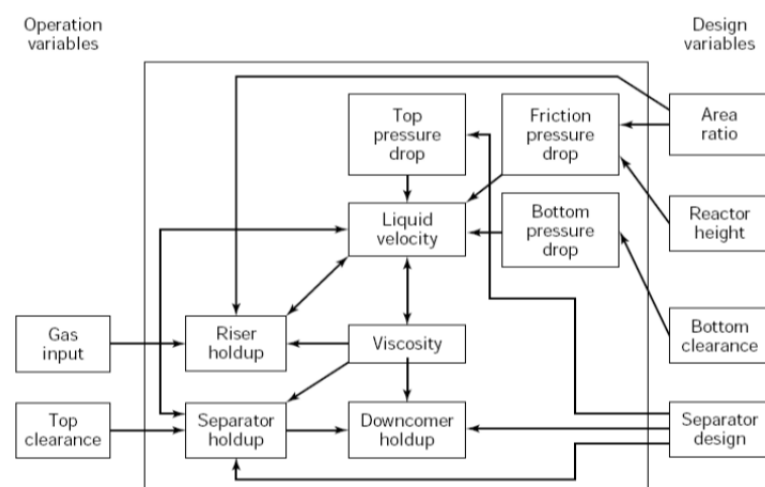
2. พื้นที่หน้าตัดของท่อภายใน ถ้ามีพื้นที่หน้าตัดมากจะทำให้มีพื้นที่แลกเปลี่ยนก๊าซกับของเหลวมาก มีผลทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างก๊าซกับของเหลวมากขึ้น

3. ความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบถังปฏิริยา การเดินระบบ และค่าทางอุทกพลศาสตร์ในถังปฏิริยาแบบอากาศยก สามารถแสดงได้ในภาพที่ 2-14

รูปแบบการออกแบบถังปฏิริยาได้แก่ ความสูงของถังปฏิริยา อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศ รูปแบบของส่วนที่มีการแยกตัวของก๊าซ และส่วนด้านล่างที่เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนที่ไม่เติมอากาศ (เป็นส่วนที่ของเหลวเคลื่อนที่จากส่วนไม่เติมอากาศกลับมายังส่วนเติมอากาศ และด้านทานการไหลของน้ำเข้าที่เข้ามายังส่วนไม่เติมอากาศ

รูปแบบการเดินระบบ ได้แก่ อัตราการเข้าของก๊าซ และส่วนด้านบนที่เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนที่ไม่เติมอากาศ โดยทั้งสองรูปแบบที่กล่าวมาจะมีความสำคัญต่อความเร็วของของเหลวในถังปฏิริยาแบบอากาศยก โดยจะแสดงออกมาในค่าของความดันลด (Pressure drop) และการยกตัว (holdup)

ความหนืดของของเหลวในถังปฏิริยาแบบอากาศยกไม่มีผล เนื่องจากในกรณีนี้เป็นการกวนผสมระหว่างก๊าซและของเหลว แต่จะมีผลต่อสัดส่วนของก๊าซ (และความเร็วของของเหลวในกรณีของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวน; non-Newtonian liquids) และเป็นผลจากการเกิดปฏิริยา ทำให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงตามลักษณะการทำงาน



ภาพที่ 2-14 ความสัมพันธ์ของอุทกพลศาสตร์กับรูปแบบถังปฏิริยาแบบอากาศยก

(Merchuk และ Glux, 2002)

### 2.13.5.2 ตัวแปรสำคัญในการออกแบบถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

ลักษณะเฉพาะของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีผลมาจากตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการออกแบบดังนี้

1. ขนาดของฟองก๊าซและการกระจายตัวของขนาดฟองเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ เพราะมีผลโดยตรงต่อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวซึ่งเชื่อมโยงไปถึงผลของการถ่ายโอนมวลสารระหว่างก๊าซและของเหลว ขนาดของฟองก๊าซที่ต่างกันมีผลมาจากกระแสไฟฟ้าที่ได้รับเข้าไปที่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไป ฟองก๊าซก็จะเกิดมากและมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ขนาดฟองยังขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลวที่ใช้ในถังปฏิกริยา ถ้าของเหลวที่ใช้เป็นของเหลวหนืด เช่น กลีเซอรอล ฟองมีโอกาสที่จะเกิดการรวมตัวได้ง่าย เนื่องจากฟองเคลื่อนตัวช้าเพราะความหนืดของของเหลวทำให้ฟองสองฟองมีเวลาที่จะใกล้กันมากขึ้นจนสามารถเกิดการรวมตัวของฟองก๊าซได้ทำให้ฟองมีขนาดใหญ่กว่าในกรณีของของเหลวไม่หนืด เช่น น้ำกลั่นและเอทิลแอลกอฮอล์ ขนาดของฟองก๊าซมีขนาดเล็กกว่าในของเหลวหนืด เนื่องจากของเหลวไหลได้ง่ายกว่าทำให้ฟองก๊าซสองฟองไหลออกจากกัน โอกาสที่จะรวมตัวกันจึงมีน้อย

2. สัดส่วนของก๊าซ คือ สัดส่วนปริมาตรของก๊าซในปริมาตรของการกระจายตัวของก๊าซกับของเหลวยกตัว มีความสำคัญในสามส่วนด้วยกันคือ

- แสดงถึงศักยภาพของการถ่ายโอนมวลสาร ดังนั้น ถ้าระบบมีสัดส่วนของก๊าซสูงหมายถึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวมากทำให้การถ่ายโอนมวลสารมากขึ้น

- ความแตกต่างของสัดส่วนของก๊าซระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศเป็นแรงเคลื่อนทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนของของเหลว ดังนั้นในการเพิ่มสัดส่วนของก๊าซไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มฟองก๊าซ ยังเพิ่มการไหลเวียนของของเหลวด้วยและในการออกแบบลักษณะโครงสร้างของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีอิทธิพลสำคัญต่อสัดส่วนของก๊าซคือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด

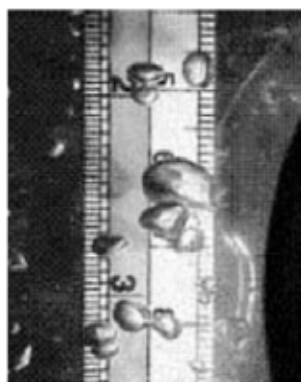
- อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของส่วนไม่เติมอากาศต่อส่วนเติมอากาศ ( $A_d/A_r$ ) มีผลต่อสัดส่วนของก๊าซ เมื่อลดอัตราส่วน  $A_d/A_r$  ทำให้สัดส่วนของก๊าซเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนเติมอากาศมีพื้นที่มาก ทำให้มีโอกาสเกิดสัดส่วนของก๊าซได้มาก เพราะสัดส่วนของก๊าซส่วนใหญ่เกิดภายในส่วนเติมอากาศ

3. อัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างก๊าซกับของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีอิทธิพลมาจากสมบัติทางกายภาพของของผสม คือ ความเร็วของก๊าซ สัดส่วนของก๊าซ ขนาดของฟองก๊าซ และความเร็วของของเหลว โดยที่อัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างก๊าซกับของเหลวจะแสดงในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรทั้งหมด (Overall Volumetric Mass Transfer Coefficient,  $k_L a$ ) โดยที่สัมประสิทธิ์นี้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบถังปฏิกรณ์ในทางอุตสาหกรรม และงานวิจัยส่วนมากได้ทดลองหาสัมประสิทธิ์นี้ แต่ค่านี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้เข้าใจถึงกระบวนการถ่ายโอนมวลสารระหว่างก๊าซกับของเหลว จึงได้มีการแยกพารามิเตอร์ออกเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร ( $k_L$ ) และ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว ( $a$ ) ซึ่งมีเพียงไม่กี่งานวิจัยที่หาความสัมพันธ์แบบนี้

### 2.13.5.3 การวัดและการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ

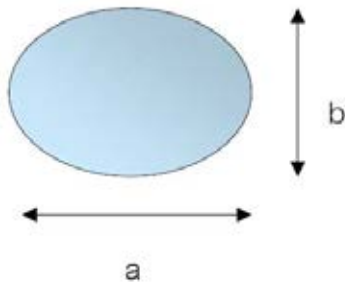
#### 1. ขนาดฟองก๊าซ

วัดขนาดของฟองก๊าซในส่วนเติมอากาศ โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ยี่ห้อ BASLER A602f-2 โดยในแต่ละการทดลองใช้ฟองก๊าซระหว่าง 100-150 ฟอง ในการคำนวณโดยอ่านขนาดของฟองจากสเกลที่ติดไว้กับท่อภายใน ซึ่งในกรณีที่ฟองไม่ใช่วงกลม จะคำนวณหาขนาดฟองอากาศเทียบเท่า (Equivalent Bubble Diameter) จากสมการที่ 2-56 แล้วนำมาคำนวณ Mean diameter จากสมการที่ 2-57



ภาพที่ 2-15 ตัวอย่างการวัดขนาดฟองโดยใช้รูปที่ถ่ายได้จากการทดลอง

(พรทิพย์ วงษ์สุโขโต, 2545)



$$d_{Bi} = (a^2 b)^{1/3} \quad (2-56)$$

$$d_B = \frac{\sum_{i=1}^a d_{Bi}^3}{\sum_{i=1}^a d_{Bi}^2} \quad (2-57)$$

- เมื่อ
- a : แกนเอกของวงรี
  - b : แกนโทของวงรี
  - $d_{Bi}$  : ขนาดฟองอากาศเทียบเท่า (equivalent size of bubble)

## 2. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area)

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ คือ สัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ( $S_B$ ) ต่อปริมาตรทั้งหมดของระบบ ( $V_{TOTAL}$ ) โดยตัวแปรนี้ขึ้นกับค่าตัวแปรสำคัญๆ ได้แก่  $d_B$ ,  $f_B$ , และ  $U_B$  โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในงานทดลองนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ (2-59) และ (2-60)

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} = \frac{6 \cdot Q_G}{\pi \cdot D_B^3} \quad (2-58)$$

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} \quad (2-59)$$

$$S_B = \pi d_B^2 \quad (2-60)$$

- เมื่อ
- a : พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (interfacial area), ต่อเมตร
  - $N_B$  : จำนวนฟองที่เกิด (number of bubbles generated)
  - $S_B$  : พื้นผิวของฟองทั้งหมด (total bubble surface), ตารางเมตร
  - $V_{TOTAL}$  : ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ทั้งหมด (total volume in reactor), ลูกบาศก์เมตร
  - $f_B$  : ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency), ต่อวินาที
  - $H_L$  : ความสูงของของเหลว (liquid height), เมตร
  - $U_B$  : ความเร็วที่เกิดฟอง (bubble rising velocity), เมตรต่อวินาที
  - $d_B$  : เส้นผ่านศูนย์กลางกลางฟอง (bubble diameter), เมตร



### 3. ความเร็วของของเหลว (Liquid Velocity)

วัดโดยการฉีดสีเข้าไปใน จุด 2 จุด แล้ววัดระยะทางและจับเวลาที่สีใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างจุด 2 จุด คำนวณได้จากสมการที่ 2-61

$$U_{Ld} = \frac{L_d}{t_d} \quad (2-61)$$

เมื่อ  $U_{Ld}$  : ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ, เมตรต่อวินาที  
 $t_d$  : เวลาที่สีใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างจุด 2 จุด, นาที

Chisti และ Moo-Young (1989) ได้สรุปสมการเพื่อใช้หาความเร็วของของเหลวในส่วนเต็มอากาศ ( $U_{Lr}$ ) โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมดุลพลังงาน (energy balance) ภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ได้ดังนี้

$$U_{Lr} = \sqrt{\frac{2gH_D(\epsilon_r - \epsilon_d)}{\frac{K_T}{(1-\epsilon_r)^2} + K_B \frac{(A_r/A_d)^2}{(1-\epsilon_d)^2}}} \quad (2-62)$$

เมื่อ  $U_{Lr}$  : ความเร็วของของเหลวในส่วนเต็มอากาศ, เมตรต่อวินาที  
 $A_r$  : พื้นที่หน้าตัดส่วนเต็มอากาศ (riser cross-sectional area), ตารางเมตร  
 $A_d$  : พื้นที่หน้าตัดส่วนไม่เต็มอากาศ (downcomer cross-sectional area, ตารางเมตร)  
 $H_D$  : ความสูงของเหลวเหนือส่วนไม่เต็มอากาศ, เมตร  
 $K_B$  และ  $K_T$  : hydraulic pressure loss coefficients  
 $\epsilon_r$  : สัดส่วนของก๊าซในส่วนเต็มอากาศ (riser gas holdup)  
 $\epsilon_d$  : สัดส่วนของก๊าซในส่วนเต็มอากาศ (downcomer gas holdup)

## 4. สัดส่วนของก๊าซโดยรวม

Overall gas holdup ( $\epsilon_{g,o}$ ) หาโดยใช้วิธีการขยายปริมาตร (Volume expansion) ซึ่ง  $\epsilon_{g,o}$  คำนวณจากสมการที่ 2-63

$$\epsilon_{g,o} = \frac{H_D - H_L}{H_D} \quad (2-63)$$

เมื่อ  $H_D$  : ความสูงของของเหลวในขณะที่พ่นอากาศ, เมตร  
 $H_L$  : ความสูงของของเหลวที่ยังไม่ได้ผ่านการพ่นอากาศ, เมตร

Gas Holdup คือ ปริมาตรในส่วนของก๊าซต่อปริมาตรทั้งหมดของแข็ง-ของเหลวและ Gas holdup เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของส่วนไม่เต็มอากาศและส่วนเต็มอากาศลดลง (Merchuk และ Glux, 2002) ดังแสดงในสมการ 2-64

$$\epsilon_i = \frac{V_G}{V_L + V_G + V_s} \quad (2-64)$$

เมื่อ  $\epsilon_i$  : สัดส่วนของก๊าซ (gas holdup)  
 $V_G$  : ปริมาตรในส่วนของก๊าซ, ลูกบาศก์เมตร  
 $V_L$  : ปริมาตรในส่วนของของเหลว, ลูกบาศก์เมตร  
 $V_s$  : ปริมาตรในส่วนของของแข็ง, ลูกบาศก์เมตร

หรือ หากจากความสัมพันธ์จากสมการพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ได้แก่

$$a = \left( \frac{6\epsilon}{d_b(1-\epsilon)} \right) \quad (2-65)$$

เมื่อ  $a$  : พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (interfacial area), ต่อเมตร  
 $d_b$  : เส้นผ่านศูนย์กลางฟอง (bubble diameter), เมตร  
 $\epsilon$  : สัดส่วนของก๊าซ (gas holdup)

### 2.13.5.4 ขอบเขตการไหล (Flow regime)

โดยทั่วไปขอบเขตการไหลวนสามารถวิเคราะห์ให้ 2 วิธี ได้แก่ การพิจารณาจากหลักการเกิดของฟองและการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ (นลินี ตัณฑทิกุล, 2547)

#### 1. การพิจารณาจากหลักการเกิดของฟองอากาศ

1.1 Homogeneous bubble flow : ขอบเขตนี้เกิดขึ้นที่ความเร็วก๊าซต่ำๆ (น้อยกว่า 0.015) ฟองอากาศในขอบเขตนี้มีการกระจายขนาดในช่วงแคบๆและของเหลวไหลที่ความปั่นป่วนต่ำ

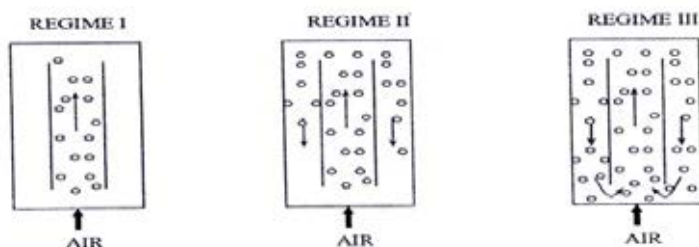
2.1 Heterogeneous bubble flow หรือ Churn turbulent flow : ขอบเขตนี้เกิดที่ความเร็วก๊าซสูงๆ ความปั่นป่วนในเฟสของเหลวสูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับขอบเขตการไหลแบบ Homogeneous

#### 2. การพิจารณาจากหลักการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ

2.1 No gas entrainment (Regime I) : ขอบเขตนี้เกิดขึ้นที่ความเร็วของก๊าซต่ำๆ ไม่มีฟองอากาศเคลื่อนที่เข้าไปในส่วนไม่เต็มอากาศ ขณะที่ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยของฟองอากาศในของเหลว

2.2 Gas entrainment but no gas recirculation (Regime II) : ในขอบเขตนี้ ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศจะเท่ากับความเร็วของฟองอากาศ ซึ่งผลลัพธ์ในฟองอากาศ ฟองจะถูกนำพาเข้าไปในส่วนไม่เต็มอากาศแต่ฟองจะไม่ไหลวนกลับไปในส่วนเต็มอากาศ

2.3 Complete gas recirculation (Regime III) : ขอบเขตนี้เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศสูงกว่าความเร็วของฟองอากาศ ฟองอากาศเกิดการไหลวนโดยของเหลวจากส่วนไม่เต็มอากาศเข้าไปในส่วนเต็มอากาศอีกครั้ง ดังภาพที่ 2-16 แสดงขอบเขตการไหลทั้ง 3 แบบ ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน



ภาพที่ 2-16 ขอบเขตการไหลในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน (ยึดหลักการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ) (นลินี ตัณฑทิกุล, 2547)

จากคุณสมบัติดังที่ได้กล่าวมาแล้วของถังปฏิริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายในจะเห็นได้ว่ามีลักษณะการไหลวนดังที่แสดงในภาพที่ 2-16 ใน ขอบเขตการไหลแบบที่ 2 (Regime II) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยอาศัยกลไกการไหลวนที่เกิดขึ้นในถังปฏิริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน กล่าวคือ ผู้ทำการวิจัยคาดว่าในส่วนเติมอากาศจะเป็นส่วนที่ทำปฏิริยาโดยทำหน้าที่รวมตะกอนและลอยขึ้นด้านบนผิวน้ำ และส่วนไม่เติมอากาศจะทำหน้าที่วนกลับของของเหลวและอ็อกซิจินของสารโคแอกกูแลนต์เข้ามายังส่วนที่เติมอากาศ ผู้ทำการวิจัยนี้ยังคาดหวังว่า เมื่ออ็อกซิจินของสารโคแอกกูแลนต์ที่ไหลวนกลับเข้าไปในส่วนเติมอากาศจะเข้าไปรวมตะกอนใหม่ เพื่อเป็นการลดการใช้แผ่นขั้วไฟฟ้า เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า และการประหยัดพื้นที่ในการบำบัด คือได้มีการรวมกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้า ถังวนตะกอนและถังตกตะกอนไว้ด้วยกัน

## 2.14 แนวคิดกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิริยาแบบอากาศยก

จากแนวคิดของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้า เช่น อะลูมิเนียม ปฏิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก (Anode) จะมีการปลดปล่อยประจุบวก ( $Al^{3+}$ ) ซึ่งทำให้ขั้วเกิดการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้า โดย  $Al^{3+}$  และคอมเพล็กซ์อื่นๆ ที่ได้ถือเป็นอ็อกซิจินของสารโคแอกกูแลนต์ จะไปล้อมรอบอนุภาคของสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ ทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคสารแขวนลอยให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่ปฏิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ และนำพาอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาการศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามักมีข้อเสียคืออายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อใช้ไปนานๆ ขั้วไฟฟ้าจะเกิดการสึกกร่อนและขั้วจะบางลงเรื่อยๆ จึงต้องเปลี่ยนแผ่นขั้วไฟฟ้าแผ่นใหม่ จึงมีการนำแนวคิดในการใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอกมาใช้ร่วมกัน เนื่องจากถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอกโดยส่วนใหญ่จะเป็นการใช้หัวเติมอากาศ เมื่อมีการเติมอากาศในส่วนที่เติมอากาศ (Riser) ของเหลวจะเกิดการยกตัว เนื่องจากก๊าซหรืออากาศที่เติมเข้าไป ของเหลวจะเกิดการยกตัวและเคลื่อนที่ ไหลวนไปยังส่วนที่ต้องการหรือส่วนที่ไม่เติมอากาศ (Downcomer) จากนั้นไหลกลับเข้าสู่ส่วนที่เติมอากาศ จากหลักการของถังปฏิริยาแบบอากาศยกจึงเป็นผลให้มีการไหลวนกลับของเหลวแล้วขึ้นตลอดเวลา จึงน่าจะมีการนำแนวคิดในการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก โดยการใช้ขั้วไฟฟ้าแทนหัวเติมอากาศ

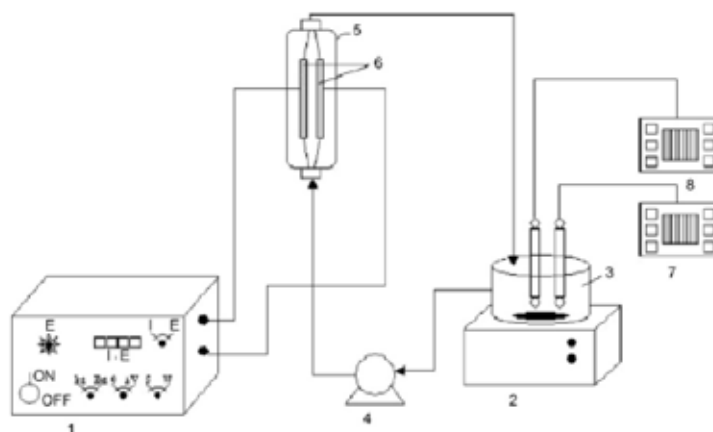
วางที่ส่วนเติมอากาศ (Riser) ให้ก๊าซไฮโดรเจนดันอนุภาคสารแขวนลอยที่รวมกลุ่มกันจากอ็อนของสารโคแอกกูแลนท์ อ็อนของสารโคแอกกูแลนท์หรือสารแขวนลอยบางส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาที่เหลือในถังปฏิกิริยามีกาโรไหลวนกลับมายังส่วนไม่เติมอากาศ (Downcomer) และวนกลับเข้าสู่ส่วนที่เติมอากาศอีกครั้งเพื่อให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น

จากแนวคิดดังกล่าว ถ้ามีการนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด จึงน่าจะได้ผลดี เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วอนุภาคของน้ำมันตัดมีความคงตัวสูง ขนาดอนุภาคเล็ก ไม่แยกเป็นชั้นน้ำมัน และสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย ถ้ามีการนำกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไฟฟ้ามาใช้ อ็อนของสารโคแอกกูแลนท์จะไปล้อมรอบอนุภาคของน้ำมันให้เกิดรวมตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ดันตัวขึ้นสู่น้ำด้วยก๊าซไฮโดรเจน และเกิดการวนกลับของของเหลวและอ็อนของสารโคแอกกูแลนท์ตามรูปแบบของถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก ซึ่งถ้ามีการวนกลับดังกล่าวก็น่าจะทำให้ลดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำให้อ็อนแตกตัวเป็นประจุลงได้ และเมื่อมีการศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศภายใต้ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก ทำให้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสก๊าซและของเหลว และนำมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินระบบที่มีประสิทธิภาพต่อไป

## 2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Bensadok และคณะ (2008)** ศึกษาการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ากับน้ำมันตัด (cutting mineral oil B22) โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม (Al alloy AU4G; 201-7Al) ขนาดยาว 100 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร และหนา 12 มิลลิเมตร เป็นขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว 20 มิลลิเมตร ปริมาตรของเหลว 1.5 ลิตร ทำการกวนตลอดเวลาที่ 250 รอบต่อนาที (rpm) ในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท แผนผังการวิจัยแสดงในภาพที่ 2-17

โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำมันร้อยละ 2 4 และ 6 มีค่าซีไอดีเริ่มต้น คือ 60282 108208 และ 116128 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่าความขุ่น 26400 51712 และ 64125 เอ็นทียู (NTU) ตามลำดับ



ภาพที่ 2-17 แผนผังของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม

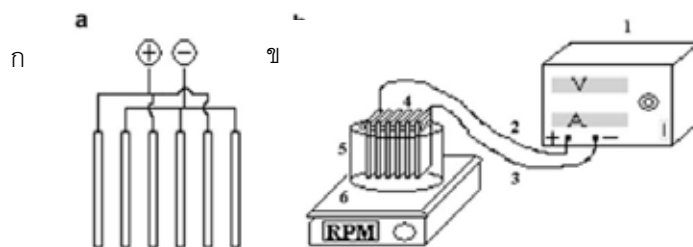
(Bensadok และคณะ, 2008)

ผลการทดลองพบว่า

1. พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ควรอยู่ที่พีเอช 7
2. เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (100 150 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น
3. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมัน (ร้อยละ 2 4 และ 6) ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันเพิ่มขึ้น

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและความขุ่น ร้อยละ 99 แต่มีข้อเสียคือ ขั้วไฟฟ้าเกิดการสึกกร่อน ต้องมีเปลี่ยนขั้วไฟฟ้า

Umran และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันพืช ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 6 แผ่น ขนาด 4 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร x 0.3 เซนติเมตร โดยการต่อวงจรแบบขนาน ดังแสดงในภาพที่ 2-18(ก) วางอยู่ตรงกลางของถังปฏิกริยา และด้านล่างของถังปฏิกริยามีการใส่แท่งแม่เหล็กเพื่อช่วยในการกวน ในถังปฏิกริยาแบบที่ละเท ปริมาณน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัด คือ 300 มิลลิลิตร ค่าซีไอดีเริ่มต้น คือ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ศึกษาผลของพีเอช ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly aluminum chloride; PAC) และปริมาณโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) เพื่อบำบัดสารอินทรีย์และซีไอดี แผนผังการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 2-18(ข)



ภาพที่ 2-18 แผนผังการทดลองโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

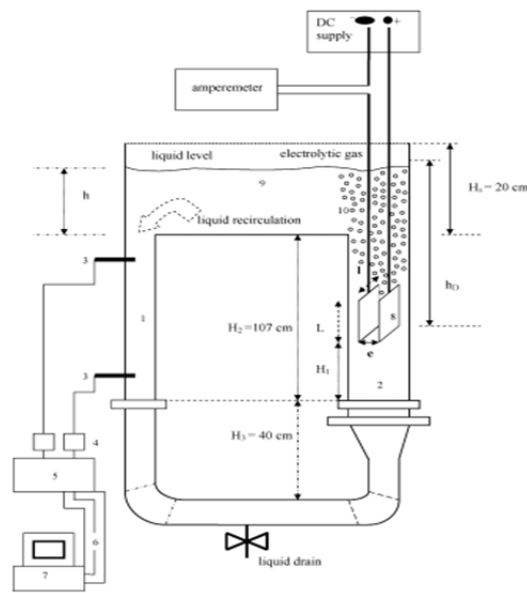
(ก) รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม และ(ข) แผนผังการทดลอง โดย 1 คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง; 2,3 คือ สายไฟเชื่อมระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ; 4 คือ แผ่นขั้วไฟฟ้า; 5 คือ ถังปฏิกิริยา; 6 คือ magnetic stirrer (Umran และคณะ, 2009)

ผลการทดลองแสดง พบว่า

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและเพิ่มปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly aluminum chloride; PAC) และโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ทำการทดลองที่พีเอช 7 โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี คือร้อยละ 98.9 เมื่อเดินระบบที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 35 มิลลิกรัมแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 90 นาที ปริมาณการใช้พลังงาน คือ 42 กิโลวัตต์. ชั่วโมงต่อกิโลกรัมซีโอดีที่กำจัดได้

Essadki และคณะ (2008) ศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมย้อม โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนและลอยตัวด้วยไฟฟ้า ในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกภายนอก เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศ คือ 94 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศ 675 มิลลิเมตร ขนาด 20 ลิตร โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมขนาด (250 มิลลิเมตร x 70 มิลลิเมตร x 1 มิลลิเมตร) เป็นขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว คือ 20 มิลลิเมตร ว่างที่ส่วนเติมอากาศ (Riser) ของถังปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2-19

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าซีโอดี คือ 2500 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5-10 โดยมีการเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) 0.1 M สภาพการนำไฟฟ้า (conductivity,  $k$ ) โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) อยู่ในช่วง 1.0-2.9 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร



ภาพที่ 2-19 แผนผังของถังสัมผัสแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก ที่ใช้ในการทดลอง  
(Essadki และคณะ, 2008)

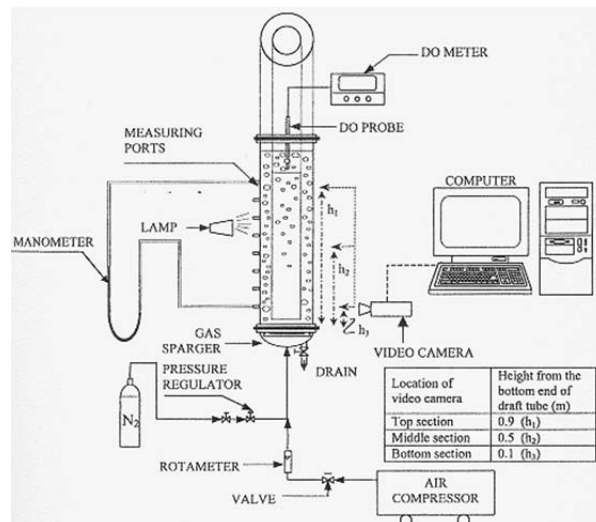
ผลการทดลองพบว่า

- ตำแหน่งที่ในการวางขั้วไฟฟ้า คือ วางที่จุดกึ่งกลางของถังปฏิกริยา ทำให้ความเร็วของของเหลวที่ใช้ในการวนกลับเร็วกว่าการวางที่ด้านล่างของถังปฏิกริยา และควรควบคุมความเร็วในส่วนไม่เติมอากาศไม่เกิน 9 เซนติเมตรต่อวินาที เพื่อไม่ให้ฟล๊อคที่่ได้เกิดการแตกตัว
  - พีเอชที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 7-8 เพื่อให้เกิดการรวมตะกอนที่ดีที่สุด เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมีประสิทธิภาพดีขึ้น
  - จากการศึกษาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (3.5 17.1 28.6 และ 34.3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) พบว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 28.6 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เหมาะกับการใช้ในการทดลองนี้ เนื่องจากได้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับการใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 34.3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และเป็นการลดประมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ด้วย
  - เวลากักเก็บน้ำเกินไปจะทำให้ฟล๊อคแตกได้
- จากการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอกนั้น สามารถบำบัดซีไอดีและบำบัดสี ได้ถึงร้อยละ 80 ซึ่งมีข้อได้เปรียบมากกว่าการทำทดลองเฉพาะการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า คือ มีการวนกลับของของเหลว เป็นผลให้มีการวนกลับของไอออนของสารโคแอกกูแลนต์



ซึ่งจะเป็นการลดการใช้ขั้วไฟฟ้า และเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของถังปฏิกริยาด้วย จากการทดลองนี้จึงน่าจะมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด ซึ่งน่าจะการลดต้นทุนในการบำบัดได้อีกทางหนึ่งด้วย

**ประเสริฐ ภาสันต์ (2545)** ศึกษาการกระจายตัวของฟองก๊าซในถังสัสมัดส์แบบอากาศยก โดยใช้ถังสัสมัดส์แบบอากาศยกที่มีลักษณะเป็นท่อสองชั้นซ้อนกัน ท่อด้านนอกทำจากพลาสติกใส (อะคริลิก) ความสูง 1.2 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.137 เมตร ท่อภายใน (draft tube) ทำจากพลาสติกใสเช่นกัน ความสูง 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.093 0.0735 และ 0.034 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-20



ภาพที่ 2-20 แผนผังของถังสัสมัดส์แบบอากาศยกที่ใช้ในการทดลอง (ประเสริฐ ภาสันต์, 2545)

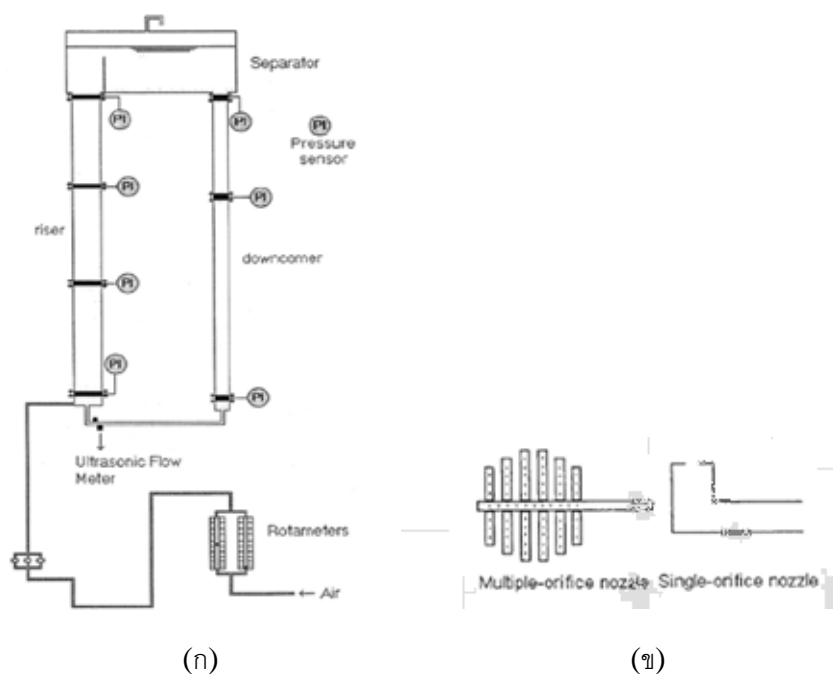
ผลการทดลองพบว่า

1. เมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซในระบบจะทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลง และทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศจากการกระจายตัวแบบปกติ เป็นการกระจายตัวแบบลอกปกติ (Log-normal)
2. ขนาดของฟองอากาศจะเล็กลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นของถังสัสมัดส์ และที่ความเร็วของก๊าซสูงๆ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของส่วนไม่เต็มอากาศและส่วนเต็มอากาศจะทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง

3. ตัวกระจายก๊าซที่มีจำนวนรูมากจะทำให้ฟองอากาศมีขนาดเฉลี่ยใหญ่ขึ้น ในขณะที่ตัวกระจายอากาศที่มีจำนวนรูน้อยๆ จะทำให้มีการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศค่อนข้างกว้าง

งานวิจัยฉบับนี้แสดงให้เห็นว่าข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของฟองอากาศสามารถนำไปใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสก๊าซและของเหลวได้ โดยสามารถแยกวิเคราะห์ระหว่างผลของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารได้ และพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวจะมีบทบาทสำคัญในการกำหนดค่าอัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

**Camarasa และคณะ (2001)** ศึกษาแบบจำลองของค่าทางอุทกพลศาสตร์ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก โดยส่วนที่เติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศของถังปฏิกรณ์ทำจากแก้ว เส้นผ่านศูนย์กลางคือ 23 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร มีความสูง 3.5 เมตร ส่วนที่เกิดการแยกตัวด้านบนของถังปฏิกรณ์ทำจากเหล็กกล้า สูง 0.9 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-21(ก) หัวเติมอากาศเป็นแบบ single-orifice nozzle (เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) และ two multiple-orifice sparkers ดังแสดงในภาพที่ 2-21(ข)



ภาพที่ 2-21 (ก) รูปแบบถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่ใช้ในการทดลอง  
(ข) หัวเติมอากาศที่ใช้ในการทดลอง (Camarasa และคณะ, 2001)

เมื่อใช้วิธีมานอเมตริก (Manometric method) วัดสัดส่วนของก๊าซเฉื่อยและสัดส่วนของก๊าซในส่วนต่างๆ ของส่วนเติมอากาศ โดยที่ไม่สนใจการเสียดสีกับผนังของถังปฏิกรณ์ และกำหนดความหนาแน่นของก๊าซน้อยกว่าความหนาแน่นของของเหลวมากๆ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนของก๊าซ ได้ดังนี้

$$\varepsilon_G = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_L \cdot g \cdot \Delta h} \quad (2-66)$$

- เมื่อ  $\varepsilon_G$  : สัดส่วนของก๊าซ (gas holdup)  
 $\rho_L$  : ความหนาแน่นของของเหลว, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
 $\Delta P$  : ผลต่างของความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างตัวจับสัญญาณ 2 ตัว, พาสคาล (Pa)  
 $\Delta h$  : ความดันที่วัดได้จาก wall piezo-resistive sensors  
 $g$  : ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 ตารางเมตรต่อวินาที

สมการคำนวณความดัน ของการไหลของของเหลวและการยกตัวของก๊าซ แสดงในสมการดังนี้

$$P(z) = P^* + \int_z^{H_R} \rho_L \cdot g \cdot (1 - \varepsilon_G) \cdot dz + \int_z^{H_R} \frac{2 \cdot f \cdot \rho_L \cdot U_L^2}{D} \cdot \Phi_L^2 \cdot dz \quad (2-67)$$

- เมื่อ  $P^*$  : ความดันด้านบนในส่วนที่มีการแยกตัว, พาสคาล (Pa)  
 $H_R$  : ความสูงของการกระจายของเฟสก๊าซ-ของเหลว, เมตร  
 $f$  : ปัจจัยแรงเสียดทาน (friction factor)  
 $\Phi_L^2$  : two-phase friction multiplier  
 $D$  : เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์

ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของก๊าซและความเร็วของของเหลว แสดงได้จากโมเดลดีฟท์ฟลักซ์ (drift-flux model) (Zuber และ Findlay, 1965)

$$\frac{U_G}{\varepsilon_G} = C_0 \cdot (U_G + U_L) + C_1 \quad (2-68)$$

- เมื่อ  $C_0$  : ค่าการกระจาย (distribution parameter)  
 $C_1$  : ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของเหลว

ค่า  $C_0$  ที่ได้จากสารละลายบิวทานอล (water/butanol medium) มีค่าเท่ากับ 1.44, 1.34, 1.23 เมื่ออยู่ใน single orifice nozzle, multiple-orifice nozzle 1 ตัว และ multiple-orifice nozzle 2 ตัว และค่าคงที่  $C_1$  เท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที

สมการคำนวณความดัน ของการกระจายของของเหลว คำนวณได้ดังนี้

$$P_{dist} = \rho_L \cdot g \cdot H_R \cdot (1 - \epsilon_{GD}) - K \cdot \rho_L \cdot Q_L^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot v_{L,dist}^2 \quad (2-69)$$

- เมื่อ  $P^*$  : ความดัน ในส่วนเติมอากาศที่อยู่ใต้ชั้นกระจาย, พาสคาล (Pa)  
 $\epsilon_{GD}$  : สัดส่วนของก๊าซในส่วนไม่เติมอากาศ  
 $v_{L,dist}^2$  : ความเร็วในของของเหลวในส่วนเติมอากาศที่อยู่ใต้ชั้นกระจาย, เมตรต่อวินาที  
 $K$  : สัมประสิทธิ์การสูญเสียในส่วนไม่เติมอากาศ (downcomer loss coefficient)  
 $Q_L$  : อัตราการไหลของของเหลว, ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

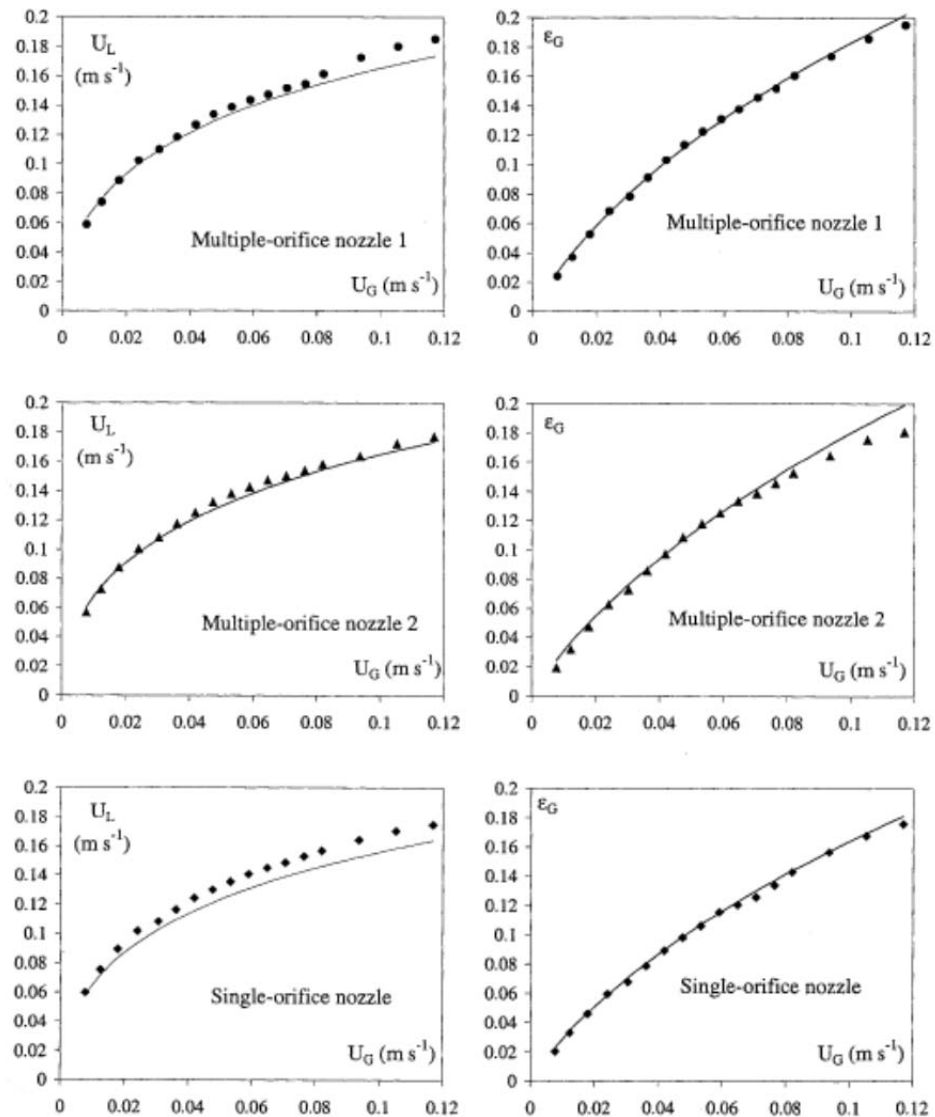
เมื่อทราบค่า  $H_R$ ,  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $K$  และ  $\epsilon_{GD}$  แล้วแทนค่าในแบบจำลองของค่าทางอุทกพลศาสตร์ ก็จะสามารถวิเคราะห์ผลของการเคลื่อนที่ของของเหลว ความดัน ความเร็วของก๊าซ และ gas holdup ในส่วนเติมอากาศได้

สมการคำนวณขนาดของฟองอากาศ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{6\epsilon_G}{D_{eq}} \quad (2-71)$$

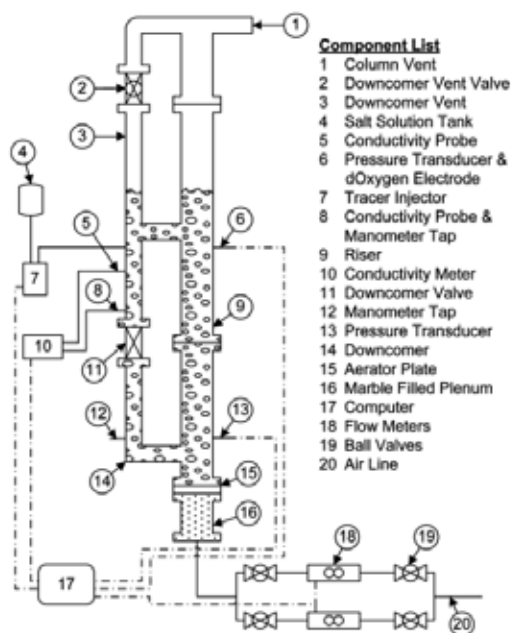
- เมื่อ  $a$  : พื้นที่ผิวจำเพาะ (interfacial area), ต่อเมตร ( $m^{-1}$ )  
 $D_{eq}$  : ขนาดฟองอากาศเทียบเท่า (equivalent bubble diameter), เมตร

ผลการทดลองพบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-22 เปรียบเทียบแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลอง  
(Camarasa และคณะ, 2001)

Jones และ Heindel (2010) ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิบัติการแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก โดยมีการดัดแปลงส่วนไม่เต็มอากาศ โดยถังปฏิบัติการแบบอากาศยกภายนอก เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ คือ 100 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ 130 มิลลิเมตร โดยอัตราส่วนไม่เต็มอากาศและส่วนเต็มอากาศ คือ 1:16 โดยควบคุมให้ความเร็วก๊าซในส่วนไม่เต็มอากาศ อยู่ระหว่าง 0.5-20 เซนติเมตรต่อวินาที ใช้แผ่นเต็มอากาศ ที่มีพื้นที่เต็มอากาศ ร้อยละ 0.62 0.99 และ 2.22 แผนผังการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 2-23

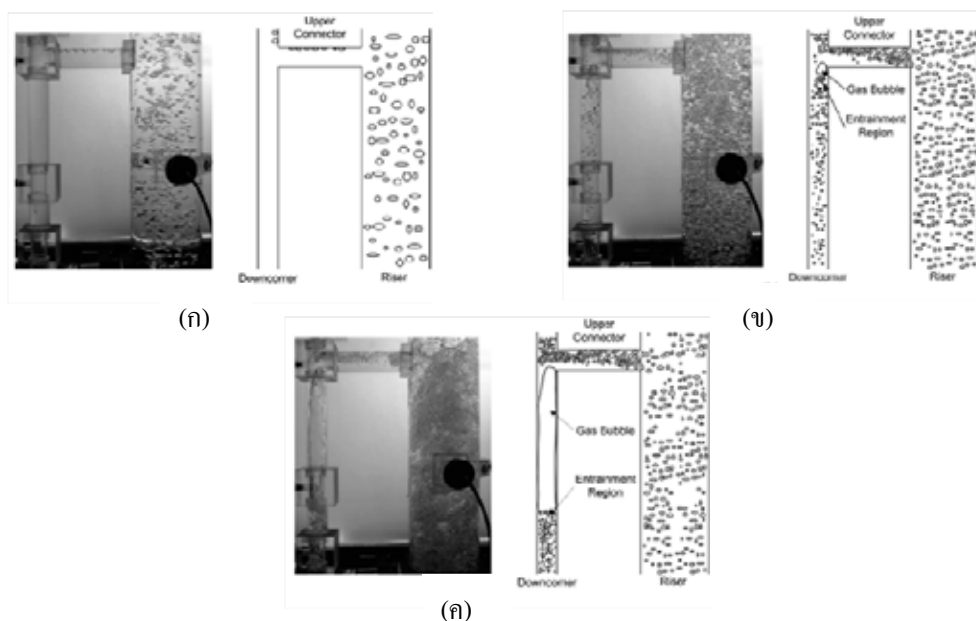


ภาพที่ 2-23 แผนผังของถังผสมแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก มีการดัดแปลงส่วนไม่เต็มอากาศ ที่ใช้ในการทดลอง (Jones และ Heindel, 2010)

ผลการทดลองพบว่า

1. สัดส่วนของก๊าซ (gas holdup) ในส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซ สัดส่วนของก๊าซส่วนที่เต็มอากาศคล้ายกับสัดส่วนของก๊าซในส่วนที่ไม่เต็มอากาศ

2. ความเร็วของก๊าซน้อยๆ จะไม่มีฟองก๊าซอยู่ในส่วนไม่เต็มอากาศ แต่จะมีก๊าซบางส่วนอยู่ด้านบนส่วนที่เชื่อมระหว่างส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจะมีฟองก๊าซขนาดเล็กบางส่วนไหลผ่านส่วนไม่เต็มอากาศ และเมื่อความเร็วของก๊าซเท่ากับ 3.5 เซนติเมตรต่อวินาที จะเริ่มมีการรวมตัวของฟองก๊าซให้มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าความเร็วก๊าซมากกว่า 10 เซนติเมตรต่อวินาที ฟองก๊าซจะใหญ่ขึ้นจนเต็มพื้นที่หน้าตัดของส่วนไม่เต็มอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2-24



ภาพที่ 2-24 ตำแหน่งฟองอากาศในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก เมื่อมีการเปิดท่ออากาศในส่วนไม่เต็มอากาศ (open vent; OV mode) (ก) ความเร็วก๊าซ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วก๊าซ เท่ากับ 3.5 เซนติเมตรต่อวินาที (ค) ความเร็วก๊าซ เท่ากับ 20 เซนติเมตรต่อวินาที (Jones และ Heindel, 2010)

**ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา (2552)** ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์ โดยทำการศึกษาและนำเสนอโมเดลเพื่อทำนายประสิทธิภาพของแนวทางการบำบัดแบบผสมระหว่างกระบวนการโคอะเลสเซอร์และกระบวนการตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่อยู่ในรูปอิมัลชัน ตลอดจนทำการศึกษาผลกระทบของความสูงชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส และผลของความเร็วในการไหลของน้ำเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยพิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (ทีไอซี) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย โดยใช้น้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร

ผลการศึกษา พบว่า ความสูงของตัวกลางและความเร็วของน้ำเสีย มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดอิมัลชันของกระบวนการบำบัดแบบผสม โดยค่าตัวแปรประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการกระทบ การเกาะติด และการตกตะกอนสามารถประยุกต์ใช้ในโมเดลเพื่อทำนายประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบจากการลดลงของพื้นที่ได้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 25

**Essadki และคณะ (2011)** ศึกษาฟังก์ชันการกระจายเรซินเดนซีท์ใหม่ ภายในถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก ขนาด 20 ลิตร โดยทำการศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของการไหลวนของฟองอากาศที่เกิดจากปฏิริยาอิเล็กโทรไลซิสของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

ผลการทดลองพบว่า ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ ( $U_{LD}$ ) ลดลงเมื่อปริมาณของก๊าซเพิ่มขึ้น ( $0 < Q_L < 2$  ลิตรต่อนาที) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และตำแหน่งของหัวอิเล็กโทรดมีผลต่อ ค่าเพคเลต ( $Pe$ ) ในส่วนไม่เติมอากาศ

ความเร็วของของเหลวในส่วนเติมอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเพคเลต ( $Pe$ ) ลดลง จึงเป็นผลให้เกิดการกระจายตามแนวแกนท่อเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการปั่นป่วนในส่วนที่เกิดการแยก (Separator zone) ของของเหลวเพิ่มขึ้น

**Harif และคณะ (2012)** ทำการเปรียบเทียบกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและกระบวนการการโคแอกกูแลชั่นที่มีการเติมสารเคมี โดยทำการศึกษากลไกการเกิดกระบวนการโคแอกกูแลชั่นและฟล็อกคูแลชั่นและลักษณะของฟล็อกที่เกิดขึ้น โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนคาโอลิน ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่า ทั้งสองกระบวนการสามารถนำมาใช้ในการบำบัดอนุภาคคอลลอยด์ได้แตกต่างกันในส่วนองวิธีการให้สารโคแอกกูแลนท์ และจากการศึกษาผลของพีเอชที่เปลี่ยนแปลงพบว่า การใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าทำให้พีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิริยาอิเล็กโทรไลซิส ส่วนในกรณีการใช้สารเคมีทำให้พีเอชของน้ำลดลง และฟล็อกที่เกิดขึ้นจากทั้งสองกระบวนการ คือ ฟล็อกของ  $Kaolin-Al(OH)_3$

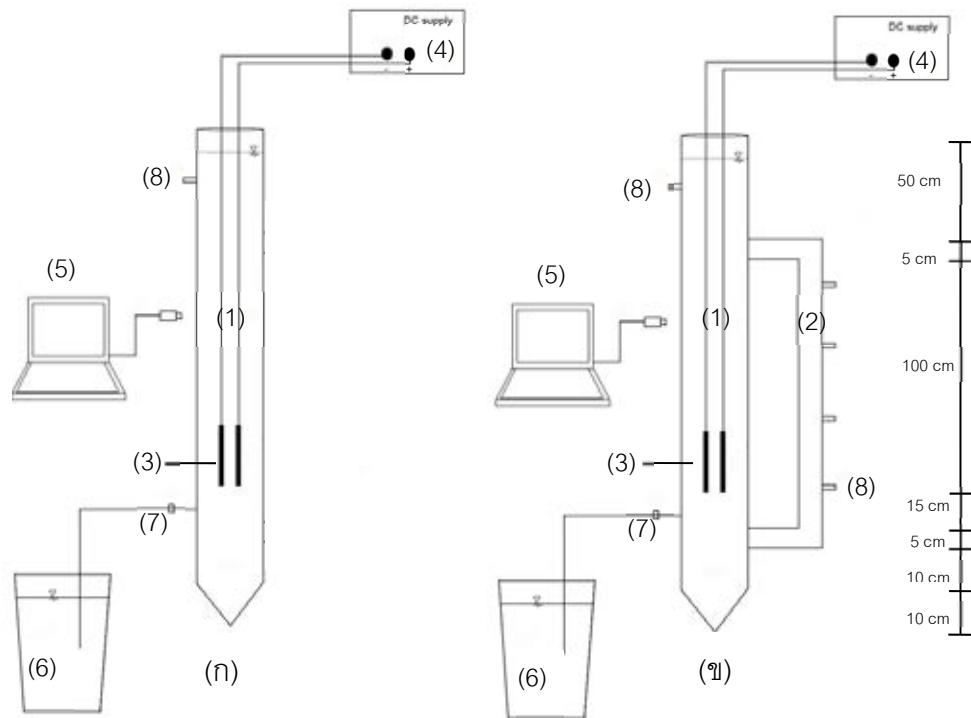
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง จะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการศึกษาเฉพาะกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า หรือศึกษาเฉพาะในถังปฏิริยาแบบอากาศยก หรือถ้ามีการศึกษาร่วมกันระหว่างกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและถังปฏิริยาแบบอากาศยก แต่ก็ยังไม่มีการศึกษาเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด รวมถึงยังไม่มีการศึกษาทางด้านอุทกพลศาสตร์ การกระจายตัวของฟองก๊าซในถังปฏิริยาแบบอากาศยกของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยกเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีประสิทธิภาพ ลดต้นทุน และใช้เวลาในการเดินระบบน้อย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป



### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง



- |                                                  |                             |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| (1) ส่วนเติมอากาศ (Riser)                        | (5) กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง |
| (2) ส่วนไม่เติมอากาศ (Downcomer)                 | (6) ชุดเตรียมน้ำตัวอย่าง    |
| (3) ขั้วไฟฟ้า                                    | (7) ท่อน้ำเข้า              |
| (4) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) | (8) ท่อน้ำออก               |

ภาพที่ 3-1 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (ก) และแบบอากาศยก (ข)

ถังปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า มี 2 รูปแบบ คือ

1. ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ทำจากอะคริลิกใส โดยส่วนเติมอากาศ (riser) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.4 เซนติเมตร สูง 195 เซนติเมตร และวางขั้วไฟฟ้าในส่วนเติมอากาศเหนือก้นถังปฏิกริยา 30 เซนติเมตร

2. ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก ทำจากอะคริลิกใส โดยส่วนเติมอากาศ (riser) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.4 เซนติเมตร สูง 195 เซนติเมตร เชื่อมต่อกับส่วนไม่เติมอากาศ (downcomer) ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างส่วนเติมอากาศและไม่เติมอากาศ คือ 20 เซนติเมตร (Essadki และคณะ, 2008) และวางขั้วไฟฟ้าในส่วนเติมอากาศ เหนือกันถังปฏิกริยา 30 เซนติเมตร

### 3.1.2 วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) (แสดงดังภาพที่ 3-1)
2. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากอะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์ ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกริยา 100 ตารางเซนติเมตร
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรงให้ความต่างศักย์สูงสุด 60 โวลต์
4. เครื่องวัดความขุ่น ยี่ห้อ Loviond รุ่น TurbiCheck
5. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible pump) ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 2500 ลิตรต่อชั่วโมง บริษัท JUN aquarium equipment รุ่น HX-4500
6. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 25 ลิตร/ชั่วโมง บริษัท New-Flow Technologies, INC
7. ถังเก็บน้ำพลาสติกขนาด 60 และ 80 ลิตร
8. นาฬิกาจับเวลา บริษัท KADIO รุ่น KD-2015
9. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล บริษัท Nikon รุ่น Coolpix L18
10. กล้องจุลทรรศน์ บริษัท Nikon รุ่น YS2-H
11. เครื่องวัดค่าพีเอช บริษัท Scientific Promotion รุ่น CG840
12. เครื่องมือถ่ายภาพ (High speed camera) ยี่ห้อ BASLER A602f-2
13. ไม้บรรทัด
14. ชุดทดสอบบิวเทสต์
15. อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี

- หลอดทดสอบวัดค่าซีไอดี ขนาด 16x150 มม. พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene, TFE)
- ตู้อบ (Hot air oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED/FD
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร
- กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- ปิเปต (Pipet) ขนาด 1 5 10 และ 25 มิลลิลิตร

### 3.1.3 สารเคมี

1. น้ำมันตัด (cutting oil); Castrol Cooledge ® BI บริษัท Castrol
2. สารละลายมาตรฐาน Potassium Dichromate Digestion
3. สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulphate
4. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid,  $H_2SO_4$ ) บริษัท J.T. Baker
5. เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride,  $FeCl_3$ ) บริษัท Carlo Erba
6. สารส้ม (Alum,  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) บริษัท Carlo Erba

โดยที่ลักษณะสมบัติของน้ำมันตัด (Cutting oil); Castrol Cooledge BI ที่ใช้ใน  
งานวิจัย แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ลักษณะสมบัติของน้ำมันตัด; Castrol Cooledge ® BI

จากฉลากผลิตภัณฑ์แสดงดังนี้

ชื่อทางเคมี: น้ำมันแร่, สารเพิ่มคุณภาพและสารอิมัลซิฟายเออร์

ส่วนประกอบ: น้ำมันแร่, สารเพิ่มคุณภาพ และสารอิมัลซิฟายเออร์

ค่าความหนืด ที่ 20 องศาเซลเซียส	0.935
พีเอชของสารละลายที่ 5 องศาเซลเซียส	10
Specific Gravity ที่ 15 องศาเซลเซียส	0.950
Kinematic Viscosity ที่ 40 องศาเซลเซียส	38.45
Flash Point (PMCC), องศาเซลเซียส	70
Pour Point, องศาเซลเซียส	-12

### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเลียนแบบน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำมันตัด Castrol Cooledge BI (มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว) ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) ทำการปั่นกวนน้ำตัวอย่างที่ 125 รอบ/นาที นาน 5 นาที เพื่อนำไปใช้สำหรับการทดลอง ในการศึกษาแบ่งเป็น 6 ส่วน คือ

การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเพื่อหาขนาดคุณสมบัติเริ่มต้น

การทดลองที่ 2 การศึกษาความสามารถในการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์ โดยนำน้ำเสียมาทำการเติมสารส้มและเพอร์ริคโครไรต์ (สารโคแอกกูแลนต์) ที่พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น 3-12 และความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์ 40 60 70 80 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนเร็วและกวนช้า วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดี

การทดลองที่ 3 การศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ โดยเดินระบบแบบทีละเท ศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ ชนิดขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (1 2 และ 4 เซนติเมตร) และจำนวนขั้วไฟฟ้า (2 และ 4 แผ่น) ที่เหมาะสม วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น และพีเอชที่เปลี่ยนแปลง

การทดลองที่ 4 การศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก โดยเดินระบบแบบทีละเท โดยนำสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองข้างต้นมาศึกษาระดับน้ำด้านบนเหนือส่วนไม่เติมอากาศ (0 10 และ 20 เซนติเมตร) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น และพีเอชที่เปลี่ยนแปลง

การทดลองที่ 5 เปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ (25 50 75 100 และ 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น พีเอชที่เปลี่ยนแปลง ความหนาของชั้นตะกอนด้านบน ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

การทดลองที่ 6 การศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและเฟสของเหลวในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

การทดลองที่ 7 การศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องของถังปฏิริยาแบบอากาศยก โดยพิจารณาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเข้า รูปแบบการไหลภายในถังปฏิริยา ประสิทธิภาพในการบำบัด รวมถึงเสนอแนวทางการออกแบบ และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

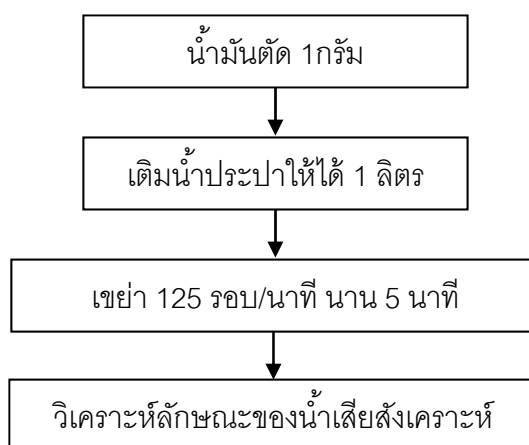
### 3.2.1 ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียสังเคราะห์

#### การทดลองที่ 1.1: ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของอนุภาคน้ำมัน ค่าความหนืด (Viscosity) และค่าซีไอดีเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-2 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	1. น้ำประปา
2. ชนิดของน้ำมัน	2. น้ำมันตัด
3. ความเข้มข้นของน้ำมันตัด	3. 1 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	1. เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค
2. คุณภาพน้ำ	2. ค่าซีไอดี ความขุ่น ปริมาณของแข็งละลาย
3. ปริมาณน้ำมัน	3. ปริมาณน้ำมัน
4. พีเอช	4. พีเอช



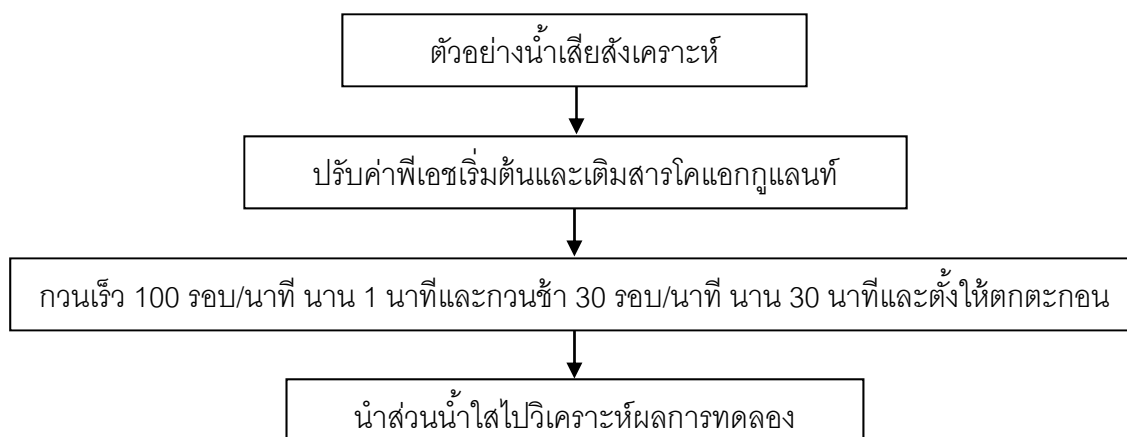
ภาพที่ 3-2 แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

### 3.2.2 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยการทำลายเสถียรภาพ

**การทดลองที่ 2.1:** ศึกษาผลของค่าพีเอชและปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม นำน้ำเสียสังเคราะห์ใส่ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 4 5 6 7 8 9 10 11 และ 12 โดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ ใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เป็น โคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 40 60 70 80 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนเร็ว 100 รอบ/นาที นาน 1 นาทีและกวนช้า 30 รอบ/นาที นาน 30 นาทีและตั้งให้ตกตะกอน 30 นาที นำน้ำเสียส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าซีไอดี และความขุ่น โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-3 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยวิธีจาร์เทสต์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมันตัด	1. 1 กรัม/ลิตร
2. ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง	2. 1 ลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าพีเอช	1. 3-12
2. ชนิดโคแอกกูแลนต์	2. สารส้ม เฟอร์ริกคลอไรด์
3. ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์	3. 40 60 70 80 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำ	1. ค่าซีไอดี ความขุ่น ปริมาณของแข็งละลาย
2. พีเอช	2. พีเอช



ภาพที่ 3-3 แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ

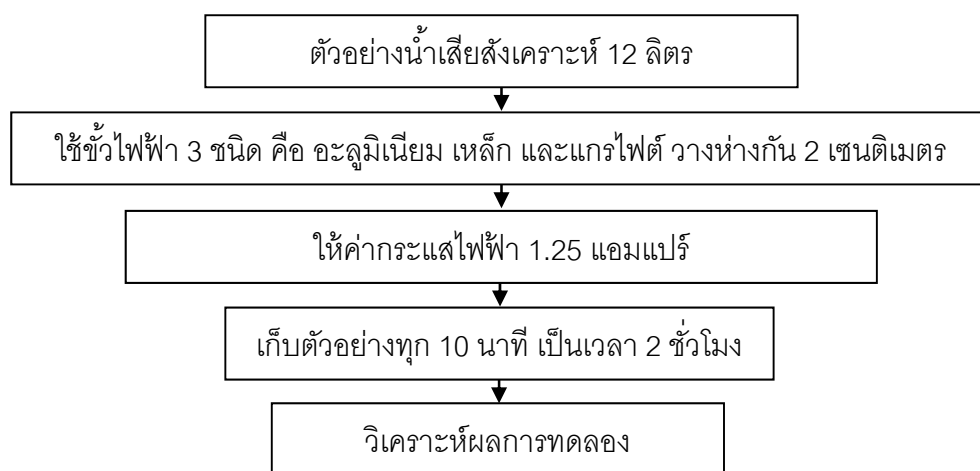
### 3.2.3 ศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

#### การทดลองที่ 3.1: การศึกษาหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

นำน้ำเสียสังเคราะห์มาศึกษาหาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยทำการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม เหล็ก-เหล็ก และแกรไฟต์-แกรไฟต์ ที่มีความกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร โดยจมน้ำ ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 2 เซนติเมตร วางขั้วไฟฟ้าในส่วนเดิมอากาศเหนือถังถึงปฏิกรณ์ 30 เซนติเมตร ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-4 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาชนิดขั้วไฟฟ้า

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	1. 1 กรัม/ลิตร 2. 12 ลิตร 3. 2 เซนติเมตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดขั้วไฟฟ้า 2. ค่ากระแสไฟฟ้า	1. อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์ 2. 1.25 แอมแปร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำ 2. พีเอช	1. ค่าความขุ่น 2. พีเอช

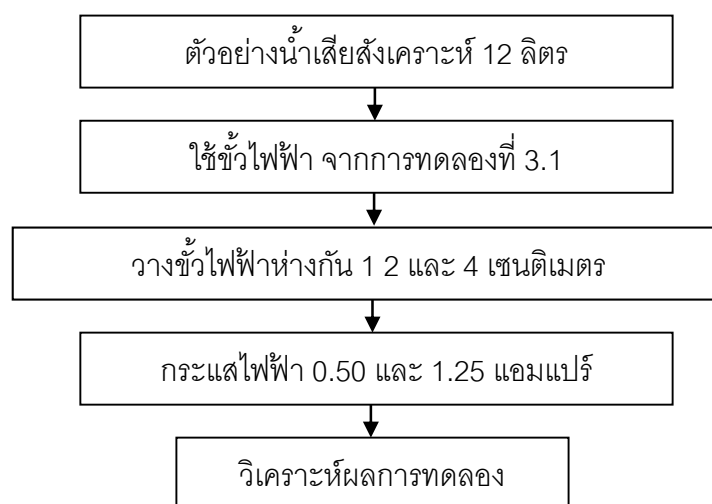


รูปที่ 3-4 แผนผังการหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

### การทดลองที่ 3.2: ศึกษาหาระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ทำการศึกษาเพื่อหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ภายในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการทางไฟฟ้า โดยทำการศึกษาที่ 1 2 และ 4 เซนติเมตร ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.50 และ 1.25 แอมแปร์ ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-5 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-5 ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 1 กรัม/ลิตร
2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง	2. 12 ลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดขั้วไฟฟ้า	1. จากการทดลองที่ 3.1
2. ค่ากระแสไฟฟ้า	2. 0.50 และ 1.25 แอมแปร์
3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	3. 1 2 และ 4 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำ	1. ค่าความขุ่น



ภาพที่ 3-5 แผนผังการหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

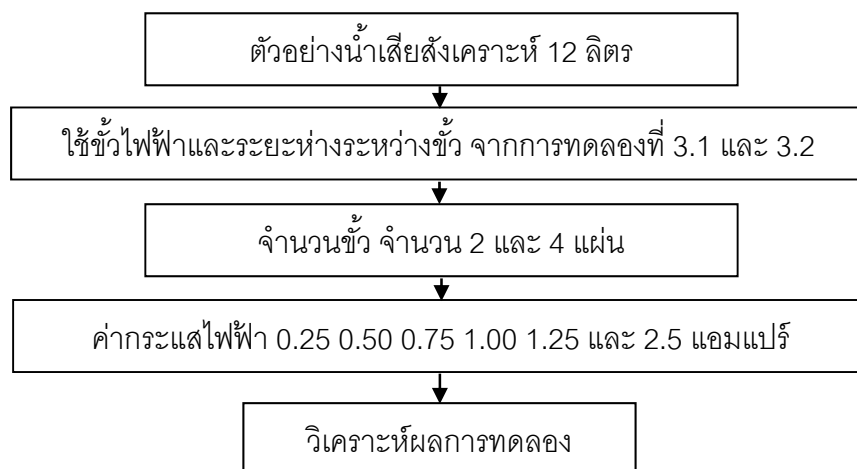


### การทดลองที่ 3.3: ศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้า

ทำการศึกษาผลของจำนวนขั้วและลักษณะการต่อขั้วแบบขนานที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการทางไฟฟ้า ภายในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ โดยทำการศึกษาจำนวนขั้ว จำนวน 2 และ 4 แผ่น โดยใช้ขั้วไฟฟ้าและระยะห่างของขั้วไฟฟ้าจากการทดลองที่ 3.1 และ 3.2 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ (สำหรับขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น) และ ค่ากระแสไฟฟ้า 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 และ 2.50 แอมแปร์ (สำหรับขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 แผ่น) ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-6 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 1 กรัม/ลิตร
2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง	2. 12 ลิตร
3. ชนิดขั้วไฟฟ้า	3. ขั้วที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1
4. ระยะห่างระหว่างขั้ว	4. จากการทดลองที่ 3.2
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. จำนวนขั้วไฟฟ้า	1. 2 และ 4 แผ่น
2. ค่ากระแสไฟฟ้า	2. 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 และ 2.5 แอมแปร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำ	1. ค่าความขุ่น
2. พีเอช	2. พีเอช



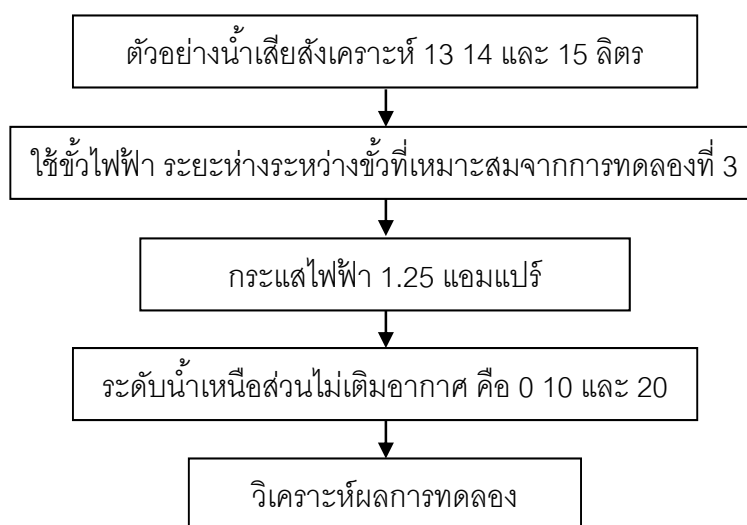
ภาพที่ 3-6 แผนผังการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

### 3.2.4 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก

#### การทดลองที่ 4.1: ระดับน้ำเหนือส่วนไม่เต็มอากาศ

นำน้ำเสียสังเคราะห์มาศึกษาหาตำแหน่งของระดับน้ำเหนือส่วนไม่เต็มอากาศที่เหมาะสม โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว จำนวนขั้วไฟฟ้า ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 และใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ เดินระบบในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-7 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-7 ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการศึกษาระดับน้ำด้านบนถังปฏิกริยา

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ชนิดและจำนวนขั้วไฟฟ้า 3. กระแสไฟฟ้า	1. 1 กรัม/ลิตร 2. ขั้วที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1-3.3 3. 1.25 แอมแปร์
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ระดับน้ำเหนือส่วนไม่เต็มอากาศ 2. ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์	1. 0 10 และ 20 เซนติเมตร 2. 13 14 และ 15 ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำ 2. พีเอช	1. ค่าความขุ่น 2. พีเอช



ภาพที่ 3-7 แผนผังการหาระดับน้ำด้านบนถังปฏิกริยา

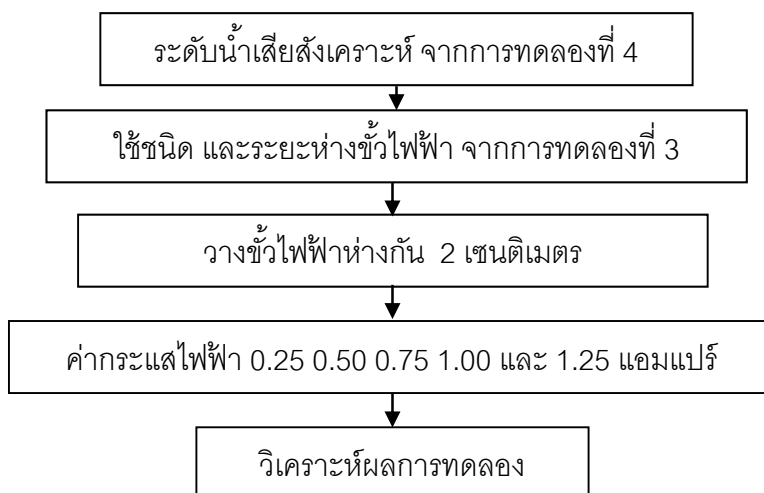
### 3.2.5 การเปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

#### การทดลองที่ 5.1: ศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้า

ทำการศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้า 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ โดยใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้า ระยะห่าง และจำนวนของขั้วไฟฟ้าจากการทดลองที่ 3 และระดับน้ำด้านบนถังปฏิกริยาจากการทดลองที่ 4 เดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-8 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรในการเปรียบเทียบถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความเข้มข้นของน้ำมัน</li> <li>2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง</li> <li>3. ชนิดและระยะห่างขั้วไฟฟ้า</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 1 กรัม/ลิตร</li> <li>2. จากการทดลองที่ 4</li> <li>3. จากการทดลองที่ 3</li> </ol>
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ค่ากระแสไฟฟ้า</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 แอมแปร์</li> </ol>
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. คุณภาพของน้ำ</li> <li>2. พีเอช</li> <li>2. ความหนาของชั้นน้ำมันและตะกอนด้านล่าง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ค่าซีไอดี ความขุ่น ปริมาณของแข็งละลาย อุณหภูมิ</li> <li>2. พีเอช</li> <li>3. ความหนาของชั้นน้ำมันและตะกอนด้านล่าง</li> </ol>

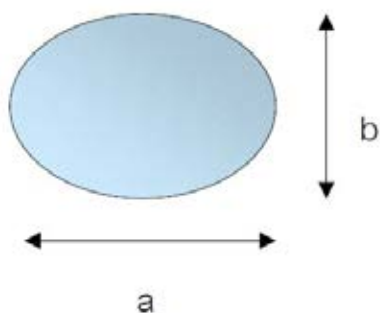


ภาพที่ 3-8 แผนผังการเปรียบเทียบถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

### 3.2.6 การศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

การทดลองที่ 6.1: การศึกษาขนาดฟองอากาศและพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ  
การวัดขนาดฟองอากาศ ( $d_B$ )

เก็บภาพ (100-150 ฟอง) ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงความเร็ว 100 ภาพต่อวินาที (Basler high speed camera) และวัดขนาดด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพถ่าย และคำนวณขนาดฟองจากสมการ



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

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

- เมื่อ  $a$  : แกนเอกของวงรี  
 $B$  : แกนโทของวงรี  
 $d_{Bi}$  : ขนาดฟองอากาศเทียบเท่า (equivalent size of bubble)

การหาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area,  $a$ )

ทำได้โดยการนำค่าขนาดของฟองอากาศที่วัดได้มาคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจากสมการ

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

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} \quad (3-4)$$

$$S_B = \pi d_B^2 \quad (3-5)$$

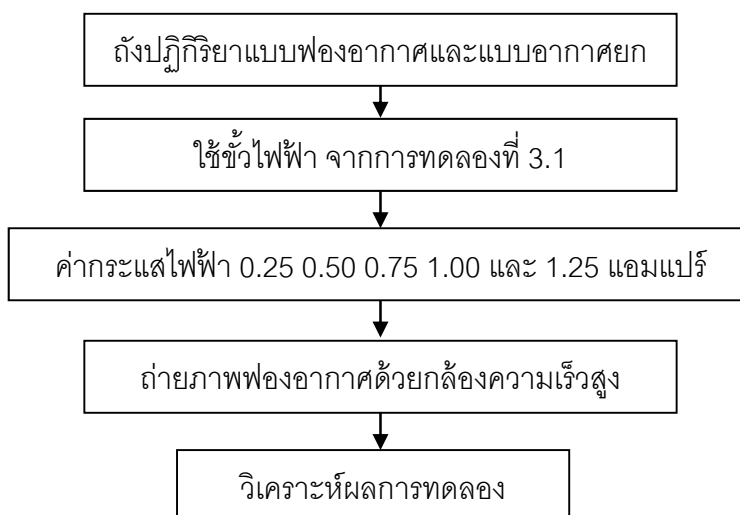
- เมื่อ  $a$  : พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (interfacial area), ต่อเมตร  
 $N_B$  : จำนวนฟองที่เกิด (number of bubbles generated)  
 $S_B$  : พื้นผิวของฟองอากาศ 1 ฟอง (single bubble surface area), ตารางเมตร  
 $V_{TOTAL}$  : ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ทั้งหมด (total volume in reactor), ลูกบาศก์เมตร  
 $f_B$  : ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency), ต่อวินาที

- $H_L$  : ความสูงของของเหลว (liquid height), เมตร  
 $U_B$  : ความเร็วที่เกิดฟอง (bubble rising velocity), เมตรต่อวินาที  
 $d_B$  : เส้นผ่านศูนย์กลางฟอง (bubble diameter), เมตร

ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-9 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	1. น้ำประปา
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ถึงปฏิบัติการ 2. ชนิดขั้วไฟฟ้า 3. ค่ากระแสไฟฟ้า	1. แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก 2. จากการทดลองที่ 3.1 3. 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 แอมแปร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ขนาดฟองอากาศ 2. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ	1. ขนาดฟองอากาศ 2. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ



ภาพที่ 3-9 แผนผังการศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

### การทดลองที่ 6.2: การศึกษาความเร็วของของเหลวในถังปฏิริยาแบบอากาศยก

การวัดความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ ทำโดยการฉีดสีที่จุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง แล้วจับเวลาที่สีเดินทางระหว่าง 2 จุด ( $t_d$ ) ซึ่งความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศหาได้จากสมการ

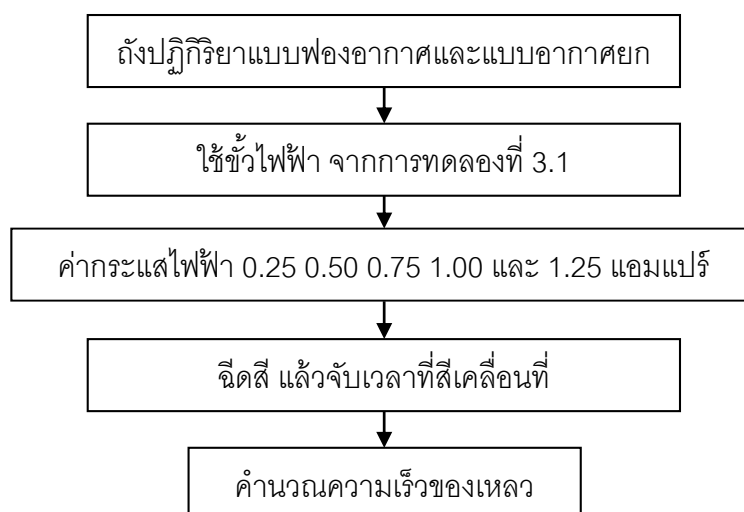
$$v_{Ld} = \frac{L_d}{t_d} \quad (3-6)$$

โดยที่  $L_d$  คือระยะทางที่สีเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในส่วนไม่เต็มอากาศของถังปฏิริยาแบบอากาศยก

ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-10 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 ตัวแปรในการศึกษาความเร็วของของเหลวในถังปฏิริยาแบบอากาศยก

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ 2. ชนิดขั้วไฟฟ้า	1. น้ำประปา 2. จากการทดลองที่ 3.1
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ถังปฏิริยา 2. ค่ากระแสไฟฟ้า	1. แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก 2. 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 แอมแปร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ความเร็วของของเหลว	1. ความเร็วของของเหลว



ภาพที่ 3-10 แผนผังการศึกษาความเร็วของของเหลวในถังปฏิริยาแบบอากาศยก

### 3.2.7 การศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องของถังปฏิบัติการแบบอากาศยก

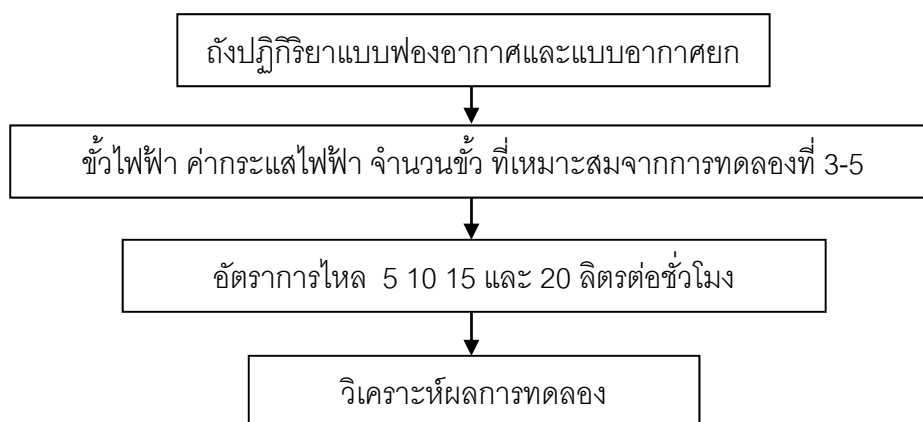
#### การทดลองที่ 7.1: การศึกษาพิจารณาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเข้า

เฉพาะส่วนเติมอากาศ

นำน้ำเสียสังเคราะห์มาศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเข้าเฉพาะส่วนเติมอากาศ ที่อัตราการไหลของน้ำเข้า ที่ 5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า จำนวนขั้ว และปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 และ 4 ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-11 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 ตัวแปรในการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเข้าเฉพาะส่วนเติมอากาศ

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ชนิดและจำนวนขั้วไฟฟ้า 3. กระแสไฟฟ้า	1. 1 กรัม/ลิตร 2. จากการทดลองที่ 3 3. จากการทดลองที่ 5
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ถังปฏิบัติการ 2. อัตราการไหลของน้ำเข้า	1. แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก 2. 5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำ 2. ความหนาของชั้นน้ำมันและตะกอนด้านล่าง	1. ค่าซีไอดี ความขุ่น พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งละลาย 2. ความหนาของชั้นน้ำมันและตะกอนด้านล่าง



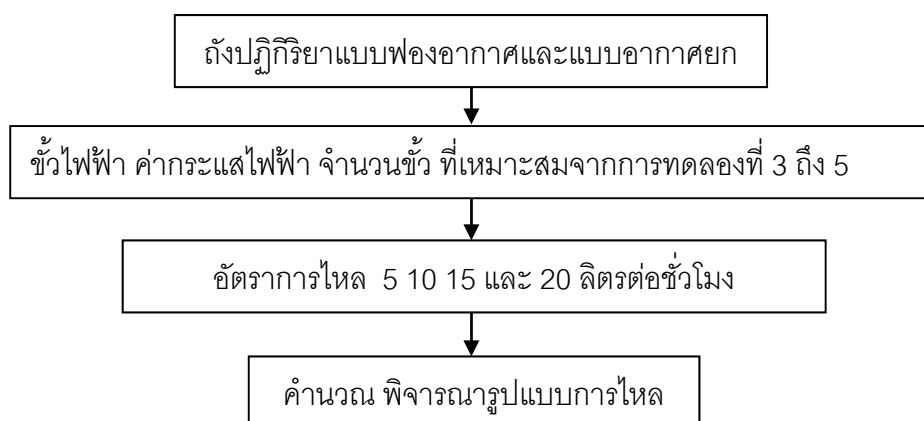
ภาพที่ 3-11 แผนผังการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเข้าเฉพาะส่วนเติมอากาศ

**การทดลองที่ 7.2:** การศึกษารูปแบบการไหลของอัตราการไหลของน้ำเข้าของถังปฏิบัติการแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก

นำน้ำเสียสังเคราะห์มาศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเข้าในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก ที่อัตราการไหลของน้ำเข้า ที่ 5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า จำนวนขั้ว จากการทดลองที่ 3 ถึง 5 แล้วศึกษารูปแบบการไหลโดยการฉีดสารติดตาม (tracer) ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-12 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-12

ตารางที่ 3-12 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิบัติการ

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ชนิดและจำนวนขั้วไฟฟ้า 3. กระแสไฟฟ้า	1. 1 กรัม/ลิตร 2. จากการทดลองที่ 3 3. จากการทดลองที่ 5
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ถังปฏิบัติการ 2. อัตราการไหลของน้ำเข้า	1. แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก 2. 5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ค่าความนำไฟฟ้า 2. รูปแบบการไหล	1. ค่าความนำไฟฟ้า 2. คำนวน พิจารณารูปแบบการไหล



รูปที่ 3-12 แผนผังการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิบัติการ



### 3.3 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3-13 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย</li> <li>- กระแสไฟฟ้า</li> <li>- ชนิดขั้วไฟฟ้า</li> <li>- ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า</li> <li>- ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์</li> <li>- คุณภาพของน้ำทิ้ง               <ul style="list-style-type: none"> <li>● ซีไอดี</li> <li>● ความขุ่น</li> <li>● พีเอช</li> <li>● ปริมาณของแข็งละลาย</li> <li>● ปริมาณน้ำมันและไขมัน</li> <li>● อุณหภูมิ</li> </ul> </li> <li>- ความหนาของชั้นตะกอน</li> <li>- ขนาดอนุภาคน้ำมัน</li> <li>- ขนาดฟองก๊าซที่เกิดขึ้น</li> <li>- ความเร็วของก๊าซ</li> <li>- ความเร็วของน้ำในส่วนไม่เต็ม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ</li> <li>- (AC/DC Adapter)</li> <li>- วิจัยาร์เทสต์               <ul style="list-style-type: none"> <li>● 5220 C. Closed Reflux, Titration Method</li> <li>● 2130 B. Nephelometric Methode</li> <li>● 4500 H<sup>+</sup> Electrometric Method</li> <li>● 2540 C. Total Dissolved Solid Dired at 180 °C</li> <li>● 5520 B. Partition Gravimetric Method</li> <li>● 2250 B. Laboratory and Field Methods</li> </ul> </li> <li>- ไม้บรรทัด</li> <li>- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด</li> <li>- กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง</li> <li>- วัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำ</li> <li>- ซีดส์และจับเวลา</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- รูปแบบการไหล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ศึกษาฟังก์ชันการกระจายเรซินเดนซ์โทม</li> </ul>

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ในส่วนนี้ นำเสนอผลการศึกษากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก โดยในการวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันตัดที่ใช้ ศึกษาความเป็นไปได้ในการรวมตะกอนโดยการใช้สารเคมี นอกจากนี้ได้ทำการศึกษากการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ โดยการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด อาทิเช่น ชนิดของขั้วไฟฟ้า ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม จากนั้นทำการศึกษาและเปรียบเทียบการเดินระบบระหว่างถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก (งานวิจัยนี้ขอเรียกรวมว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยก) เพื่อให้ได้สภาพที่เหมาะสมในการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยสุดท้าย ทำการทดลองเพื่อหาค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เฟสของไหล และฟังก์ชันการกระจายเวซิเดนซ์ไทม์เพื่ออธิบายกลไกการทำงานที่เกิดขึ้น

#### 4.1 การศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและการสร้างตะกอน (Coagulation) ด้วยวิธีจาร์เทสต์

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เพื่อศึกษาลักษณะเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นทำการศึกษากการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำลายเสถียรภาพของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

##### 4.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

งานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเลียนแบบน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำมันตัด Castrol Cooledge BI (มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว) ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) ทำการปั่นกวนน้ำตัวอย่างที่ 125 รอบ/นาที นาน 5 นาที จากนั้นทำการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-1 โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาเริ่มต้น คือ ค่าซีโอดี (COD) ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) ค่าความขุ่น ด้วยเครื่องวัดความขุ่น ยี่ห้อ

Loviond รุ่น TurbiCheck ค่าพีเอชเริ่มต้น (pH) ค่าความหนืด (viscosity) ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) ปริมาณน้ำมันด้วยวิธี FOG และขนาดอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) โดยวิธีหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $D_{mean}$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 4-1

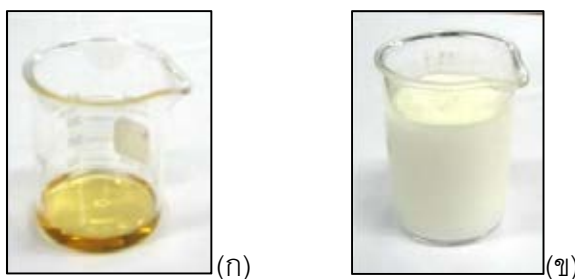
$$D_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (4-1)$$

เมื่อ  $D_i$  : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน  
 $n$  : จำนวนอนุภาคน้ำมัน

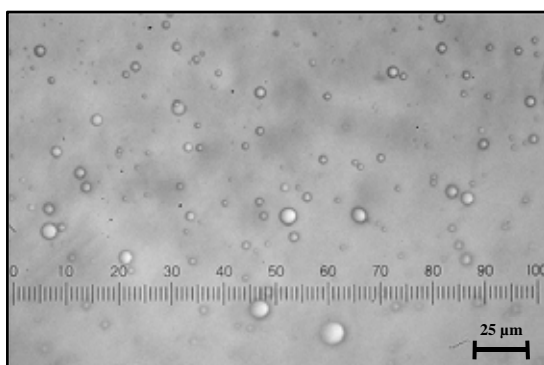
ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัด

พารามิเตอร์	ค่า
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$3914 \pm 120$
ความขุ่น (NTU)	$1394 \pm 20$
พีเอช	$7.8 \pm 0.3$
ค่าความหนืด (Centipoises, cps)	9.16
ปริมาณของแข็งละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$890 \pm 50$
ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	208
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคน้ำมันเฉลี่ย ( $D_{mean}$ , ไมครอน)	1.5

น้ำมันตัด Castrol Cooledge BI ที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนผสมของน้ำมันแร่ (Mineral oil) สารเพิ่มคุณภาพ (Additive) และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ดังนั้นเมื่อนำน้ำมันตัดในการลดความร้อนของการตัดและกริ่งโลหะ จึงสามารถละลายกับน้ำก่อนการใช้งานโดยไม่ต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยมีการนำน้ำมันตัดกลับมาใช้ซ้ำจนน้ำมันตัดมีความเข้มข้นประมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร จึงหยุดใช้งาน จากนั้นทำการตกตะกอนโลหะและนำเข้าสู่ระบบบำบัด ดังนั้นเพื่อให้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมีความขุ่นใกล้เคียงกับน้ำเสียจริง จึงทำการเจือจางน้ำมันตัดด้วยน้ำประปา ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร (แสดงดังภาพที่ 4-1) โดยจะเห็นได้ว่า น้ำมันตัดมีลักษณะเป็นสารละลายขุ่นสีขาวคล้ายนม ไม่มีการแยกเป็นชั้นน้ำมันหลังจากตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน และสามารถจัดได้ว่าน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดมีลักษณะเป็นอิมัลชันคงตัวที่มีการปนเปื้อนด้วยสารลดแรงตึงผิว (Stabilized oily-emulsion with surfactants) (Battler และคณะ, 2004)



ภาพที่ 4-1 ลักษณะน้ำมันตักก่อน (ก) และหลังผสมน้ำ (ข)



ภาพที่ 4-2 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตักในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น

จากภาพที่ 4-2 แสดงรูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตัก พบว่า ขนาดของอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กกว่า 20 ไมครอน ซึ่งจัดเป็นน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นอิมัลชันชั้นสอง (Secondary emulsion) (Aurette, 1985) จึงทำให้น้ำมันมีเสถียรภาพสูงส่งผลให้สามารถแขวนลอยอยู่ในสารละลายและยากต่อการบำบัดทางกายภาพทั่วไป เช่น การแยกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ในระยะเวลาที่จำกัด ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation) เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันตักจากอิออนของสารโคแอกกูแลนต์และเกิดการรวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (Chen, 2004)

ก่อนทำการศึกษาระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้สนใจทำการศึกษารวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียทั่วไป เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันตักด้วยกระบวนการทางเคมี รวมถึงไปถึงการศึกษาชนิดของสารโคแอกกูแลนต์พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ และปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยทำการกวนเร็วและกวนช้า หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้ตกตะกอน แล้วทำการวิเคราะห์ส่วนน้ำใสและตะกอนที่เกิดขึ้น

#### 4.1.2 ความสามารถในการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์

เนื่องจากอนุภาคของน้ำมันตัดมีเสถียรภาพสูง การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจึงต้องอาศัยแนวทางในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันหรือคอลลอยด์ โดยอาศัยกลไก 4 แบบ (มันลิน ตันซูลเวสม์, 2542) ดังนี้

- การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) เป็นการเพิ่มจำนวนอิออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง และทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย
- กลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า (Charge neutralization) การดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ จะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แต่เมื่อเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่มากเกินไป จะทำให้ประจุของอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุตรงข้าม (Charge Reversal) และเป็นผลให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพอีกครั้ง
- การห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ (Sweep Flocc Coagulation) เป็นการเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดในปริมาณที่มากเกินไป จะเกิดการตกผลึกขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอนุภาคของคอลลอยด์จะทำหน้าที่เป็นแกนในของผลึก หรือรวมตัวกันกับผลึก ซึ่งเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและตกตะกอนได้
- การใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคของคอลลอยด์ (Polymer Bridging) โดยโมเลกุลโพลีเมอร์สามารถเกาะติดกับอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่งจึงอาจเกิดควมมีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle)

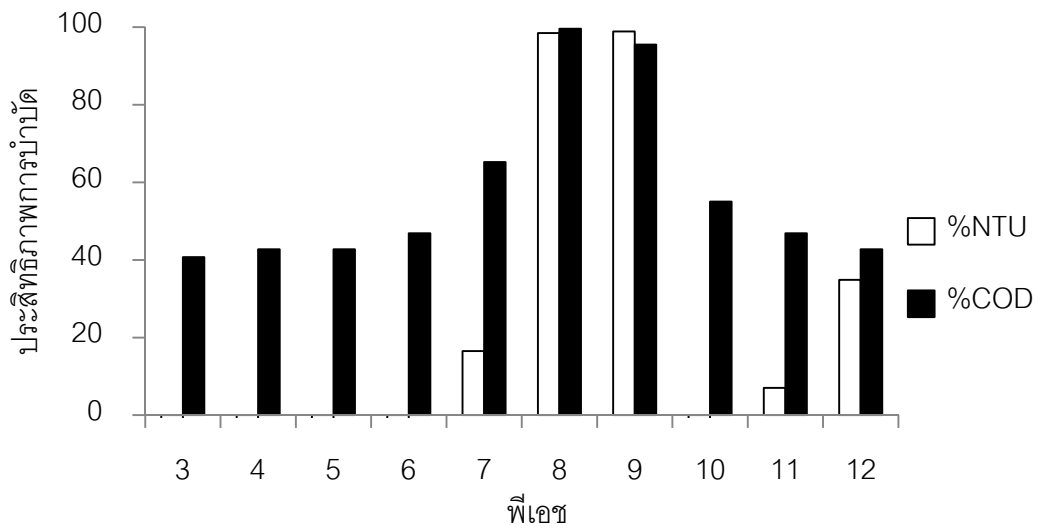
ในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยในการทำลายเสถียรภาพด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน คือ ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ 2 ชนิด ได้แก่ สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) และเพอร์ริคคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) (ซึ่งเป็นสารเคมีหรือโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้โดยทั่วไป) เพื่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพด้วยกลไกการดูดติดผิวและการทำลายประจุ หรือกลไกห่อหุ้มอนุภาคน้ำมันด้วยผลึกของสารประกอบ ที่อยู่ในรูปผลึก  $\text{Al}(\text{OH})_3$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น ศึกษาพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม โดยทำการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาทีและกวนช้า 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และตั้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที (สุรารักษ์ อวณญวน, 2552)

## 1. การศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

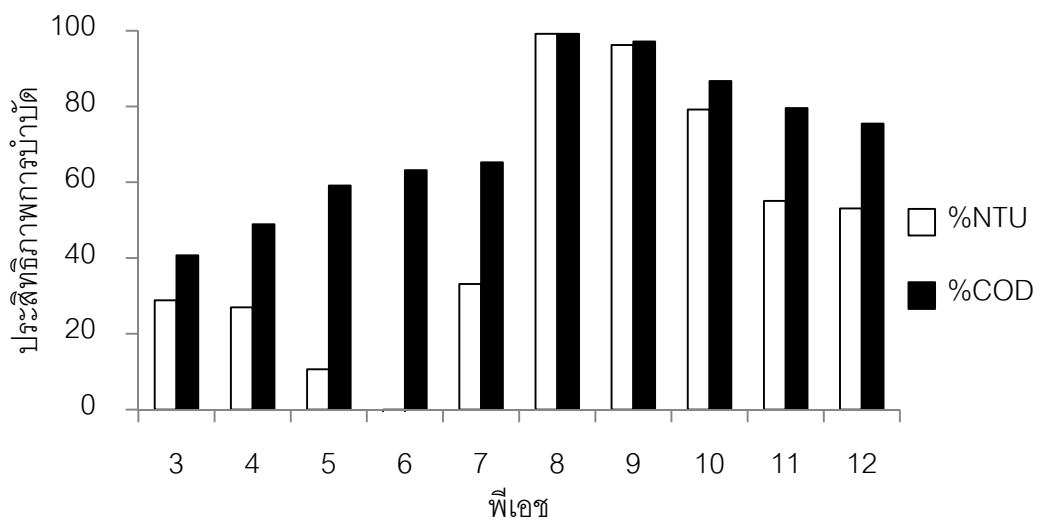
ในทางทฤษฎีค่าพีเอชของน้ำเสียมีบทบาทมากต่อกลไกการทำงานของกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆ โดยสารโคแอกกูแลนต์แต่ละตัวจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อกลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า รวมถึงกลไกการห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ในการทดลองนี้จึงได้ศึกษา ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในช่วง pH 3-12 และใช้สารโคแอกกูแลนต์ 2 ชนิดคือ สารส้ม (Alum) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 4-3 (ก) แสดงผลของพีเอชเริ่มต้น โดยการ ใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า พีเอชของน้ำเสียมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและความขุ่นสูงสุด (ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์) คือ พีเอช 8-9 และมีพีเอชหลังการบำบัด คือ 6.07-6.35 ตามลำดับ

ส่วนในกรณีของการใช้ เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ แสดงในภาพที่ 4-3 (ข) พบว่า พีเอชเริ่มต้นที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและความขุ่นสูงสุด (ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์) อยู่ในช่วง 8-9 ซึ่งมีพีเอชหลังการบำบัด คือ 6.55-6.77 ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของพีเอชเริ่มต้นของสารโคแอกกูแลนต์ 2 ชนิด พบว่า หากพีเอชของน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง การใช้เฟอร์ริกคลอไรด์จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้สารส้ม เนื่องจากความสามารถของเฟอร์ริกคลอไรด์ที่สามารถตกตะกอนในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า สารส้ม (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)



(ก) สารส้ม



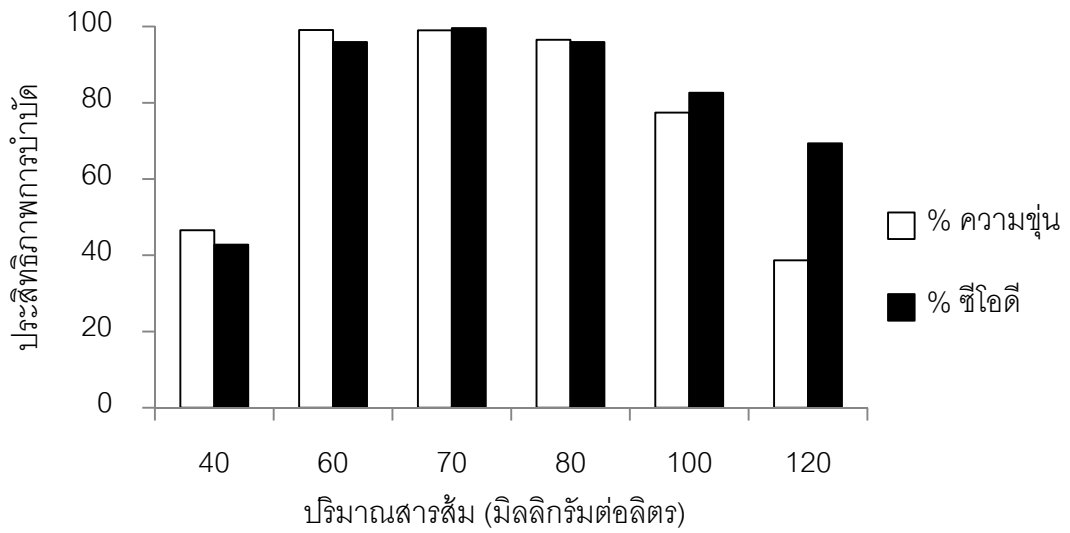
(ข) เฟอริกคลอไรด์

ภาพที่ 4-3 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดี เมื่อฟิเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง

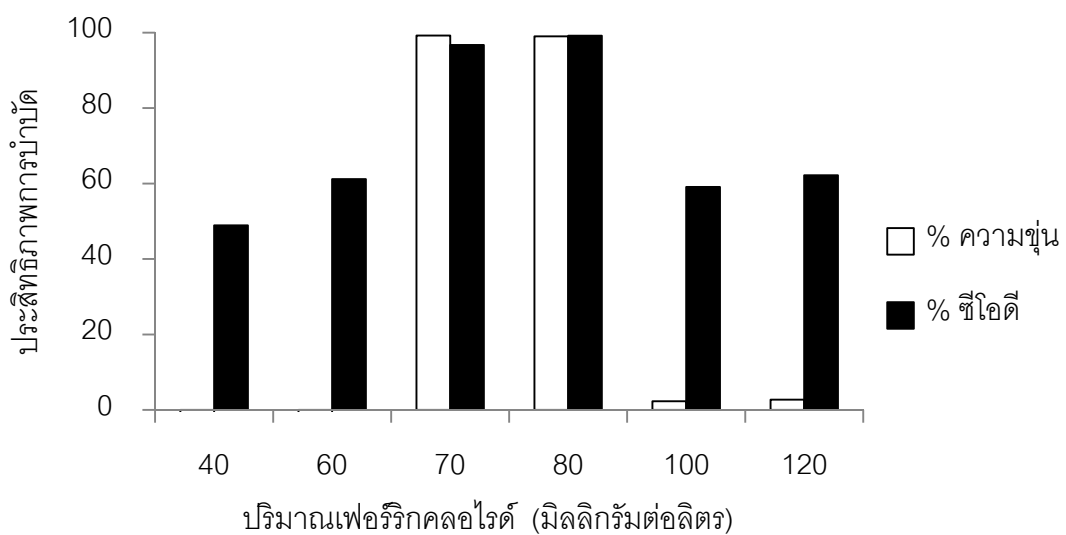
## 2. การศึกษาปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์

การทดลองนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์ โดยศึกษาโดยใช้สารส้ม (Alum) และเฟอริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ เนื่องจากเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ทั่วไปในกระบวนการ

โคแอกกูเลชัน-ฟล๊อคคูเลชัน (มันดิน ตัณหูลเวศม์, 2542) โดยทำการศึกษาความเข้มข้นต่างๆ (40-120 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้า 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และตั้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที (สุรารักษ์ อวนญวน, 2552) โดยพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น คือ 8 โดยผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 4-4



(ก) สารส้ม



(ข) เฟอริกคลอไรด์

ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดี ที่ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ต่างๆ



จากการศึกษาการใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่ความเข้มข้นระหว่าง 40-120 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 8 (จากผลการทดลองที่ผ่านมา) เพื่อใช้ในการบำบัดซีโอดีและความขุ่นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด แสดงในภาพที่ 4-4 (ก) และภาพที่ 4-4 (ข) พบว่า การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและความขุ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดกลไกการห่อหุ้มอนุภาคน้ำมันไว้ในผนังของสารประกอบ (Sweep Floc Coagulation) และทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากเกินไปจึงทำให้เกิดการทำลายประจุและเปลี่ยนประจุให้กลายเป็นประจุบวก (Charge Reversal) ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เติมจึงควรระวัง เพราะความเข้มข้นที่สูงเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพลดลง และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำบัดอีกด้วย ดังนั้นจึงควรระวังเกี่ยวกับความเข้มข้นของอิออนของสารโคแอกกูแลนต์ที่เติมเข้าไป ที่อาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วย จากปรากฏการณ์ดังกล่าว น่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็ก (1.5 ไมครอน) และลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ ด้วย โดยพบว่า ปริมาณความเข้มข้นสารส้มที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 60-80 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์) ส่วนปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) เหมาะสมอยู่ในช่วง 70-80 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์)

จากการศึกษาความสามารถในการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เจสท์ พบว่า น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสามารถถูกทำลายเสถียรภาพได้โดยการใช้กระบวนการโคแอกกูแลชัน-ฟล็อกคูเลชัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารส้ม (Alum) หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เท่ากับ 8 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน คือ 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีจาร์เจสท์มีคุณภาพผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539) ดังแสดงในตาราง 4-2

ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบดัชนีคุณภาพน้ำจากการบำบัดด้วยวิธีจาร์เทศต์กับค่ามาตรฐาน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	การบำบัดด้วยวิธีจาร์เทศต์	
		สารส้ม	FeCl <sub>3</sub>
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH)	5.5-9.0	6.07	6.55
2. ค่าทีดีเอส (TDS)	ไม่เกิน 3,000 มก./ล.	189	197
3. อุณหภูมิ	ไม่เกิน 40° ซ	28° ซ	28° ซ
4. สีและกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
5. ความขุ่น	-	11.4 NTU	21.3 NTU
6. ค่าซีไอดี (COD)	ไม่เกิน 120 มก./ ล.	32 มก./ ล.	32 มก./ ล.

จากตารางที่ 4-2 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารส้มหรือเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น คือ 8 พบว่าการใช้สารโคแอกกูแลนต์ทั้งสองชนิด สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ และผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง แต่การใช้เฟอร์ริกคลอไรด์มีข้อเสียคือ น้ำที่ผ่านการบำบัดอาจมีไอออนของเหล็ก เช่น เฟอร์ริก (Fe<sup>3+</sup>) หรือเฟอร์รัส (Fe<sup>2+</sup>) ละลายในน้ำจะทำให้มีสีเหลืองหรือน้ำตาล คล้ายสีสนิมเหล็ก ซึ่งหากต้องการนำไปใช้จะต้องมีการเติมอากาศเพื่อตกตะกอนเหล็ก หรือบำบัดด้วยกระบวนการกรอง หรือกระบวนการบำบัดขั้นสูง (advance oxidation) ต่อไป (Cheremisinoff, 2002) ดังนั้นการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์จึงน่าจะมีความเหมาะสมมากกว่าการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์

อย่างไรก็ตาม นอกจากการพิจารณาปริมาณและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียในการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทศต์ เพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาต่อไป คือ การคำนวณค่าใช้จ่าย รวมไปถึงการพิจารณาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเดินระบบในทางปฏิบัติ ซึ่งสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายของวิธีจาร์เทศต์ ได้ดังนี้

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 1 ลิตร เติมสารส้ม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการกวนเป็นเวลา 31 นาที โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 50 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ เกิดตะกอน 40 มิลลิลิตร ถ้าต้องการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใช้จ่ายดังนี้

- ราคาสารเคมี = 80 กรัม x 0.0075\* บาทต่อกรัม = 0.6 บาท
- พลังงานที่ใช้ = VIt/1000
- = (50 โวลต์ x 0.35 แอมแปร์ x (31/60 ชั่วโมง)) / 1 ลิตร
- = 9.04 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

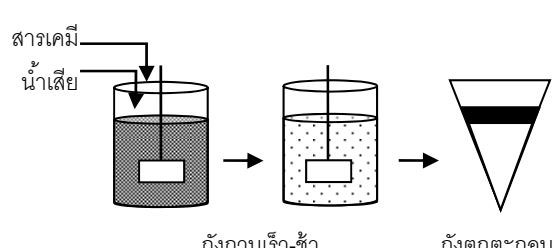
- ค่าไฟฟ้า = พลังงานที่ใช้ x ค่ายูนิตต่อหน่วย x ภาษีร้อยละ 7  
=  $9.04 \times 2.8095^{**} \times 1.07 = 27.18$  บาท
- ค่ากำจัดตะกอน =  $0.04$  ลูกบาศก์เมตร x  $30^{***}$  บาทต่อลูกบาศก์เมตร  
=  $1.2$  บาท
- ดังนั้น ค่าใช้จ่ายรวม =  $0.6 + 27.18 + 1.2 = 28.98$  บาท

(หมายเหตุ \* : ราคาสารส้มแบบใส 7.5 บาทต่อกิโลกรัม (บริษัทวอเตอร์สเปเชียลลิส ซัพพลาย จำกัด) อ้างอิงใน [www.be2hand.com/849261-ขายสารส้ม-คลอรีน-ราคาถูก.html](http://www.be2hand.com/849261-ขายสารส้ม-คลอรีน-ราคาถูก.html) เข้าถึงข้อมูลวันที่ 15 พฤษภาคม 2555

\*\* : อัตราค่าไฟฟ้า 1 ยูนิต/หน่วย เป็นการคำนวณจากการประกอบกิจการขนาดกลาง คิดอัตราแบบปกติในขนาดแรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์ มีค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.8095 บาทต่อหน่วย, ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีผลตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ.2554 เป็นต้นไป

\*\*\* : ราคากำจัดตะกอน โดยฝั่งกลบ ราคา 30 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยการประมาณขึ้นกับชนิดของตะกอนและระยะทางในการขนส่ง)

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการเดินระบบ

<ul style="list-style-type: none"> <li>● ถังปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการเดินระบบ</li> <li>● เครื่องสูบน้ำ</li> <li>● เครื่องสูบน้ำจ่ายสารเคมี</li> <li>● ใบบดเพื่อใช้ในการกวนหรือเติมอากาศ</li> </ul>	 <p>ภาพที่ 4-5 การเดินระบบด้วยกระบวนการจาร์เจสท์</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในข้างต้น พบว่า การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ด้วยวิธีจาร์เจสท์ มีค่าใช้จ่าย ประมาณ 28.98 บาท โดยการเดินระบบ จะต้องมี การเติมสารเคมี (สารโคแอกกูแลนต์) รวมถึงมีการติดตั้งใบบดหรือหัวเติมอากาศเพื่อใช้ในการกวนและการพาอนุภาคตะกอนให้ลอยขึ้นด้วยบนของถังปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อลดค่าใช้จ่าย และลดความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation) เพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

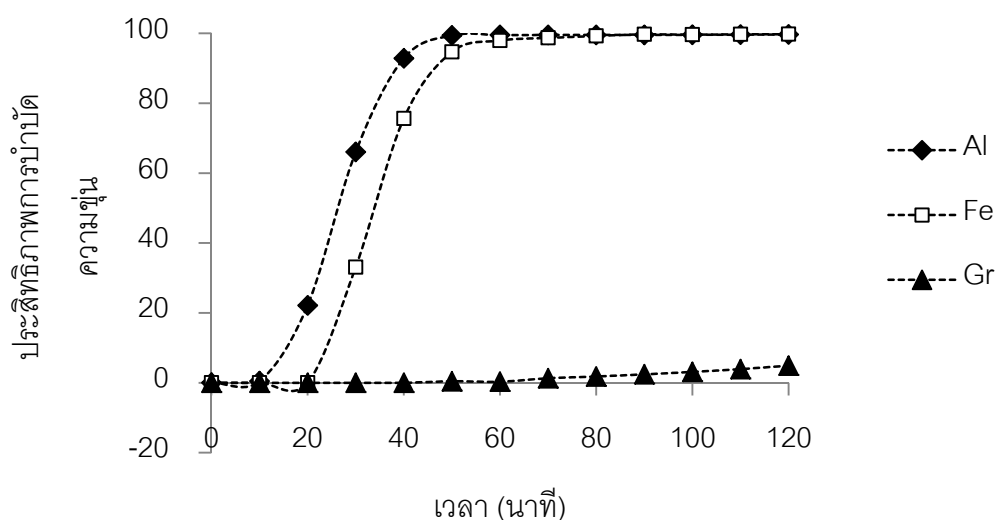
ในการศึกษาต่อไปจึงทำการศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ ซึ่งเป็นถังปฏิบัติการที่นิยมใช้โดยทั่วไปในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศที่ใช้ในการทดลอง มีรูปร่างเป็นท่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.4 เซนติเมตร สูง 195 เซนติเมตร และวางขั้วไฟฟ้าอยู่เหนือกันถังปฏิบัติการ 30 เซนติเมตร ทำการเดินระบบแบบที่ละเอียด เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อไป

## 4.2 การศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ แบบที่ละเอียด

### 4.2.1 การศึกษาหาชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาหาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม เหล็ก-เหล็ก และแกรไฟต์-แกรไฟต์ จำนวน 2 แผ่น ที่มีความกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา คือ 100 ตารางเซนติเมตร โดยติดตั้งภายในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ โดยเดินระบบแบบที่ละเอียด ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 2 เซนติเมตร

#### ● ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น



ภาพที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด (อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์)

จากภาพที่ 4-6 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของน้ำ 3 ชนิด พบว่า สามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด และการใช้แกรไฟต์เป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- การใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรดมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นเพิ่มขึ้นตามเวลาและให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด 99 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเดินระบบเป็นเวลา 50 นาที จากนั้นประสิทธิภาพจะคงที่จนครบเวลาในการเดินระบบที่ 120 นาที เห็นได้ว่าอะลูมิเนียมมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาก่อนข้างสูง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (วรรณชชัย, 2547 และสุดสิริ จิตสุภาวัฒน์, 2552)

- การใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นเพิ่มขึ้นตามเวลา หลังจากเดินระบบ 20 นาที และให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด 99 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 60 นาที จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะคงที่ โดยความว่องไวของการทำปฏิกิริยาของเหล็กที่ช้ากว่าอะลูมิเนียม อาจมีสาเหตุมาจากความว่องไวในการทำปฏิกิริยาแปรผกผันกับมวลโมเลกุล (มวลโมเลกุลของ Al เท่ากับ 26.98 กรัมต่อโมล และ Fe เท่ากับ 55.85 กรัมต่อโมล) (สุดสิริ จิตสุภาวัฒน์, 2552)

- การใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ระบบแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสของน้ำ (แสดงในตารางที่ 4-3) โดยขั้วแอโนดเกิดการกัดกร่อนและละลายโลหะออกมาในรูปของไอออน  $Al^{3+}$  (กรณีใช้ขั้วอะลูมิเนียม) หรือ ไอออน  $Fe^{2+}$  (กรณีใช้ขั้วเหล็ก) ซึ่งเปรียบเสมือนไอออนของสารโคแอกกูแลนต์ ส่วนขั้วแคโทดเกิดการให้ไฮดรอกไซด์ไอออน ทำให้เกิดผลึกไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมที่ไม่ละลายน้ำ สัมพันธ์กับกลไก ทำลายประจุ/ดูดตีวมิว และกลไกการสร้างผลึกเพื่อจับอนุภาคน้ำมัน (Sweep Coagulation) รวมตัวกันเกิดเป็นฟล็อก (floc) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นแยกอนุภาคน้ำมันโดยการทำให้ลอยขึ้นด้วยฟองก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$  bubble) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำของขั้วแคโทด กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการรวมตะกอนและทำให้ลอยโดยไฟฟ้า (Electro-coagulation/flotation process, ECF) แต่ข้อเสียของการใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด คือ น้ำที่ผ่านการบำบัดในช่วงแรกจะมีสีเหลืองและสีเขียว ซึ่งอาจเกิดจากไอออน  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ที่เกิดจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Saleem และคณะ, 2011) นอกจากนี้ น้ำที่ผ่านการบำบัดถึงมีจะมีลักษณะใส แต่มีสีเหลืองส้มคล้ายสนิมเหล็ก เนื่องจากมีไอออนของเหล็กคงเหลืออยู่ในน้ำ

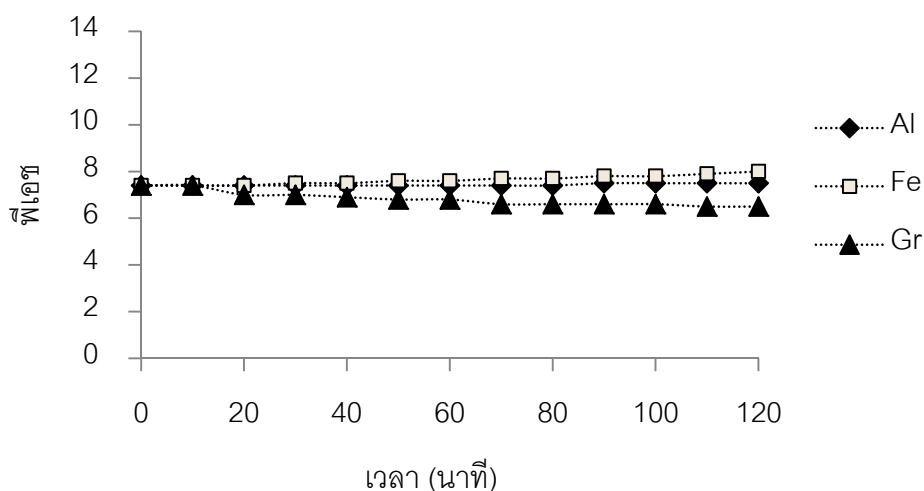
- กรณีการใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วอิเล็กโทรด พบว่า ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ 120 นาที ให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น 5 เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่า ขั้วแอโนดของขั้วแกรไฟต์ไม่มีการแตกตัวเป็นอ็อกซิเจนประจุบวก จึงไม่มีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน มีเพียงการแตกตัวของน้ำเพื่อให้เกิดก๊าซออกซิเจน ซึ่งการใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นการแยกสารโดยการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าซึ่งอาศัยกลไกการทำให้ลอยตัว (Flotation) โดยใช้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดการชนและเกาะติดระหว่างอนุภาคและฟองก๊าซจนเกิดการลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ (พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 2555) กระบวนการที่เกิดขึ้นกับขั้วแกรไฟต์ว่าเป็นกระบวนการลอยตัวด้วยไฟฟ้า (Electro-flotation, EF) เนื่องจากขนาดของอนุภาคน้ำมันในงานวิจัยนี้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1.5 ไมครอน ซึ่งถือว่ามีความเล็กมาก ทำให้ค่า  $n_T$  (ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของฟองอากาศ 1 ฟอง) และค่า  $\alpha$  (ประสิทธิภาพการเกาะติดระหว่างอนุภาคและฟองอากาศ) มีค่าน้อยมาก เป็นผลให้โอกาสการเกาะติดระหว่างฟองอากาศและน้ำมันมีน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าน้อยตามไปด้วย (Rubio และคณะ, 2002)

ดังนั้น ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จึงต้องอาศัยกลไกกระบวนการโคแอกกูเลชันจากอ็อกซิเจนของสารโคแอกกูแลนท์ที่เกิดจากขั้วแอโนด และทำให้ตะกอนลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำโดยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากขั้วแคโทด โดยการใช้อัลูมิเนียมหรือเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

ตารางที่ 4-3 ปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสของขั้วไฟฟ้าต่างๆ

ปฏิกิริยา	ขั้วอะลูมิเนียม	ขั้วเหล็ก	ขั้วแกรไฟต์
Anode (Oxidation)	$Al_{(s)} \rightarrow Al^{3+}_{(aq)} + 3e^-$	$Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$2H_2O_{(l)} \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$
Cathode (Reduction)	$3H_2O_{(l)} + 3e^- \rightarrow 3/2H_2 + 3OH^-$	$2H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$2H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
Redox	$Al_{(s)} + 3H_2O_{(l)} \rightarrow 3/2H_2 + Al^{3+}_{(aq)} + 3OH^-$	$Fe_{(s)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow H_2 + Fe^{2+}_{(aq)} + 2OH^-$	$6H_2O_{(l)} \rightarrow O_2 + 2H_2 + 4H^+ + 4OH^-$

● พีเอช (pH) ที่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4-7 พีเอชที่เปลี่ยนแปลงของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด (อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์)

ในกรณีของพีเอชที่เปลี่ยนแปลงของขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด แสดงในภาพที่ 4-7 พบว่า พีเอชของน้ำเสียระหว่างการบำบัดค่อนข้างคงที่ เนื่องจากถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศที่ใช้ในการทดลอง มีขนาด 12 ลิตร จึงทำให้พีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในแต่ละช่วงเวลาไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

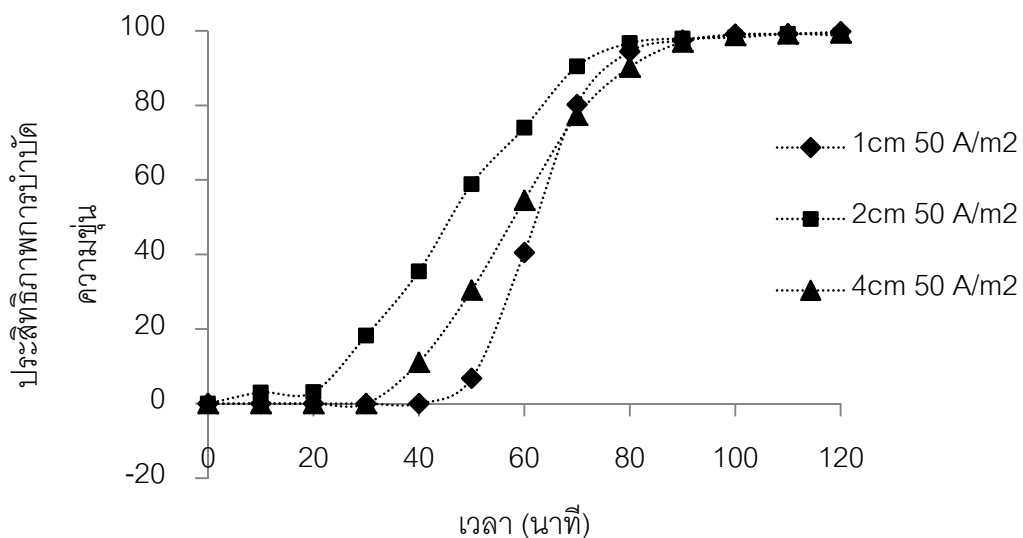
จากผลการศึกษาค้นคว้าของชนิดของไฟฟ้าข้างต้น สรุปได้ว่า ขั้วอะลูมิเนียมเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป ซึ่งกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation) หรือบางครั้งเรียกว่ากระบวนการรวมตะกอนและการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation/ flotation process) เป็นกระบวนการที่คล้ายคลึงกับกระบวนการรวมตะกอนหรือกระบวนการโคแอกกูแลชันด้วยวิธีจาร์เทสต์ ที่กล่าวถึงข้างต้น คือ อีออนของสารโคแอกกูแลนต์ที่เกิดจากขั้วแอโนดทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ และสามารถแยกชั้นตะกอนของฟลอคออกจากน้ำเสีย โดยการลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบนด้วยฟองก๊าซไฮโดรเจนจากขั้วแคโทด โดยผลจากการศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีข้อดีกว่าวิธีจาร์เทสต์ คือ ไม่ต้องเติมสารเคมี และไม่มีการใช้ไบโวกวนหรือเติมฟองอากาศเพื่อช่วยในการกวนผสมและการลอยตัวของฟลอค โดยในการทดลองต่อไปจะทำการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วอะลูมิเนียมที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อไป

## 4.2.2 การศึกษาหาระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

การทดลองในส่วนนี้ ทำการศึกษาเพื่อหาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการทางไฟฟ้า โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น ภายในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ เตินระบบแบบที่ละเท ทำการศึกษาที่ 1 2 และ 4 เซนติเมตร โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

### 4.2.2.1 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ทำการพิจารณาระยะห่างระหว่างขั้วอะลูมิเนียม 1 2 และ 4 เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เตินระบบในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศแบบที่ละเท เป็นเวลา 120 นาที โดยผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

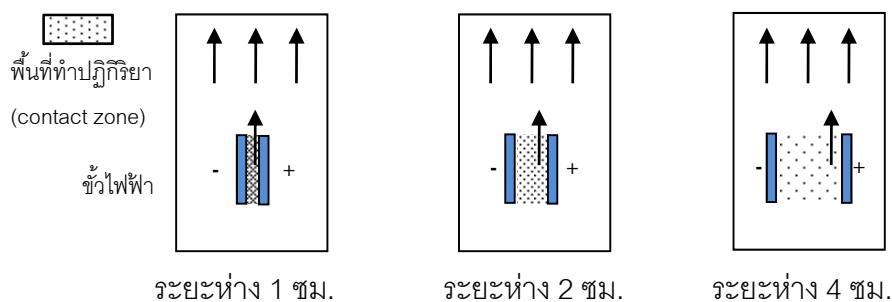


ภาพที่ 4-8 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของขั้วอะลูมิเนียม ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างขั้วต่างๆ

การศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในกรณีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ระยะห่างระหว่างขั้วมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น โดยภาพที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่า โดยระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา



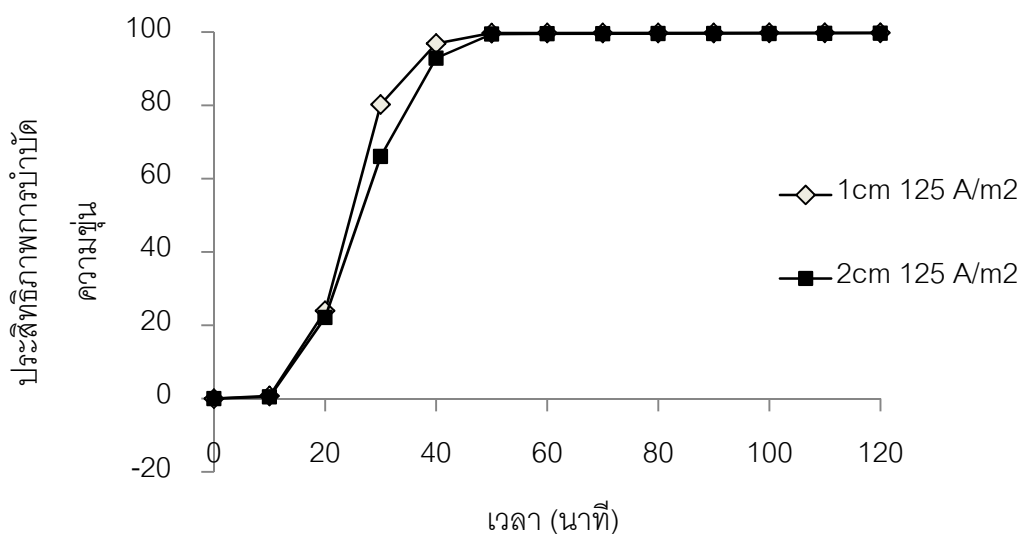
เร็วกว่า 4 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ปริมาณไอออนของสารโคแอกกูแลนต์และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นน้อย รวมถึงปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นการกวนผสมของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากขั้วแคโทดจึงมีผลอย่างมาก โดยเห็นได้จากผลของระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร มีปริมาณไอออนของสารโคแอกกูแลนต์และการกวนผสมจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เหมาะสม ในกรณีระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำสุด เนื่องจากพื้นที่ในการกวนผสมมีการปั่นป่วนจากก๊าซไฮโดรเจนที่สูง ทำให้ฟลอคที่รวมตัวกันเกิดการแตกตัว ส่วนในกรณีค่าระยะห่างระหว่างขั้ว 4 เซนติเมตร มีอัตราการบำบัดต่ำกว่า 2 เซนติเมตร เนื่องจากพื้นที่ในบริเวณพื้นที่ทำปฏิกิริยา มีปริมาณประจุบวกของสารโคแอกกูแลนต์น้อยและการกวนผสมที่ต่ำ จึงไม่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพและการแยกชั้น ดังนั้น ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพการบำบัดจึงเกิดจากพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา (contact zone) แตกต่างกัน (แสดงในภาพที่ 4-9) ซึ่งมีต่อกลไกการกวนผสม (Mixing) เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน (โดยไอออนประจุบวก) และการแยกที่เกิดขึ้นภายใน (Separation) ซึ่งถ้าเกิดการปั่นป่วนมากเกินไปจะทำให้ฟลอคที่เกิดขึ้นเกิดการแตกได้ (Essadki และคณะ, 2008)



ภาพที่ 4-9 พื้นที่การทำปฏิกิริยา ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 2 และ 4 เซนติเมตร  
ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

#### 4.2.2.2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ทำการพิจารณา ระยะห่างระหว่างขั้วอะลูมิเนียม ที่ 1 และ 2 เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เติมน้ำมันในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ แบบที่ละเท เป็นเวลา 120 นาที โดยผลการทดลองแสดงได้ดังนี้



ภาพที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่มของขั้วอะลูมิเนียม ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างขั้วต่างๆ

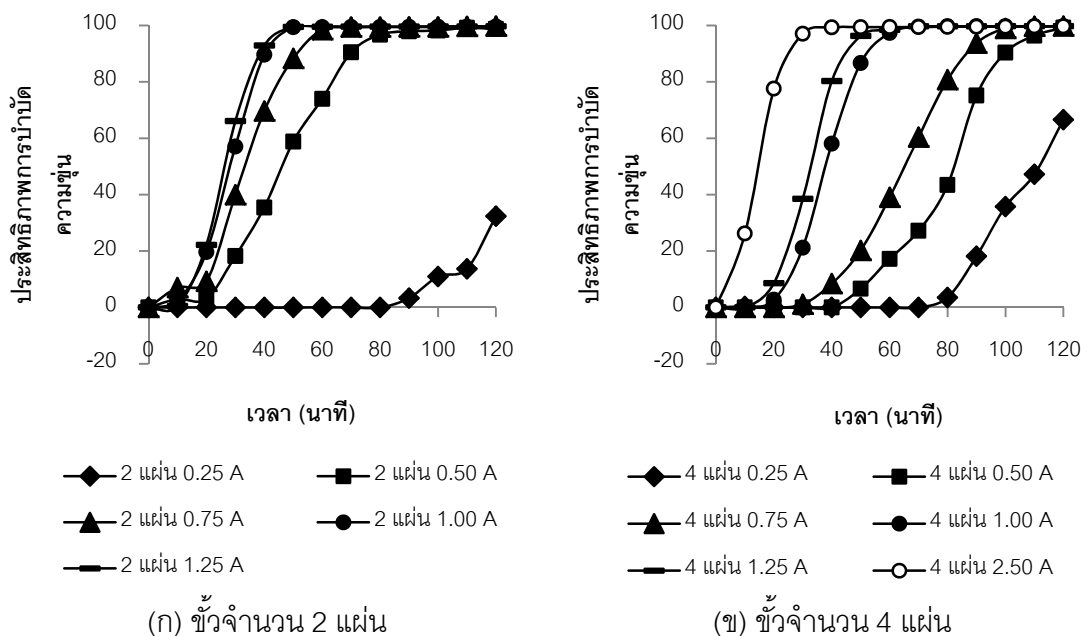
การศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในกรณีที่ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่มที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 และ 2 เซนติเมตร เพิ่มขึ้นตามเวลา และให้ประสิทธิภาพการบำบัด 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลา 50 นาที จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไม่มีผลต่อพื้นที่การทำปฏิกิริยา (contact zone) รวมไปถึงประสิทธิภาพและอัตราการบำบัดความชุ่มไม่มีความแตกต่าง เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ปริมาณไอออนของสารโคแอกกูแลนต์ ( $Al^{3+}$  ions) และก๊าซไฮโดรเจนมีปริมาณมากเกินพอ ดังนั้น การกวนผสมระหว่างไอออนของสารโคแอกกูแลนต์และการแยกออกด้วยฟองก๊าซไฮโดรเจนจึงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยในขณะนี้ไม่สามารถศึกษาระยะห่างระหว่างขั้ว 4 เซนติเมตร เนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (DC power) ที่กำหนดศักย์ไฟฟ้ามากที่สุด คือ 63 โวลต์ โดยเมื่อกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า ที่ 125 แอมแปร์ การศึกษาระยะห่างที่เพิ่มขึ้นก็ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วในการวางขั้วที่มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบ (สนามไฟฟ้า = ศักย์ไฟฟ้า/ระยะห่างระหว่างขั้ว) จะพบได้ว่า เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลง (Ichikawa และคณะ, 2004)

จากผลการศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด 2 ประการ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยในการทดลองต่อไป เลือกลงใช้ขั้วอะลูมิเนียมที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการศึกษาผลของจำนวนขั้วไฟฟ้า

### 4.2.3 การศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้า

การทดลองในส่วนนี้เพื่อการศึกษาผลของจำนวนขั้วและลักษณะการต่อขั้วแบบขนานที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการทางไฟฟ้า ในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศเดินระบบแบบทีละเท โดยทำการศึกษาจำนวนขั้วไฟฟ้า ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น และ 4 แผ่น โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ (สำหรับขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น) และ กระแสไฟฟ้า 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 และ 2.50 แอมแปร์ (สำหรับขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 แผ่น)

- ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น



ภาพที่ 4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 และ 4 แผ่น ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ต่างๆ

ภาพที่ 4-11 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ หลังผ่านบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น (กระแสไฟฟ้า 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 แอมแปร์) และขั้วไฟฟ้า จำนวน 4 แผ่น (กระแสไฟฟ้า 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 แอมแปร์ และ 2.5 แอมแปร์) พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น เพิ่มขึ้นตามเวลา และให้ อัตราการบำบัดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง สามารถเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.25 แอมแปร์ (มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ให้ประสิทธิภาพการบำบัด 99 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 50 นาที ส่วนในกรณีการใช้ขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 แผ่น โดยการต่อแบบขนาน พบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.5 แอมแปร์ (ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัด 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้า (จาก 2 แผ่น เป็น 4 แผ่น) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าในการทำปฏิกิริยา ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบมีปริมาณมากขึ้น โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมไอออนที่ละลายสู่เฟสของเหลว โดยสัมพันธ์กับกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) โดยมีสมการดังนี้

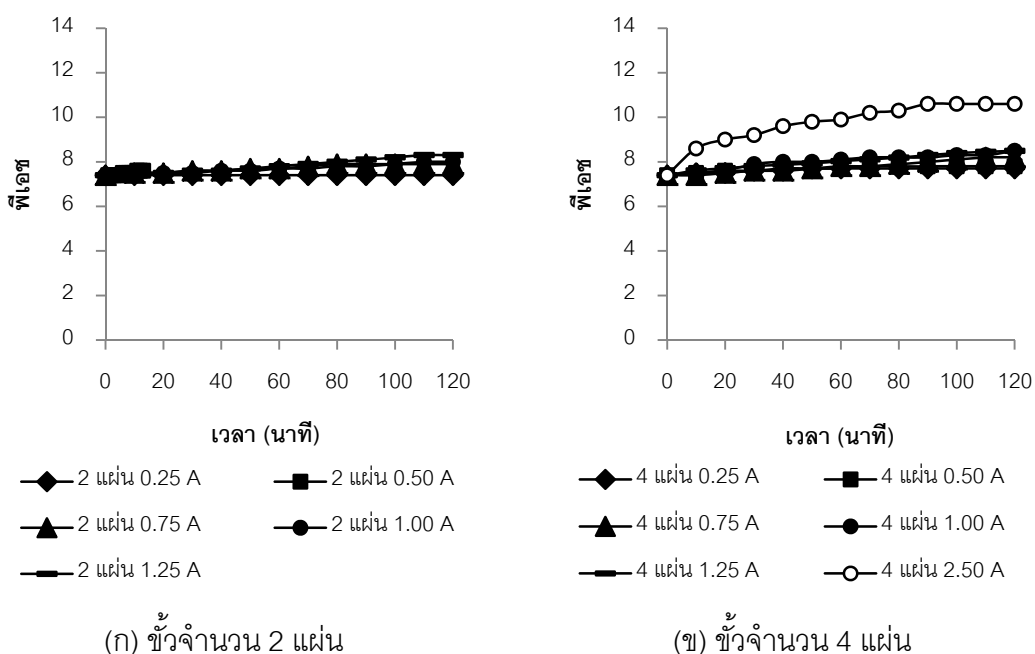
$$C_{Al} = \frac{M\Phi_e It}{nFV} = \frac{M\Phi_e Q}{nFV} \quad (4-2)$$

เมื่อ  $C_{Al}$  คือ ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ (กรัมต่อลิตร),  $M$  คือ น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด (กรัมต่อโมล),  $I$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์),  $n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ ( $Al = 3$ ),  $t$  คือ เวลาที่ใช้ (วินาที),  $F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ,  $V$  คือ ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ลิตร) และ  $\Phi_e$  คือ ค่าฟาราเดิกยิลด์ (Faradic yield)

เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร การใช้ขั้วไฟฟ้า (ขั้วอิเล็กโทรด) จำนวน 4 แผ่น ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปยังขั้วอิเล็กโทรด จะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดเกิดการกัดกร่อนสูง ทำให้โลหะไอออนที่ขั้วแอโนดที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮดรอกไซด์ไอออนกับฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทดจากปฏิกิริยารีดักชัน ที่ผลิตออกจากขั้วอิเล็กโทรดมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ (อะลูมิเนียมไอออน) มีโอกาสในการทำ

ปฏิกิริยากับอนุภาคของน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคของน้ำมันด้วยกลไกทำลายประจุ/ดูดติวผิว และรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน เพื่อสร้างตะกอนฟลอค  $Al(OH)_3$  ในการห่อหุ้มอนุภาคของน้ำมันเพื่อแยกอนุภาคของน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยกลไกแบบกวาด (sweep floc coagulation) ร่วมกับฟองก๊าซไฮโดรเจนที่มีปริมาณมากขึ้น จะช่วยส่งผลให้สามารถดักจับอนุภาคของน้ำมันให้ลอยขึ้นได้มากขึ้น

### ● พีเอช (pH) ที่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4-12 พีเอชที่เปลี่ยนแปลงของขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 และ 4 แผ่น ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ต่างๆ

เมื่อพิจารณาพีเอชที่เปลี่ยนแปลง แสดงในภาพที่ 4-12 พบว่า การบำบัดโดยขั้วอะลูมิเนียมจำนวน 2 แผ่น 1.25 แอมแปร์ (ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) พีเอชค่อนข้างคงที่ (พีเอช อยู่ในช่วง 7-8) ส่วนที่ใช้ขั้วอะลูมิเนียมจำนวน 4 แผ่น 2.50 แอมแปร์ (ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นจาก 8 ถึง 10 โดยพีเอชที่เพิ่มขึ้นเกิดจากประมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่แตกตัวจากน้ำในขั้วแคโทด (ตารางที่ 4-3) ในปริมาณมากเพิ่มกระแสไฟฟ้า จึงเป็นการเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออนให้กับน้ำ เป็นผลให้พีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น (Bensadok และคณะ, 2008) ซึ่งเมื่อทำการประยุกต์ใช้จริงอาจมีปัญหาในเรื่องพีเอชของน้ำหลังบำบัด และต้องมีการปรับสภาพก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำ (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539 กำหนดค่ามาตรฐานของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด พีเอช ควรอยู่ในช่วง 5.5-9.0)

การพิจารณาการเดินระบบ โดยใช้สภาวะการเดินระบบที่ดีที่สุดของแผ่นขั้วอะลูมิเนียมเป็นไฟฟ้าจำนวน 2 และ 4 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบการขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 และ 4 แผ่น โดยเดินระบบในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ แบบที่ละเท

	ขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น	ขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 แผ่น
ถังปฏิบัติการ	ฟองอากาศ (12 ลิตร)	ฟองอากาศ (12 ลิตร)
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	120 นาที	120 นาที
ประสิทธิภาพการบำบัด	99 เปอร์เซ็นต์	99 เปอร์เซ็นต์
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $A/m^2$ )	$125 A/m^2$	$125 A/m^2$
น้ำหนักขั้วหายไป (กรัม)	0.9994 กรัม	2.2615 กรัม
ปริมาตรตะกอนด้านบน (มิลลิลิตร)	576 มิลลิลิตร	972 มิลลิลิตร
ค่าใช้จ่ายรวม (บาทต่ออลบม.)	53.81	110.55
ปัญหา	<ul style="list-style-type: none"> <li>น้ำเสียได้ขั้วไฟฟ้า ไม่ถูกบำบัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>น้ำเสียได้ขั้วไฟฟ้า ไม่ถูกบำบัด</li> <li><math>pH_{\text{หลังบำบัด}} = 10</math></li> </ul>

จากตารางที่ 4-4 แสดงการเปรียบเทียบการขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 และ 4 แผ่น โดยเดินระบบในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ แบบที่ละเท ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้เวลาในการเดินระบบ คือ 120 นาที พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นใกล้เคียงกันคือ 99 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 แผ่น มีข้อเสีย คือ พีเอชหลังการเดินระบบ คือ 10 ซึ่งเป็นผลมาจากการให้กระแสไฟฟ้าแก่ระบบที่มาก จึงทำให้ขั้วไฟฟ้าเกิดการกัดกร่อนมาก มีปริมาณไอออนของสารโคแอกกูเลนท์ ( $Al^{3+}$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ส่งผลเป็นผลให้มีปริมาณตะกอนด้านบนมากกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น และเมื่อพิจารณา

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 1 ลูกบาศก์เมตร (ค่าไฟฟ้า ค่าชั่วโมงไฟฟ้า และค่ากำจัดตะกอน) เมื่อใช้ชั่วโมงไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น และ 4 แผ่น คือ 48.01 และ 101.41 บาท ดังนั้น การเลือกใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นชั่วโมงไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น จึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและลดปัญหาในเรื่องพีเอชและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นได้

จากการศึกษาชนิดของชั่วโมงไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างชั่วโมง และจำนวนแผ่นของชั่วโมงไฟฟ้า ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ พบว่า ควรใช้ชั่วโมงอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างชั่วโมง 2 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพให้ประสิทธิภาพและอัตราการบำบัดสูงสุด แต่ปัญหาที่พบในการเดินระบบภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ คือ น้ำเสียด้านล่างของชั่วโมงไฟฟ้าไม่ถูกบำบัด รวมไปถึงน้ำหนักของชั่วโมงที่หายไป ซึ่งทำให้มีปริมาณอะลูมิเนียมอิสระที่เกิดจากการสึกกร่อนจากชั่วโมงแคโทดมาก (การเดินระบบที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 120 นาที มีปริมาณอะลูมิเนียมอิสระละลาย คำนวณจากกฎฟาราเดย์ ประมาณ 69 มิลลิกรัมต่อลิตร) และผลจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์ยเทสต์ ที่มีการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูเลนต์ ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นอะลูมิเนียมอิสระ ประมาณ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศมีปริมาณอะลูมิเนียมอิสระมากกว่ากระบวนการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์ยเทสต์ ทำให้มีปริมาณอะลูมิเนียมเหลืออยู่ในเฟสของเหลว ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะมีการเวียนอะลูมิเนียมกลับมาใช้ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก

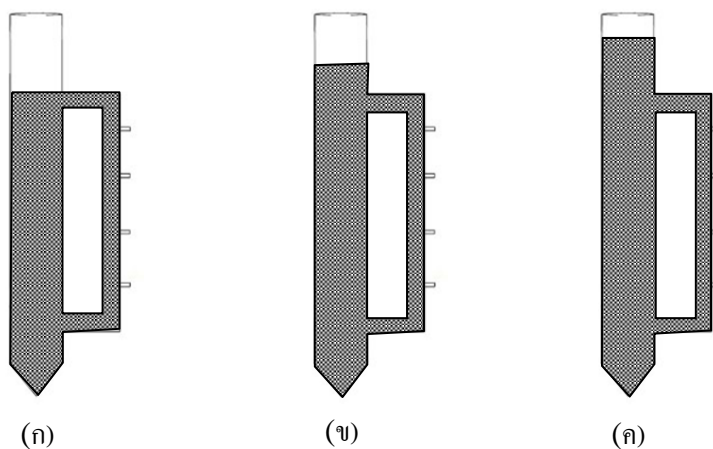
#### 4.3 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก

ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air lift reactor, ALR) โดยทั่วไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวเคมี การหมัก การผลิตเบียร์ ไวน์ การดูดซับก๊าซและการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีข้อม โดยข้อดี คือ มีการเติมอากาศ ทำให้ออกซิเจนไหลวนกลับผ่านช่องหรือส่วนที่บังคับให้น้ำไหลผ่าน การปั่นป่วนของของเหลวภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกจะเกิดจากการเติมอากาศ (Merchuk และ Glux, 2002) ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก สามารถจำแนกตามโครงสร้างของถังปฏิกริยา ได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการไหลวนภายใน และชนิดที่มีการไหลวนภายนอก

การทดลองในส่วนนี้เป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก (External-loop Air lift reactor, ELAR) เนื่องจากเป็นถังปฏิกริยาที่มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนเติมอากาศหรือส่วนที่ทำปฏิกริยา (Riser) และส่วนไม่เติมอากาศ (Downcomer) แยกจากกัน และเชื่อมต่อกันที่บริเวณด้านบนและด้านล่าง เมื่อมีการเติมอากาศในส่วนที่เติมอากาศ อากาศจะทำให้เกิดการปั่นป่วนและยกตัวขึ้นทำให้ระดับน้ำด้านบนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเกิดการไหลวนไปยังส่วนไม่เติมอากาศ โดยของเหลวจะไหลไปตามท่อและเชื่อมเข้ากับถังปฏิกริยาส่วนเติมอากาศ (Merchuk และ Glux, 2002) โดยในงานวิจัยนี้ขอเรียกรวมว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air lift reactor, ALR) เริ่มต้นศึกษาระดับน้ำด้านบนถังปฏิกริยาที่เหมาะสมในการเดินระบบ ดังนี้

#### 4.3.1 การศึกษาระดับน้ำด้านบนถังปฏิกริยา

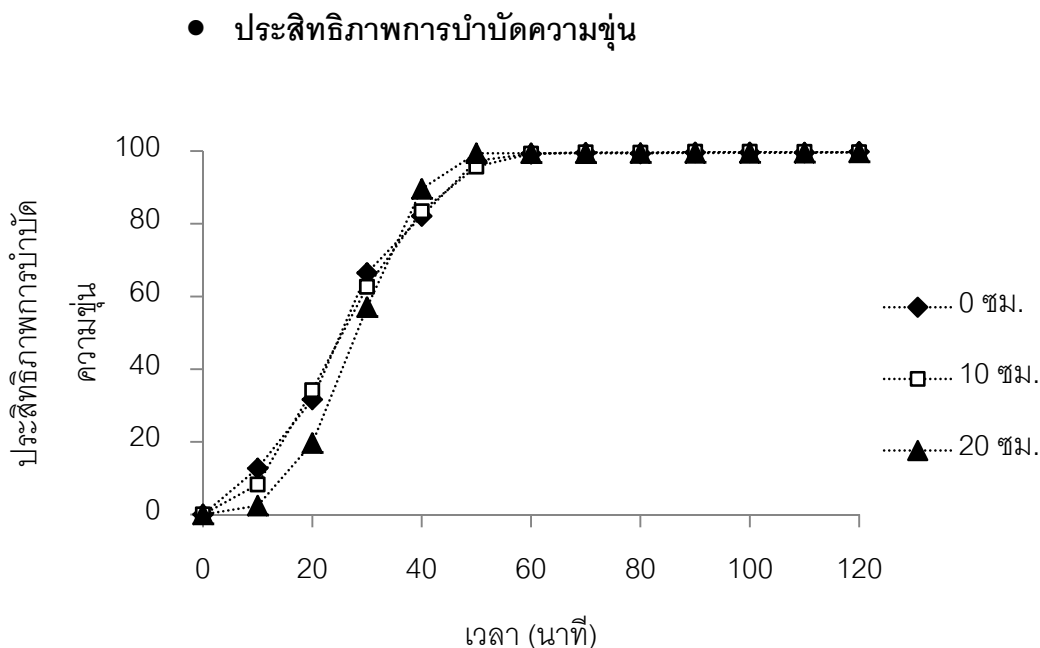
ในการทดลองเป็นการศึกษาบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก (Air-lift reactor, ALR) แบบที่ละเท เพื่อหาระดับน้ำที่เหมาะสม โดยเลือกใช้ระดับน้ำเหนือข้อต่อระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศ จำนวน 3 ระดับ คือ 0 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร และ 20 เซนติเมตร (แสดงดังภาพที่ 4-12) โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า มีการใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร



ภาพที่ 4-13 ระดับน้ำเหนือข้อต่อระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศ

(ก) 0 เซนติเมตร (ข) 10 เซนติเมตร และ (ค) 20 เซนติเมตร



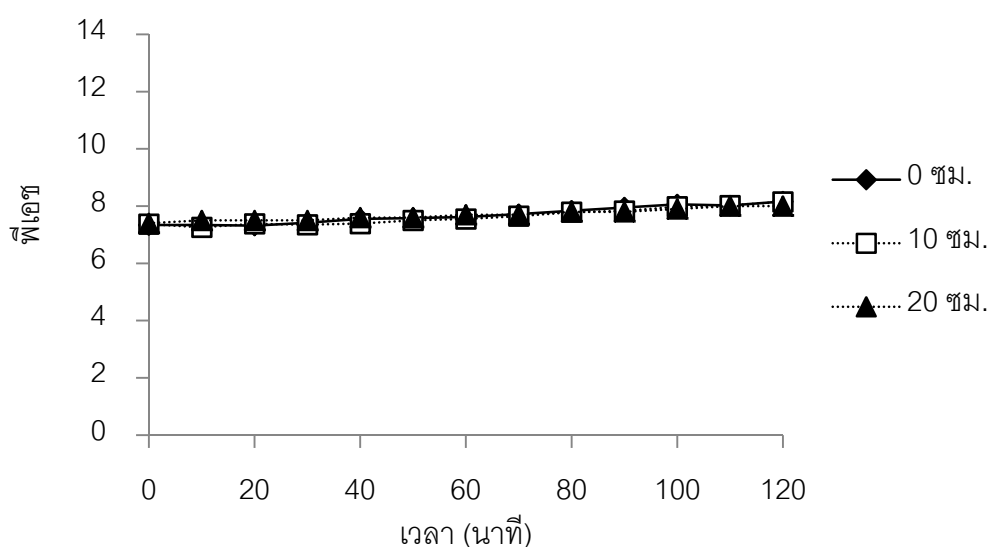


ภาพที่ 4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ที่ระดับน้ำเหนือส่วนไม่เต็มอากาศต่างๆ ในถัง ALR

ระดับน้ำเหนือข้อต่อระหว่างส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ ซึ่งเป็นโซนที่เกิดการแยก (Separation zone) ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Merchuk และ Glux, 2002) โดยในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่มีการสะสมของตะกอนที่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จนทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นน้ำและตะกอนที่เกิดขึ้น จากภาพที่ 4-14 พบว่า ระดับน้ำเหนือข้อต่อระหว่างส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ (0 10 และ 20 เซนติเมตร) ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด คือ ที่เวลาเดินระบบ 60 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดของทุกระดับน้ำ คือ 99 เปอร์เซ็นต์ แต่มีผลต่อปริมาณของน้ำเสียที่ใช้ทำปฏิกริยา ซึ่งมีผลต่อระยะเวลาที่เก็บน้ำและพื้นที่ในการสะสมตัวของตะกอนด้านบนผิวน้ำ โดยระดับน้ำเหนือข้อต่อที่สูงขึ้น ทำให้น้ำเสียมีปริมาตรสูงขึ้น จึงเป็นผลให้ระยะเวลาในการกักน้ำ (residence time) สูงขึ้นด้วย (Essadki และคณะ, 2008) และระดับน้ำเหนือส่วนไม่เต็มอากาศที่มากขึ้น เป็นการเพิ่มพื้นที่การสะสมตัวของชั้นตะกอน โดยเมื่อเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จะเกิดการห่อหุ้มของอนุภาคน้ำมันด้วยผลึกของ  $Al(OH)_3$  เกิดเป็นตะกอน (หรือฟล็อก) ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยก๊าซไฮโดรเจน จึงทำให้ความหนาของการสะสมตัวของชั้นตะกอนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระดับน้ำเท่ากับส่วนไม่เต็มอากาศ (ระดับ 0 เซนติเมตร) ตะกอนด้านบนส่วนเต็มอากาศสามารถเข้ามายังส่วนไม่เต็มอากาศ ทำให้ตะกอนด้านบนมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา แต่เมื่อเพิ่มระดับน้ำเหนือส่วนไม่เต็มอากาศ ระดับ 20 เซนติเมตร ตะกอนที่เกิดขึ้นจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำในส่วนเต็มอากาศ เกิดการแยกชั้นตะกอนและเฟส

ของเหลว โดยมีเฉพาะเฟสของเหลวไหลวนเข้าสู่ส่วนไม่เต็มอากาศเต็มอากาศ ดังนั้น ในการศึกษาในถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกต่อไป จึงเลือกใช้ระดับน้ำเหนือข้อต่อระหว่างส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ คือ 20 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ระบบมีระยะเวลาในการกักน้ำสูงสุดและมีพื้นที่ในการสะสมตัวของตะกอนมากที่สุด

● พีเอช (pH) ที่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4-15 พีเอชที่เปลี่ยนแปลง ที่ระดับน้ำเหนือส่วนไม่เต็มอากาศต่างๆ ในถึง ALR

ภาพที่ 4-15 แสดง พีเอชที่เปลี่ยนแปลง เมื่อระดับน้ำเหนือข้อต่อระหว่างส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ มีการเปลี่ยนแปลง พบว่า พีเอชที่เปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ 0 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร และ 20 เซนติเมตร อยู่ในช่วง 7-8 จะเห็นได้ว่าพีเอชเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาตรของน้ำเสียภายในถึงปฏิกิริยามีปริมาตรสูง (13-15 ลิตร) ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ที่เกิดจากขั้วแคโทด จึงไม่ส่งผลให้พีเอชเปลี่ยนแปลง

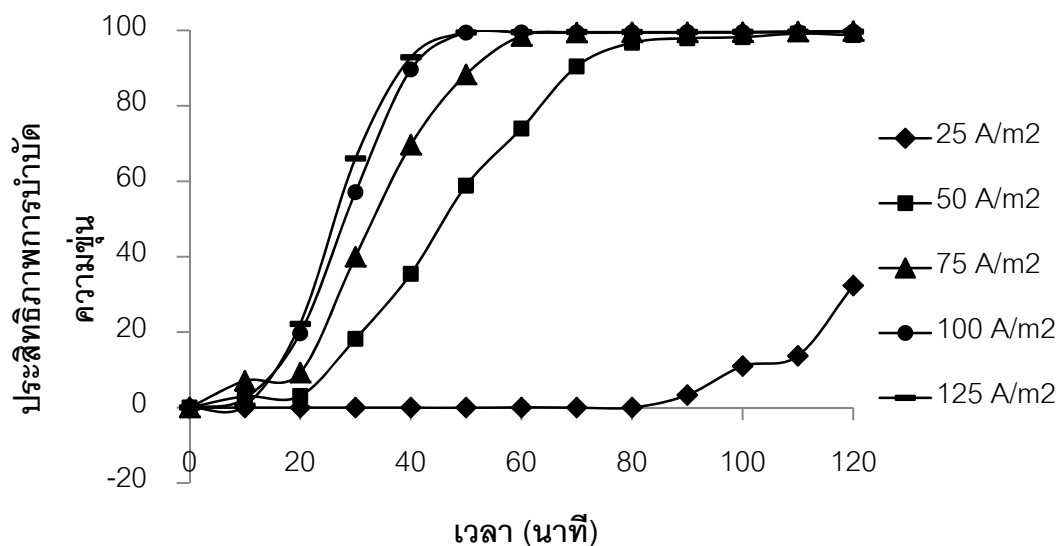
จากการทดลองในข้างต้นได้สภาวะที่เหมาะสม คือ การเลือกใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่นที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร โดยวางที่ตำแหน่งเหนือกันถึงปฏิกิริยา 30 เซนติเมตร และระดับน้ำของถึงปฏิกิริยาอยู่เหนือข้อต่อระหว่างส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ 20 เซนติเมตร โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด จากการเปรียบเทียบผลของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนและการทำให้ลอยในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (ปริมาตร 12 ลิตร) และแบบอากาศยก (ปริมาตร 15 ลิตร) ซึ่งจะเห็นว่า

ปริมาณของถังปฏิกริยาทั้งสองแตกต่างกัน จึงมีผลต่อระยะเวลาพัก อัตราการเกิดปฏิกริยา ความหนาแน่นของประจุของอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำ รวมไปถึงการกวนผสมภายในถังปฏิกริยา ดังนั้นจึงต้องมีการเปรียบเทียบพารามิเตอร์อื่นๆ เพื่อใช้ในการพิจารณาควบคู่กันไปด้วย

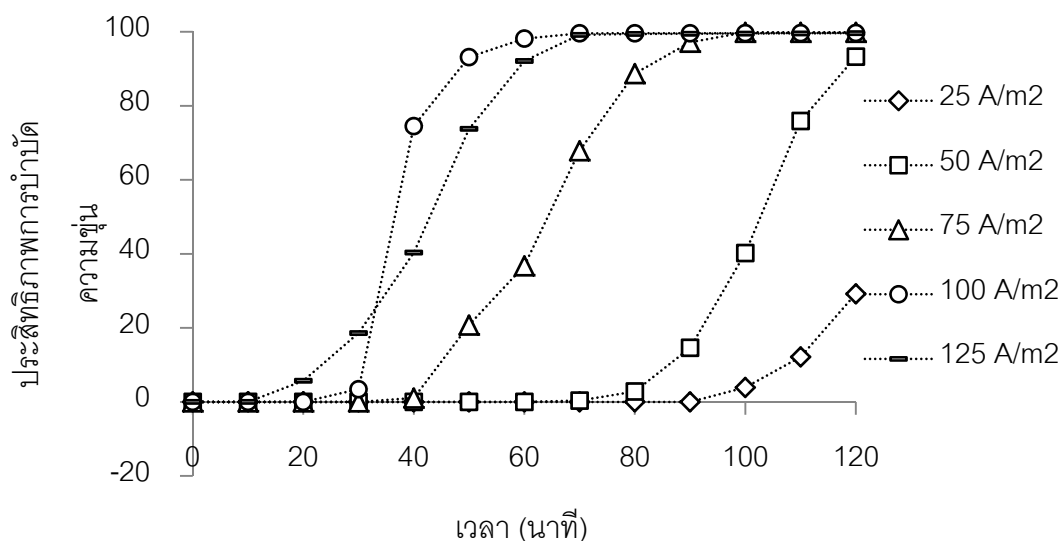
#### 4.4 การเปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

##### 4.4.1 การศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการและประสิทธิภาพการบำบัดภายในถังปฏิกริยา ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ 25 50 75 100 และ 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column reactor) เทียบกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air-lift reactor) โดยการเดินระบบแบบที่ละเท แสดงในภาพที่ 4-16 และ 4-17



ภาพที่ 4-16 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ



ภาพที่ 4-17 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

จากภาพที่ 4-16 และ 4-17 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก มีแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดเหมือนกัน คือ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพและอัตราการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเดินระบบ เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปยังขั้วไฟฟ้า จะทำให้ขั้วไฟฟ้า ในขั้วแอโนดเกิดการกัดกร่อน ละลายไอออนของสารโคแอกกูแลนต์ ( $Al^{3+}$ ) และเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทดเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ ( $Al^{3+}$ ) มีโอกาสในการทำปฏิกริยากับอนุภาคของน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เกิดเป็นตะกอนฟลอค  $Al(OH)_3$  ในการห่อหุ้มอนุภาคของน้ำมันเพื่อแยกอนุภาคของน้ำมันออกจากน้ำเสียได้มากขึ้น โดยการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกต้องการเวลาในการเดินระบบนานกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ เนื่องจากปริมาตรของน้ำเสียในถังปฏิกริยาที่แตกต่างกัน (ทำให้ปริมาณของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ) โดยถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ มีปริมาตรของน้ำเสีย 12 ลิตร และถังปฏิกริยาแบบอากาศยก มีปริมาตร 15 ลิตร ซึ่งในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีปริมาตรของน้ำเสียมากกว่านั้นเนื่องจากมีส่วนที่ไม่เติมอากาศ (Downcomer) เชื่อมต่ออยู่ด้านข้างของถังปฏิกริยา เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองจึงทำการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกริยาของถังปฏิกริยาทั้งสองชนิด

การงานวิจัยนี้หาอันดับการเกิดปฏิกริยา ด้วยวิธี Differentiation ในถังปฏิกริยาแบบทีละเท (Batch reactor) จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกริยา (Reaction rate)

กับความเข้มข้นของของสาร (Concentration) โดยที่ไม่จำเป็นต้องทำการอินทิเกรตเนื่องจากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท่นั้น บอกให้สามารถทราบถึงอัตราเร็วการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อหน่วยเวลา ในการนี้จึงจำเป็นต้อง Differentiate ข้อมูลเพื่อหาค่า  $\frac{dC_A}{dt}$  ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จากนั้น นำค่าเหล่านั้นมาพล็อตกราฟ และหาสมการของเส้นกราฟดังกล่าวเพื่อหาค่าคงที่ (k) และลำดับ (n) ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยแนวทางการวิเคราะห์แสดงไว้ในสมการ (4-3) รวมถึงสามารถคำนวณหาค่าลำดับของปฏิกิริยาได้จากสมการ (4-4)

$$r = \frac{dC}{dt} = -kC^n \quad (4-3)$$

$$\frac{dC_1}{dt} = -kC_1^n$$

$$\frac{dC_2}{dt} = -kC_2^n$$

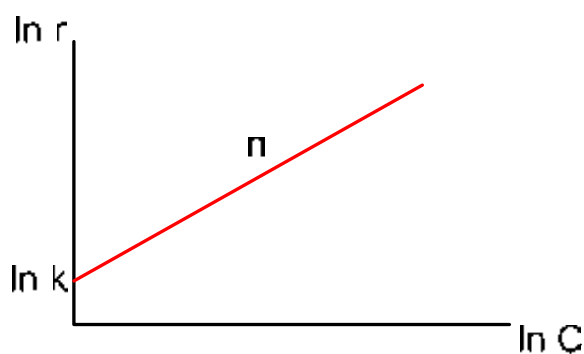
$$n = \frac{\log\left(-\frac{dC_1}{dt}\right) - \log\left(-\frac{dC_2}{dt}\right)}{\log C_1 - \log C_2} \quad (4-4)$$

นอกจากนี้ อาจประยุกต์ใช้การจัดรูปสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาในการวิเคราะห์ กล่าวคือ

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

$$\ln(-r) = \ln(k) + n \cdot \ln(c) \quad (4-5)$$

ดังนั้น ในกรณีนี้ทำการพล็อตกราฟระหว่างเทอม  $\ln(-r)$  และเทอม  $\ln(C)$  จะได้ลักษณะของเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ n และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\ln(k)$  ดังนั้น สามารถหาค่าคงที่ (k) และลำดับ (n) ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้จากแนวทางข้างต้นดังแสดงในภาพที่ 4-18 (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2555)



ภาพที่ 4-18 กราฟแสดงการหาค่าอันดับปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (k)

เมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร วางขั้วไฟฟ้าอยู่เหนือกันถึงปฏิกิริยา 30 เซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ โดยลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) แสดงในตารางที่ 4-5

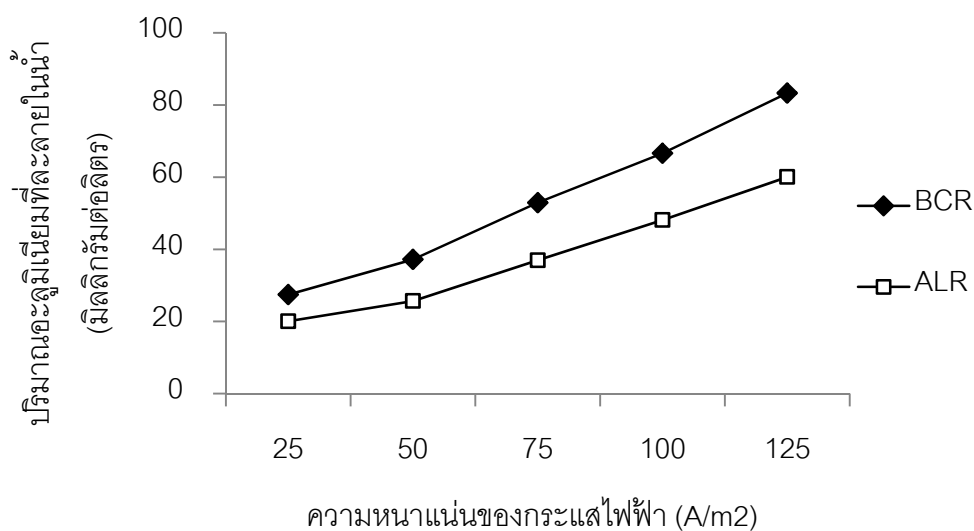
ตารางที่ 4-5 ลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

Current density	BCR			ALR		
	k (min <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup>	k (min <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup>
25 A/m <sup>2</sup>	0.05 x10 <sup>-3</sup>	1.74	0.9656	0.05 x10 <sup>-3</sup>	1.74	0.9743
50 A/m <sup>2</sup>	4.43 x10 <sup>-3</sup>	1.25	0.9971	0.68 x10 <sup>-3</sup>	1.48	0.7974
75 A/m <sup>2</sup>	6.30 x10 <sup>-3</sup>	1.28	0.9919	1.87 x10 <sup>-3</sup>	1.39	0.9231
100 A/m <sup>2</sup>	6.58 x10 <sup>-3</sup>	1.31	0.9907	6.53 x10 <sup>-3</sup>	1.28	0.9922
125 A/m <sup>2</sup>	6.85 x10 <sup>-3</sup>	1.31	0.9917	5.90 x10 <sup>-3</sup>	1.27	0.9886

จากตารางที่ 4-5 สามารถสรุปได้ว่า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก อันดับของการเกิดปฏิกิริยา มีความเข้าใจเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศมีค่ามากกว่าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศจะทำให้มีอัตราการบำบัดที่เร็วกว่าในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) เดียวกัน

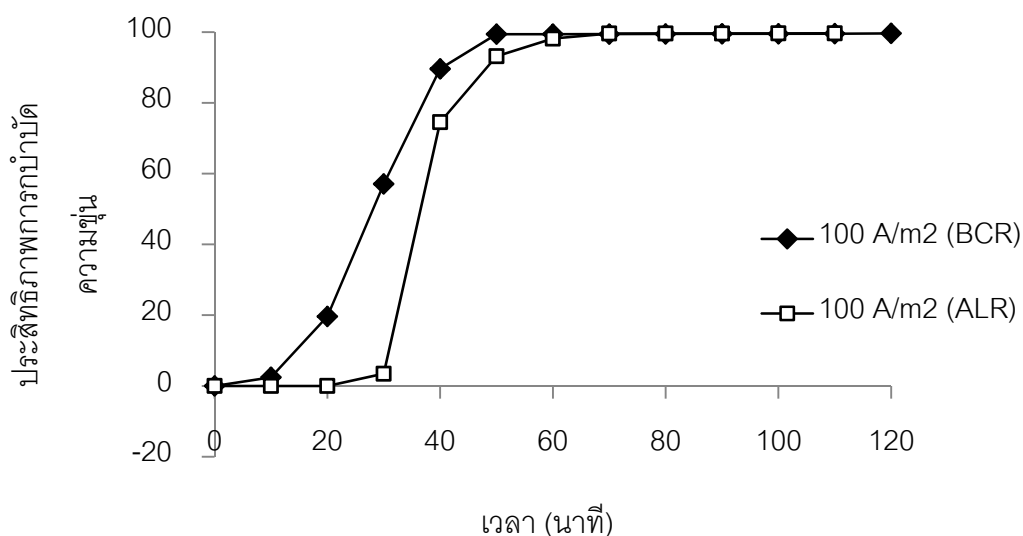
แต่เมื่อพิจารณาพิจารณาปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำ เมื่อเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศขนาด 12 ลิตร และถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกขนาด 15 ลิตร เป็นเวลา 120 นาที ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 25 50 75 100 และ 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (แสดงในภาพที่ 4-18) พบว่า ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ มีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายอยู่ในน้ำ คือ 27 37 57 67 และ 83 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก มีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายอยู่ในน้ำ คือ 20 26 37 48 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้น ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) และสอดคล้องกับงานวิจัยที่เคยศึกษามาก่อนหน้านี้ (Adhoum และ Monser, 2004 และ Bensadok, และคณะ 2008) โดยในถัง

ปฏิกิริยาแบบอากาศยกมีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายอยู่ในน้ำน้อยกว่าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ ในทุกๆ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กับค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่น้อยกว่าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ

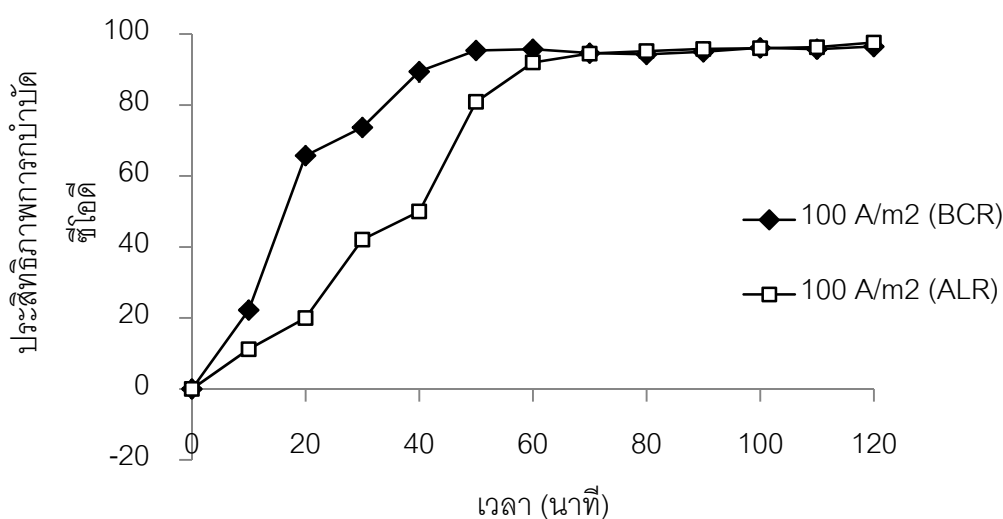


ภาพที่ 4-19 ปริมาณ  $Al^{3+}$  ที่ละลายในน้ำ ในถังปฏิกิริยาฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ

จากภาพที่ 4-16 4-17 และตารางที่ 4-5 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100-125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ประสิทธิภาพการบำบัดและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานมากกว่าการใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก สามารถแสดงได้ดังภาพ ที่ 4-20



ภาพที่ 4-20 ประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่มชื้น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 100 แอมแปร์ ต่อตารางเมตร โดยการเดินระบบในถังปฏิบัติการแบบพองอากาศและแบบอากาศยก



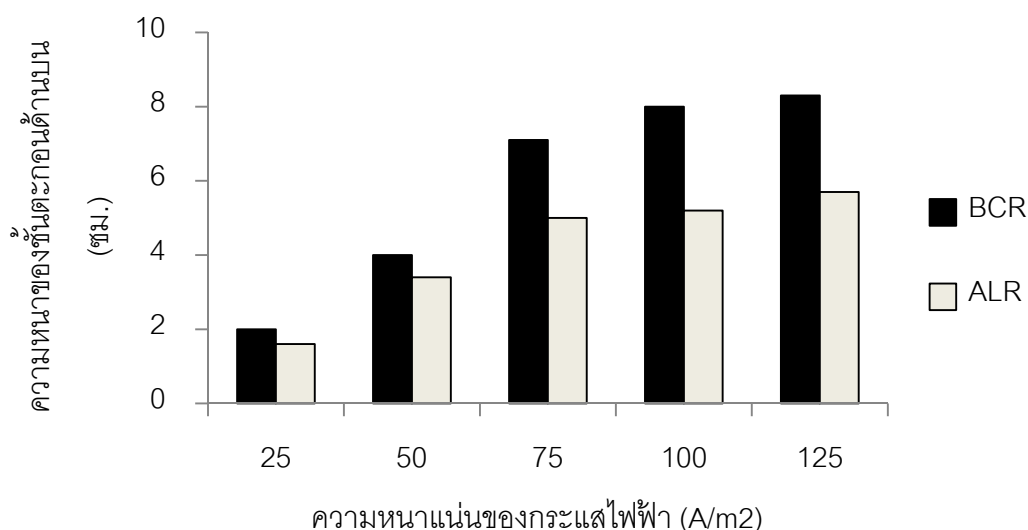
ภาพที่ 4-21 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 100 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร โดยการเดินระบบในถังปฏิบัติการแบบพองอากาศและแบบอากาศยก

จากภาพที่ 4-20 และ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่มชื้นและซีไอดี โดยการศึกษารวมตะกอนด้วยไฟฟ้าภายในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกและพองอากาศ แบบที่ละเท ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร วาง



ชั่วไฟฟ้าเหนือกั้นถึงปฏิกิริยา 30 เซนติเมตร และให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า คือ 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ผลการทดลอง พบว่า

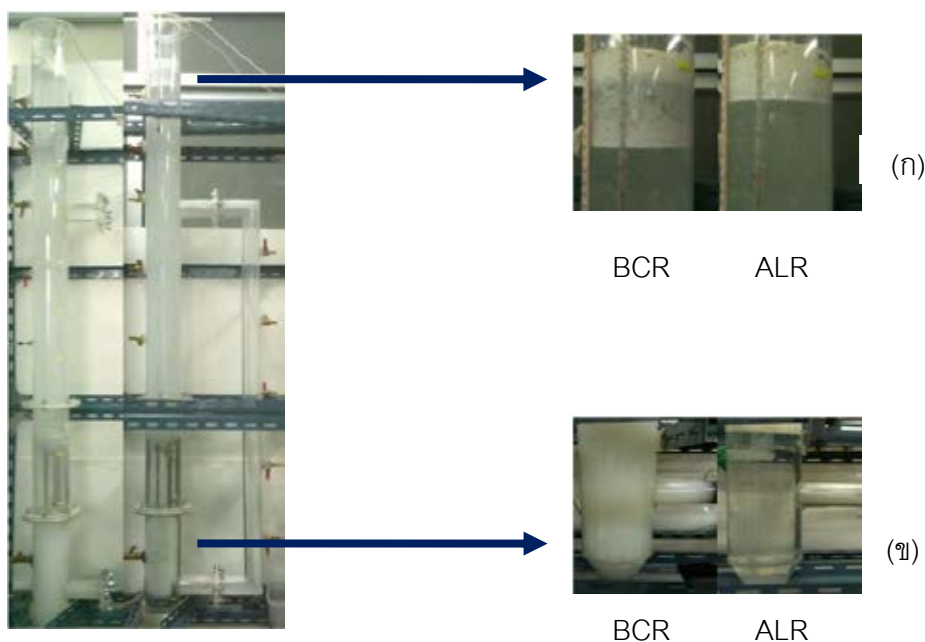
ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก สามารถแบ่งการพิจารณาออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก เป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (Reactive phase) จะเห็นได้จากประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างรวดเร็ว สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากช่วงแรกเป็นช่วงที่มีปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันสูง อีออน  $Al^{3+}$  สามารถเข้าไปทำลายเสถียรภาพและรวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ (Floc) ได้ง่าย ประกอบกับฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำให้เกิดการกวนผสมและพาฟล็อกลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้อย่างรวดเร็ว หลังจากการนั้นเป็นช่วงที่เกิด สภาวะคงที่ (steady phase) โดยจะเกิดหลังจากการเดินระบบไปแล้ว 60 นาที ซึ่งจะเป็นช่วงที่ประสิทธิภาพการบำบัดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคน้ำมันในภายในถังปฏิกิริยาเหลืออยู่น้อย จึงทำให้ปริมาณการสลายตัวของชั่วไฟฟ้าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด (Ichikawa และคณะ 2004) จากภาพที่ 4-20 และ 4-21 โดยในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว การเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก และเมื่อเดินระบบเป็นเวลา 60 นาที จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน คือ 99 เปอร์เซ็นต์ และให้ประสิทธิภาพการบำบัดจะคงที่จนเดินระบบ 120 นาที



ภาพที่ 4-22 ความหนาแน่นของชั้นตะกอนด้านบนถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ

เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นตะกอนด้านบนของถังปฏิกริยา ภาพที่ 4-22 พบว่า การเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก มีความหนาของชั้นตะกอนด้านบนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณอิออนของสารโคแอกกูแลนต์ ( $Al^{3+}$  ions) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการทำให้ละลายเสถียรภาพของน้ำมันในปริมาณที่มาก และลอยขึ้นจากฟองก๊าซไฮโดรเจน จะเกิดการสะสมตัวของปริมาณตะกอนหรือสไลด์ส์ในปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า พบว่า ตะกอนด้านบนที่เกิดจากการทำปฏิกริยาในถังแบบอากาศยกมีความหนาแน่นมากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ เนื่องจากภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีการหมุนวนของของเหลวภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกให้ภายในส่วนที่เดิมอากาศ (ส่วนที่ทำปฏิกริยาของถังปฏิกริยา) มีความเร็วของน้ำเพิ่มมากขึ้น เกิดการดันตัวของตะกอนให้มีการอัดแน่นขึ้น เป็นผลให้ชั้นตะกอนด้านบนของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีความหนาน้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาตะกอนด้านบนและด้านล่างของถังปฏิกริยาพบว่า ด้านล่างถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ใต้ขั้วไฟฟ้า ยังมีน้ำเสียสังเคราะห์ที่ยังไม่ผ่านการบำบัด แสดงในภาพที่ 4-23(ข) รวมถึงความหนาของชั้นตะกอนด้านบน ภาพที่ 4-23(ก) ของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศที่สูงกว่าในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ส่งผลให้เมื่อเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศจะต้องมีการกำจัดตะกอนที่มีในปริมาณที่มากกว่าในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก



ภาพที่ 4-23 ตะกอนด้านบน(ก) และด้านล่าง(ข)ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

จากผลการทดลองในข้างต้น พบว่าการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันในด้านอัตราการเกิดปฏิกริยา ความหนาของชั้น ตะกอนด้านบนและน้ำเสียได้ขั้วไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ ควบคู่ไปด้วย เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก รวมถึงความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานจริง

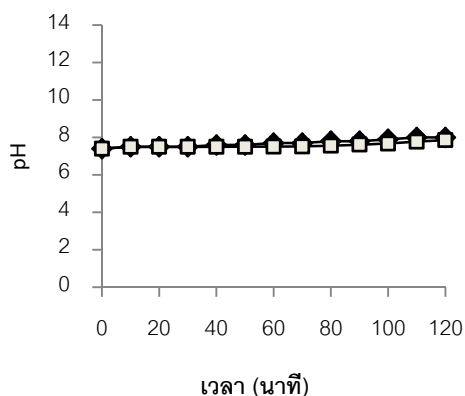
#### 4.4.2 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันหลาย ประการ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาของฟลอค ภายในถังปฏิกริยา (Sludge thicknesses) ลักษณะของน้ำเสียได้ขั้วอิเล็กโทด (Wastewater) พีเอชที่เปลี่ยนแปลง (pH) ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลง (Temperature) และการใช้พลังงาน (Power consumption) ของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก เป็นต้น

โดยจากภาพที่ 4-24 แสดงการเปรียบเทียบการศึกษผลของพารามิเตอร์ต่างๆ จากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกและฟองอากาศ แบบ ทีละเท โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร วางขั้วไฟฟ้าเหนือ ก้นถังปฏิกริยา 30 เซนติเมตร และให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า คือ 100 แอมแปร์ต่อตาราง เมตร พบว่า

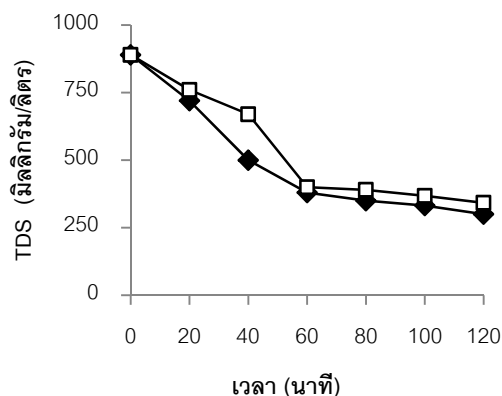
- **พีเอช (pH) ที่เปลี่ยนแปลง**

เมื่อพิจารณาพีเอชที่เปลี่ยนแปลงหลังจากทำปฏิกริยาในถังปฏิกริยาทั้ง 2 รูปแบบ พบว่า พีเอชไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7-8 แสดงในภาพที่ 4-24(ก) เนื่องจากปริมาณของน้ำเสียภายในถังปฏิกริยามีปริมาณสูง (12 ลิตร และ 15 ลิตร สำหรับถัง ปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ตามลำดับ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) ที่เกิดจากขั้ว แคโทดจึงไม่ส่งผลทำให้พีเอชของน้ำเสีย



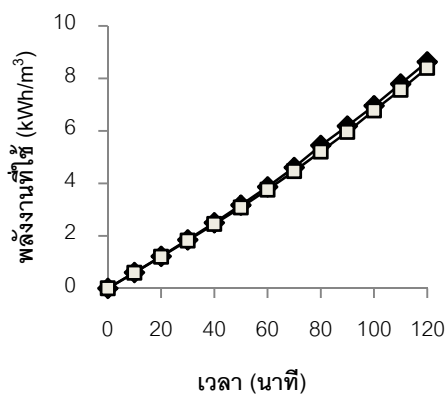
◆ 100 A/m2 (BCR) □ 100 A/m2 (ALR)

(ก) พีเอชที่เปลี่ยนแปลง



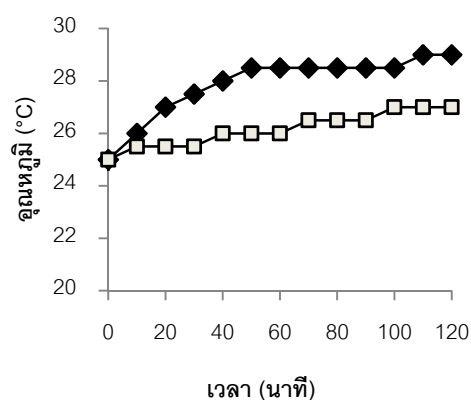
◆ 100 A/m2 (BCR) □ 100 A/m2 (ALR)

(ข) ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS)



◆ 100 A/m2 (BCR) □ 100 A/m2 (ALR)

(ค) พลังงานที่ใช้



◆ 100 A/m2 (BCR) □ 100 A/m2 (ALR)

(ง) อุณหภูมิ (°C)

ภาพที่ 4-24 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก

### ● ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS)

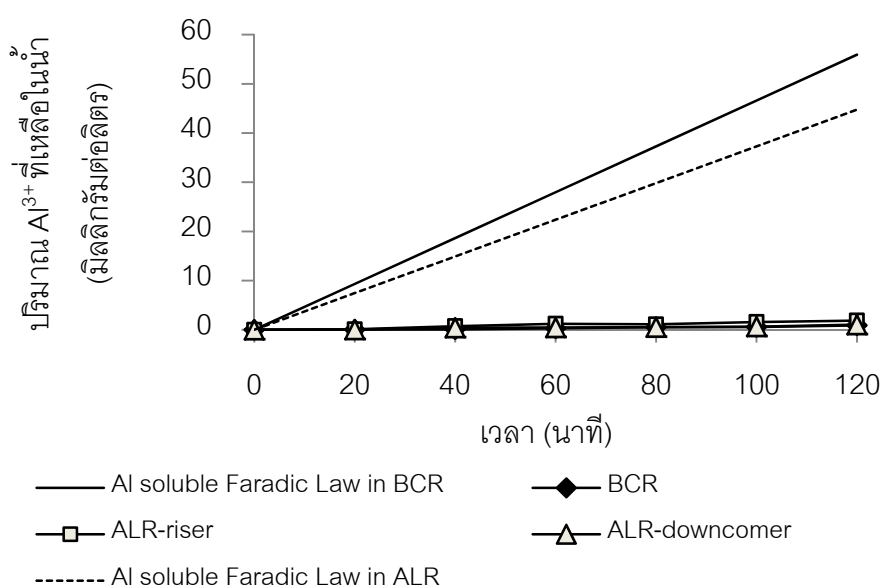
ภาพที่ 4-24 (ข) แสดงผลการศึกษาปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) พบว่า ปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงตามเวลา ในการเดินระบบในถังปฏิกริยาทั้งแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก โดยเริ่มต้นปริมาณของแข็งละลายน้ำที่วัดได้ คือ อุณหภูมิของน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ปริมาณของแข็งละลาย

น้ำที่อยู่ในน้ำเสียลดลง เนื่องจากอนุภาคของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่ในน้ำเสียมีปริมาณลดลง จากการถูกทำลายเสถียรภาพและเกิดเป็นฟlocsตกตะกอน แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแข็งละลายน้ำ ภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก พบว่า ปริมาณของแข็งละลายน้ำ ภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีปริมาณมากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการวนกลับของน้ำในส่วนไม่เต็มอากาศของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (liquid recirculation in downcomer) (Merchuk และ Glux, 2002) มีการหมุนวนอะลูมิเนียมออกไซด์กลับมา จึงทำให้มีปริมาณของแข็งละลายน้ำที่มากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

เมื่อศึกษาการละลายปริมาณของไอออนอะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$  ions) ละลายสู่สารละลายนำไฟฟ้า สามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

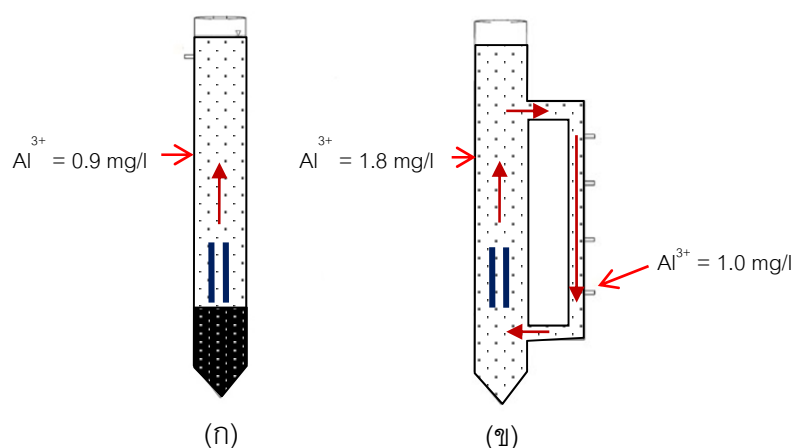
$$W = \frac{I \cdot t \cdot M}{Z \cdot F} \quad (4-6)$$

- โดยที่ W : ปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ, กรัม  
 I : ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง, แอมแปร์  
 M : น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด, กรัมต่อโมล  
 Z : จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกริยารีดอกซ์, ประจุต่อโมล  
 t : เวลาที่ใช้, วินาที  
 F : ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ



ภาพที่ 4-25 ปริมาณ  $Al^{3+}$  ที่ละลายในน้ำ ในถังปฏิกริยาฟองอากาศและแบบอากาศยก

ภาพที่ 4-5 แสดงปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายลงสู่สารละลายซึ่งคำนวณจากกฎฟาราเดย์ในการเดินระบบโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เป็นเวลา 120 นาที การเดินระบบในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศและอากาศยก มีอะลูมิเนียมประมาณ 56 และ 44 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่เมื่อทำการวัดปริมาณอะลูมิเนียมที่เหลือในน้ำจากวิธี  $N_2O-C_2H_2$  Flame Atomic Atomic Absorption Spectrophotometry มีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำในส่วนเติมอากาศของถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ คือ 0.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำในส่วนเติมอากาศและไม่เติมอากาศของถังปฏิบัติการแบบอากาศยก คือ 1.8 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งอะลูมิเนียมที่หายไปอาจเกิดจากการไปทำลายเสถียรภาพของน้ำมัน บางส่วนเกิดผลึกกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดจากขั้วแคโทด แล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นฟลอคแล้วลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งจะมีอะลูมิเนียมบางส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ภายในน้ำ โดยเมื่อเปรียบเทียบอะลูมิเนียมที่ละลายในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศและอากาศยก พบว่า ในส่วนที่เติมอากาศของถังปฏิบัติการแบบอากาศยกมีอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำมากกว่าในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ และพบอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำในส่วนที่ไม่เติมอากาศ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า มีการไหลวนกลับของสารโคแอกกูแลนต์ ( $Al^{3+}$  ions) กลับเข้าสู่ส่วนเติมอากาศ (riser) ซึ่งเป็นพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของระบบอีกครั้ง (แสดงดังภาพที่ 4-26)



ภาพที่ 4-26 ลักษณะการเคลื่อนที่ของของเหลวใน (ก) ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ และ(ข) ถังปฏิบัติการแบบอากาศยก

● พลังงานที่ใช้ในการเดินระบบ (Power consumption) และอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลง (Temperature)

พารามิเตอร์ต่อไปที่ใช้ในการพิจารณา คือ พลังงานที่ใช้ในการเดินระบบ (ภาพที่ 4-24 (ค)) พบว่า การเดินระบบในถังปฏิริยาแบบอากาศยกใช้พลังงานน้อยกว่าในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ นอกจากนี้การศึกษาอุณหภูมิของน้ำเสียในระหว่างการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อการละลายของอะลูมิเนียมและการสึกกร่อนของขั้วแอโนดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาอุณหภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเวลา และพบว่าอุณหภูมิของของเหลวเมื่อเดินระบบเป็นเวลา 120 นาที ในถังปฏิริยาแบบอากาศยก มีอุณหภูมิของของเหลวระหว่าง (25-27 องศาเซลเซียส) ซึ่งต่ำกว่าการเดินระบบในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ (25-29 องศาเซลเซียส) (ภาพที่ 4-24 (ง)) เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากถังปฏิริยากับอุณหภูมิภายนอก (Merchuk และ Glux, 2002) โดยในการทดลองนี้อุณหภูมิของน้ำเสียน้อยกว่า 35 องศาเซลเซียส จึงไม่มีผลต่อการสึกกร่อนและการละลายของขั้วแอโนด แต่ถ้าในกรณีที่อุณหภูมิของน้ำเสียมากกว่า 35 องศาเซลเซียส จะส่งผลต่อการละลายของอิออนเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการสึกกร่อนของขั้วเพิ่มขึ้น (Chen, 2004) ดังนั้น การเดินระบบในถังปฏิริยาแบบอากาศยกจึงน่าจะมีผลดีในกรณีที่มีการเดินระบบเป็นเวลานาน และทำให้อุณหภูมิของของเหลวเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบถังปฏิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมจำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

	ถังปฏิริยา	
	แบบฟองอากาศ (12 ลิตร)	แบบอากาศยก (15 ลิตร)
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิริยา	120 นาที	120 นาที
ประสิทธิภาพการบำบัด	99 เปอร์เซ็นต์	99 เปอร์เซ็นต์
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	100 A/m <sup>2</sup>	100 A/m <sup>2</sup>
น้ำหนักขั้วหายไป (กรัม)	0.7992	0.7217
ปริมาตรตะกอนด้านบน (มล.)	555	361
ค่าใช้จ่ายรวม (บาทต่อลบม.)	36.76	28.22
ปัญหา	น้ำเสียได้ขั้วไฟฟ้า ไม่ถูกบำบัด	อัตราการบำบัดต่ำกว่า BCR

การศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก โดยแสดงในตารางที่ 4-6 ยังพบว่า การสีกก่อนของขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีการสีกก่อนน้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (จากปริมาณน้ำหนักขั้วที่หายไปมีปริมาณที่น้อยกว่า) ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวนของของเหลวและอิออนของสารโคแอกกูแลนต์ในส่วนไม่เต็มอากาศกลับเข้ามายังส่วนเต็มอากาศ เมื่อพิจารณาปริมาณตะกอนด้านบนถังปฏิกริยาที่น้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ เนื่องจากเมื่อเกิดการหมุนวนของของเหลวจะทำให้ความเร็วของน้ำในส่วนเต็มอากาศเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้ตะกอนด้านบนเกิดการอัดตัวแน่นกว่าในการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ส่งผลให้การเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่น้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

#### 4.4.3 การศึกษาผลของฟังก์ชันการกระจายเรซิดেনซ์ไทม์ (Residence time distribution, RTD) จากการเดินระบบแบบที่ละเท

โดยทั่วไปการพิจารณารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาจะสมมติให้เป็นแบบอุดมคติ (Ideal flow) กล่าวคือ ถ้าเป็นแบบถังกวน (Completely mixed) สารผสมในถังปฏิกริยาจะมีการผสมกันอย่างดี ไม่มีความแตกต่างกันในเรื่องของความเข้มข้น ความเข้มข้นในทุกๆ จุดเท่ากันหมดทั้งถังปฏิกริยา ส่วนถ้าเป็นถังปฏิกริยาแบบท่อไหล (Plug flow) จะคิดว่าไม่มีการผสมกันระหว่างสารผสม ไม่เกิดการแพร่ (Diffusion) หรือ การผสมย้อนกลับ (Back mixing) แต่อย่างไรก็ตามในภาพการเป็นจริง ลักษณะรูปแบบการไหลแบบนี้ไม่เกิดขึ้น และบางครั้งมีการไหลระหว่างแบบกวนและแบบท่อไหล ซึ่งเป็นการไหลแบบไม่อุดมคติ (Nonideal flow) (ดวงกมล ณ ระนอง, 2551)

โดยปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการไหลแบบไม่อุดมคติภายในถังปฏิกริยา คือ การกระจายเรซิดেনซ์ไทม์ (Residence time distribution, RTD) โดยบางกรณีอนุภาคที่ภายในถังปฏิกริยาอาจมีทั้งเข้ามาแล้วออกไปเลย บางอนุภาคก็ติดค้างอยู่ภายในถังปฏิกริยาจึงจะออก ดังนั้นการตรวจสอบว่าของไหลที่ผ่านถังปฏิกริยาเป็นรูปแบบการไหลแบบใดนั้น จะใช้การฉีดเทรซเซอร์ (Tracer) หรือสารติดตาม แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่ทางออก



วัตถุประสงค์ของการทดลองในส่วนนี้จึงเพื่อศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยการใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร และให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากนั้นทำการฉีดโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เพื่อใช้ในการติดตามสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) แบบพัลส์ (Pulse) (Essadki และคณะ, 2011)

สภาพการนำไฟฟ้าของโซเดียมคลอไรด์ที่ทางออก สามารถนำมาวิเคราะห์หาฟังก์ชันการกระจายเวลาดำเนิน (RTD) หรือที่เรียกว่า กราฟ RTD หรือ E-curve หรือ E(t) ได้จากสมการ 4-7

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (4-7)$$

โดย E(t) : สัดส่วนสภาพการนำไฟฟ้าในระยะเวลา t ถึง t+dt

C(t) : สภาพการนำไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ มีหน่วยเป็น ไมโครซีเมนส์ ( $\mu\text{S}$ )

ฟังก์ชัน E(t) มีคุณสมบัติที่สามารถนำมาคำนวณหาค่าเวลาดำเนินเฉลี่ย (Mean residence time,  $\tau$ ) หรือเวลาที่เทรซเซอร์ใช้เวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์โดยเฉลี่ย และความแปรปรวน (Variance,  $\sigma_t^2$ ) ของการกระจายตัวของกราฟ E(t) ได้ดังสมการ 4-8 และ 4-9

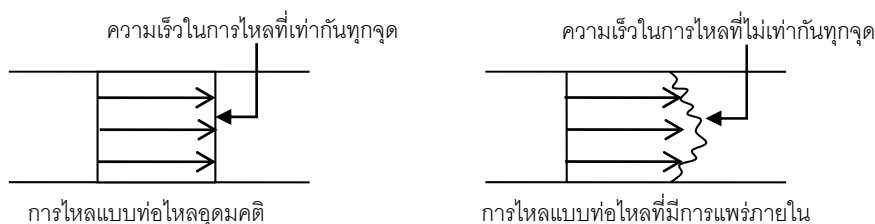
$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (4-8)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \tau)^2 \cdot C(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 \cdot C(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} - \tau^2 \quad (4-9)$$

กราฟ RTD ที่ได้จากการฉีดเทรซเซอร์นั้นมีหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์แบบไม่อุดมคติ โดยในการทดลองนี้จะใช้แบบจำลองการแพร่แนวแกนท่อ (Axial dispersion model) และแบบจำลองถังกวนต่ออนุกรม (Tanks in series model)

### 1. แบบจำลองการแพร่แนวแกนท่อ (axial dispersion model)

ของไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบท่อไหลอุดมคติ โดยทั่วไปจะกำหนดให้ความเร็วของของไหลตามแนวแกนและความเข้มข้นเท่ากัน แต่ในสภาพความเป็นจริง ความเข้มข้นจะไม่เท่ากันเนื่องจากแรงขับเคลื่อน (Driving force) ของการผสมกลับ (Back mixing) ตามแนวแกนท่อ



ภาพที่ 4-27 การไหลภายในท่อไหลแบบอุดมคติและแบบที่มีการแพร่ภายในแนวแกนท่อ (Levenspiel, 1999)

ถ้าการแพร่เกิดขึ้นเฉพาะตามแกนท่อ โดยไม่เกิดตามรัศมีท่อ เรียกว่า การแพร่ตามแนวแกนท่อ (Axial dispersion) และใช้สัญลักษณ์  $D_z$  เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่แนวแกนท่อ (Axial dispersion coefficient)

โดยสมการแพร่แนวแกนท่อ สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4-10)$$

เมื่อ  $z$  : ระยะทางตามแนวแกน  $z$   
 $U$  : ความเร็วในการไหล

จากสมการที่ 4-10 สามารถทำให้อยู่ในฟังก์ชัน  $E(t)$  คือ

$$E(t) = \sqrt{\frac{Pe}{4\pi \cdot \tau \cdot t}} \exp\left[\frac{-(\tau - t)^2 Pe}{4 \cdot \tau \cdot t}\right] \quad (4-11)$$

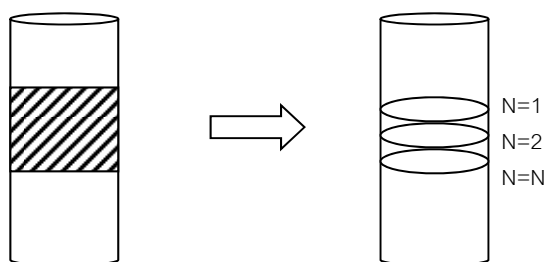
โดยที่  $Pe$  เรียกว่า Peclet number ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ มีนิยามดังนี้

$$Pe = \frac{uL}{D_z} = \frac{\text{convective flux}}{\text{dispersed flux}} \quad (4-12)$$

ในกรณีที่  $Pe$  มีค่ามาก ( $Pe \rightarrow \infty$ ) นั้นหมายความว่า  $D_z$  มีค่าน้อย หรือเป็นการไหลที่เข้าใกล้การไหลแบบท่อไหลอุดมคติ ถ้า  $Pe$  มีค่าน้อย ( $Pe \rightarrow 0$ ) นั้นหมายความว่า  $D_z$  มีค่ามาก ถือว่าการไหลนี้ใกล้กับการไหลแบบถังกวนอุดมคติ

## 2. แบบจำลองถังกวนอนุกรม (tanks in series model)

ถังปฏิกริยาแบบไม่อุดมคติ สามารถจำลองให้เข้าใกล้กับถังปฏิกริยาแบบอุดมคติได้โดยสมมติให้เป็นถังปฏิกริยาแบบถังกวนอุดมคติที่มีปริมาตร  $V$  เท่ากัน จำนวน  $N$  ถังต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน



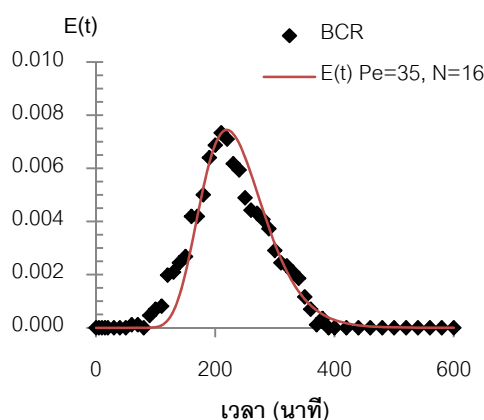
ภาพที่ 4-28 การไหลภายในท่อไหลแบบอุดมคติที่เข้าใกล้กับถังปฏิกริยาแบบถังกวนอุดมคติ  $N$  ถัง

ฟังก์ชัน  $E(t)$  สามารถนำมาคำนวณหาจำนวนถังกวนแบบอนุกรม ได้จากสมการ ดังนี้

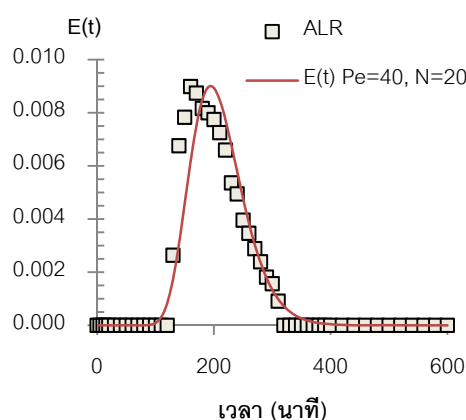
$$E(t) = \left(\frac{N}{\tau}\right)^N \cdot \frac{t^{N-1}}{(N-1)!} \exp\left[-\frac{N \cdot t}{\tau}\right] \quad (4-13)$$

หลังจากการติดตามสภาพการนำไฟฟ้าของโซเดียมคลอไรด์ที่ทางออก แล้วนำมาวิเคราะห์หาฟังก์ชัน  $E(t)$  ของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและอากาศยก แบบที่ละเท โดยการให้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร และให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยการเดินระบบแบบที่ละเทและไม่มีการให้น้ำเข้า การวิเคราะห์รูปแบบการไหลโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายเรชีเดนซ์ไทม์ในส่วนที่เติมอากาศ (riser) ของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (แสดงในภาพที่ 4-29) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าเท่ากัน ค่าเรชีเดนซ์ไทม์เฉลี่ย ( $\tau$ ) ที่ได้จากฟังก์ชัน  $E(t)$  ในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีค่ามากกว่าถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

เนื่องจาก ในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก มีการหมุนวนของของเหลวทำให้ในส่วนเดิมอากาศของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีความเร็วของของเหลวที่มากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ รวมไปถึงเลขเพคเลต์ (Pe) และจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) ของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีค่ามากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก มีค่า  $Pe = 40$ ,  $N = 20$  และถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ มีค่า  $Pe = 35$ ,  $N = 16$ ) จากผลการทดลองสรุปได้ว่า รูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มเป็นรูปแบบการไหลแบบท่อไหล (Plug flow) โดยในส่วนเดิมอากาศของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีแนวโน้มเข้าใกล้รูปแบบการไหลแบบท่อไหลมากกว่าถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ จากรูปแบบการไหลแบบท่อไหลของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกทำให้ระบบมีความสามารถในการกวนผสมระหว่างอนุภาคน้ำมันและอะลูมิเนียมออกไซด์ในบริเวณที่เกิดปฏิกริยาสูง และสัมพันธ์กับประสิทธิภาพที่ได้จากถังปฏิกริยาทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์



(ก) ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ



(ข) ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

ภาพที่ 4-29 ฟังก์ชัน RTD ในการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและอากาศยก แบบที่ละเท

จากการศึกษาในข้างต้น พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด คือ อีออนของสารโคแอกกูแลนต์ที่ได้จากขั้วแอโนดและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแล้ว สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ฟองอากาศที่เกิดจากขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้การศึกษาในหัวข้อต่อ

#### 4.5 การศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและเฟสของเหลว

จากการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ตัดข้างต้น จะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัด คือ ฟองก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$  bubble) ที่เกิดจากขั้วแคโทด ดังนั้น สิ่งที่ต้องทำความเข้าใจต่อไป คือ ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และเฟสของเหลว ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาขนาดของฟองอากาศ ( $d_B$ ) ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) และค่าความเร็วในของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ ( $U_{LD}$ )

##### 4.5.1 การศึกษาขนาดของฟองอากาศ ( $d_B$ )

การวัดขนาดของฟองอากาศ ของขั้วอะลูมิเนียม มีระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ (25 50 75 100 และ 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) เตินระบบในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) จากนั้นเก็บภาพด้วยกล้องความเร็วสูงความเร็ว 100 ภาพต่อวินาที (Basler camera) และทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยชุดคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ภาพถ่าย (Photron FASTCAM Viewer) ได้ค่าขนาดของฟองก๊าซ ( $D_B$ ) แสดงได้ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ขนาดของฟองอากาศจากขั้วอะลูมิเนียม ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

ขั้วไฟฟ้า	ขนาดฟองอากาศ (mm)				
	ที่ 25 A/m <sup>2</sup>	ที่ 50 A/m <sup>2</sup>	ที่ 75 A/m <sup>2</sup>	ที่ 100 A/m <sup>2</sup>	ที่ 125 A/m <sup>2</sup>
BCR	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32
ALR	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32

จากตารางที่ 4-7 ขนาดของฟองก๊าซ ( $D_B$ ) จากขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ 25 50 75 100 และ 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าแก่ระบบทำให้อัตราการเกิดฟองอากาศเพิ่มขึ้น แต่ขนาดของฟองอากาศมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย ซึ่งมีประโยชน์ในด้านการกวนผสมและการกำจัดมลสารในน้ำโดยการทำให้ลอยด้วยฟองก๊าซไฮโดรเจน (Umran และคณะ, 2009) จะเห็นได้ว่าฟองอากาศจากกระบวนการรวม

ตะกอนทางไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดนั้นมีขนาดเล็ก (0.3 มิลลิเมตร) เมื่อเทียบกับขนาดของฟองอากาศที่ได้จากอุปกรณ์สร้างฟองอากาศชนิดต่างๆ เช่น หัวเติมอากาศแบบแข็ง (Rigid diffuser) หรืออุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น (Flexible membrane diffuser) ซึ่งมักทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร (สุรารักษ์ อวนฉนวน, 2552)

#### 4.5.2 การศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a)

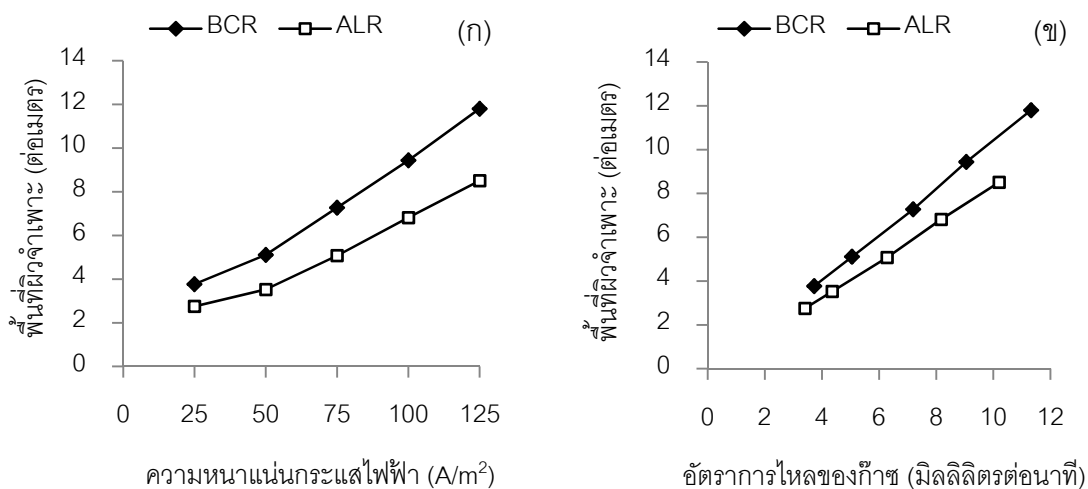
ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area, a) ถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยรวม ในกรณีของค่า a สูงขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมัน นั่นคือทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นด้วย (Painmanakul และคณะ, 2005) ทำได้โดยการนำค่าขนาดของฟองอากาศที่วัดได้มาคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะได้จากสมการดังนี้

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} = \frac{6 \cdot Q_G}{\pi \cdot D_B^3} \quad (4-14)$$

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} \quad (4-15)$$

$$S_B = \pi d_B^2 \quad (4-16)$$

เมื่อ	a	:	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (interfacial area), ต่อเมตร
	A	:	พื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกรณ์, ตารางเมตร
	d <sub>B</sub>	:	เส้นผ่านศูนย์กลางฟอง (bubble diameter), เมตร
	f <sub>B</sub>	:	ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency), ต่อวินาที
	H <sub>L</sub>	:	ความสูงของของเหลว (liquid height), เมตร
	N <sub>B</sub>	:	จำนวนฟองที่เกิด (number of bubbles generated)
	S <sub>B</sub>	:	พื้นที่ผิวของฟองอากาศ 1 ฟอง (single bubble surface), ตารางเมตร
	U <sub>B</sub>	:	ความเร็วที่เกิดฟอง (bubble rising velocity), เมตรต่อวินาที
	V <sub>B</sub>	:	ปริมาตรของฟองอากาศ, ลูกบาศก์เมตร
	V <sub>TOTAL</sub>	:	ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ทั้งหมด (total volume in reactor), ลูกบาศก์เมตร



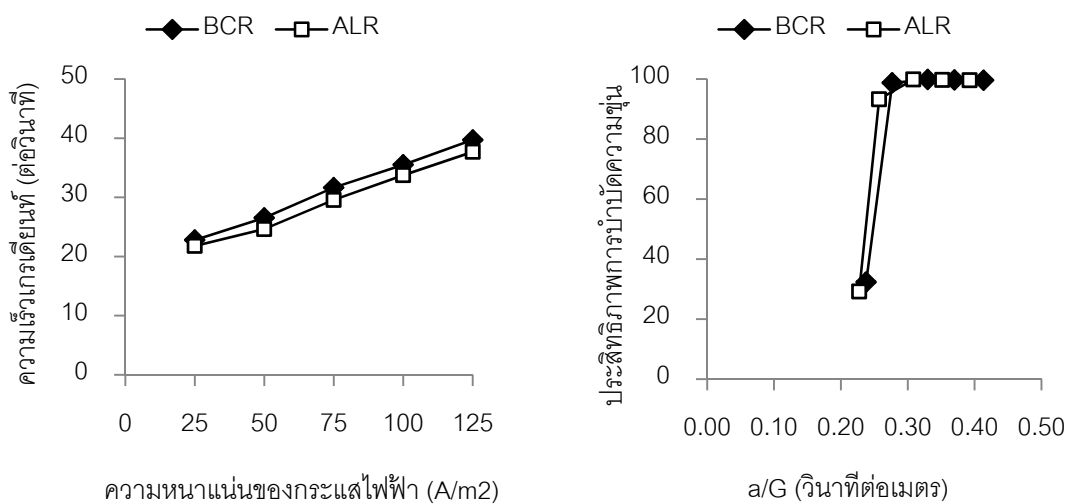
ภาพที่ 4-30 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (ก) ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ และ (ข) ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

จากภาพที่ 4-30 แสดงให้เห็นว่า ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area,  $a$ ) มีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของก๊าซ (เนื่องจากขนาดของฟองอากาศค่อนข้างคงที่) (ภาพที่ 4-30 (ข)) และเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4-30 (ก)) โดยอัตราการเติมอากาศจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็นการเพิ่มความถี่ของการเกิดฟองอากาศ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มจำนวนของฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ขั้วแคโทด เมื่อนำค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะไปพิจารณาควบคู่กับประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีไอดี พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นตามค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย โดยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าในแบบอากาศยกเล็กน้อย เนื่องจากผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีปริมาณมากกว่าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (สอดคล้องกับน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่หายไปมากกว่าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีความสอดคล้องกับค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) จากตารางที่ 4-5 ที่แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่มากกว่าในแบบอากาศยกเล็กน้อย ในทุกความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม การคิดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะในการทดลองนี้เป็นการคิดเฉพาะในส่วนที่อยู่เหนือขั้วไฟฟ้าเท่านั้น ไม่มีการคิดในส่วนหนึ่งของเหลวที่วนกลับมาด้วย

ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient, G) เป็นพารามิเตอร์ใช้บอกความปั่นป่วนของน้ำ ทำให้ทราบถึงความสามารถในการกวนผสมของระบบบำบัด (มันดลิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) โดยค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ (โดยในการทดลองนี้อัตราการไหลของก๊าซแปรตามกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ) จากการทดลอง ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟองอากาศ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (electrolysis) ของขั้วแคโทด สามารถคำนวณตามสมการ ของ (Svarovsky, 2000) ดังนี้

$$G = 0.236 \frac{g \rho D_B}{\mu} \sqrt{\frac{V_A}{V}} \quad (4-17)$$

- เมื่อ G : ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน, ต่อวินาที  
 g : ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>  
 D<sub>B</sub> : เส้นผ่านศูนย์กลางฟอง (bubble diameter), เมตร  
 μ : ความหนืดของน้ำ, นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร  
 V<sub>A</sub>/V : ปริมาตรของอากาศที่เติมเข้าไปต่อปริมาตรของน้ำในถังกวน



ภาพที่ 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเกรเดียนท์ (ก) และอัตราส่วนค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่อความเร็วเกรเดียนท์ (ข) ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก

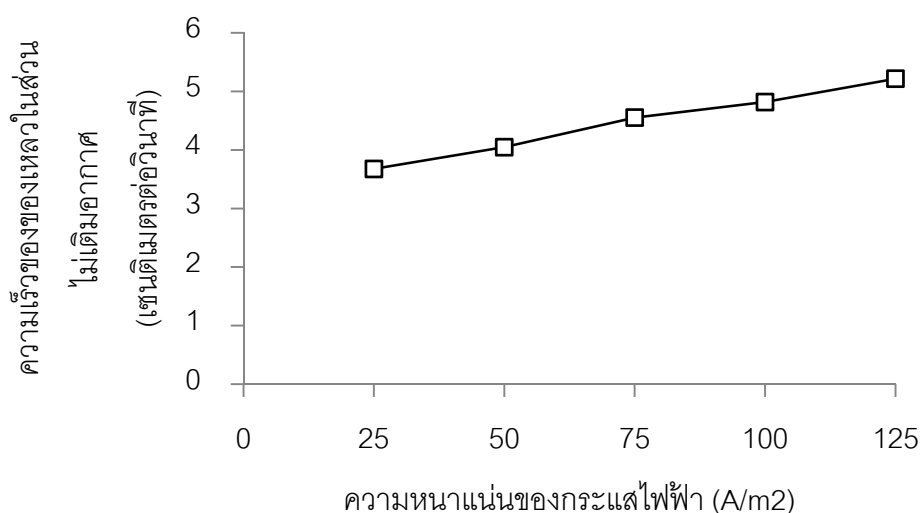


จากภาพที่ 4-31(ก) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (25-125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) แก่ระบบ ทำให้ความความเร็วเกรเดียนท์ (G) ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกเพิ่มขึ้น (22.79-39.71 ต่อวินาที และ 21.79-37.70 ต่อวินาที ตามลำดับ) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของการแสไฟฟ้า ทำให้มีปริมาณฟองอากาศสูงขึ้นและเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนให้แก่ระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ภายในถังปฏิกริยามีการกวนผสมที่ดีมากขึ้น จากภาพที่ 4-32(ข) แสดงสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ , วินาทีต่อเมตร) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด พบว่าสามารถแบ่งผลการทดลองได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงสัดส่วน  $a/G$  ระหว่าง 0.22-0.30 วินาทีต่อเมตร จะเป็นช่วงที่ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $a/G$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวฟองอากาศที่ช่วยในการแยกฟลอคของอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียมีน้อยเกินไป ในขณะที่ช่วงที่ 2 คือช่วงค่า  $a/G$  มากกว่า 0.31 วินาทีต่อเมตร ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นและคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศมากเกินไป ฟลอคของอนุภาคน้ำมันจึงมีโอกาสสัมผัสกับฟองอากาศและแยกออกด้วยกระบวนการทำให้ลอยได้ดีขึ้น โดยค่าสัดส่วน  $a/G$  ที่เหมาะสมในการศึกษานี้ คือมากกว่า 0.31 วินาทีต่อเมตร โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น 99 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น การเลือกใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำ (44 - 56 มิลลิกรัมต่อลิตร) และอัตราส่วน  $a/G$  (มากกว่า 0.31 วินาทีต่อเมตร) ทำให้ทราบว่า อาจเป็นการเลือกใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มากเกินไป

จากการศึกษาขนาดของฟองอากาศ ( $D_b$ ) พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $a$ ) ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) และสัดส่วนสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) กล่าวได้ว่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters) สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด รวมถึงมีความแตกต่างระหว่างการเดินทางด้วยถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก โดยในส่วนต่อไปจะทำการศึกษาความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ เพื่อวิเคราะห์กลไกการหมุนเวียนประจุที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ที่อาจสัมพันธ์กับตัวแปรด้านฟองอากาศ รวมถึงการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันตัดด้วยอิออนของสารโคแอกกูแลนต์

#### 4.5.3 การศึกษาค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ ( $U_{LD}$ )

ถึงปฏิกริยาแบบอากาศจะมีลักษณะแตกต่างกับถึงปฏิกริยาแบบฟองอากาศ คือ มีส่วนไม่เต็มอากาศ (Downcomer) เมื่อมีการเติมอากาศ (ฟองอากาศจากหัวแคโทด) ในส่วนเติมอากาศ (Riser) จะทำให้ของเหลวภายในถึงปฏิกริยาเกิดการยกตัวขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ไปยังส่วนไม่เต็มอากาศแล้วกลับเข้าสู่ส่วนเติมอากาศอีกครั้ง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการหาค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ โดยการฉีดสีแล้ววัดระยะที่เคลื่อนที่ได้ในเวลาต่างๆ ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ (25 50 75 100 และ 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 4-32 ความเร็วของความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ ( $U_{LD}$ ) ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ

จากภาพที่ 4-32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ ( $U_{LD}$ ) ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่า ความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของฟองอากาศที่เกิดจากหัวแคโทดที่เกิดขึ้นตามกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ ทำให้ปริมาตรอากาศในของเหลวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นผลให้เกิดการยกตัวของอากาศมากขึ้น เป็นผลให้ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ขอบเขตการไหล (Flow regime) 2 วิธี คือ การพิจารณาจาก 1) หลักการเกิดของฟอง และ 2) หลักการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ (นลินี ตัณฑทิกุล, 2547)

1. การพิจารณาจากหลักการเกิดของฟองอากาศ พบว่า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 25 - 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีขอบเขตการไหลแบบ Homogeneous bubble flow คือ ความเร็วก๊าซต่ำๆ (น้อยกว่า 0.015) โดยฟองอากาศในขอบเขตนี้จะมีการกระจายขนาดในช่วงแคบๆ และของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ และสัมพันธ์กับค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) ที่ได้จากการคำนวณในข้างต้น

2. การพิจารณาจากหลักการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ โดยเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำๆ (25 - 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) จะมีขอบเขตการไหลแบบ No gas entrainment (Regime I) โดยที่ความเร็วของก๊าซต่ำๆ จึงไม่มีฟองอากาศเคลื่อนที่เข้าไปในส่วนไม่เต็มอากาศ ในขณะที่ เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (75 - 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) จะมีขอบเขตการไหลแบบ Gas entrainment but no gas recirculation (Regime II) โดยความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศจะเท่ากับความเร็วของฟองอากาศ ซึ่งผลลัพธ์ในฟองอากาศจะถูกนำพาเข้าไปในส่วนไม่เต็มอากาศ แต่ฟองอากาศจะไม่ไหลวนกลับไปในส่วนเต็มอากาศอีกครั้งหนึ่ง

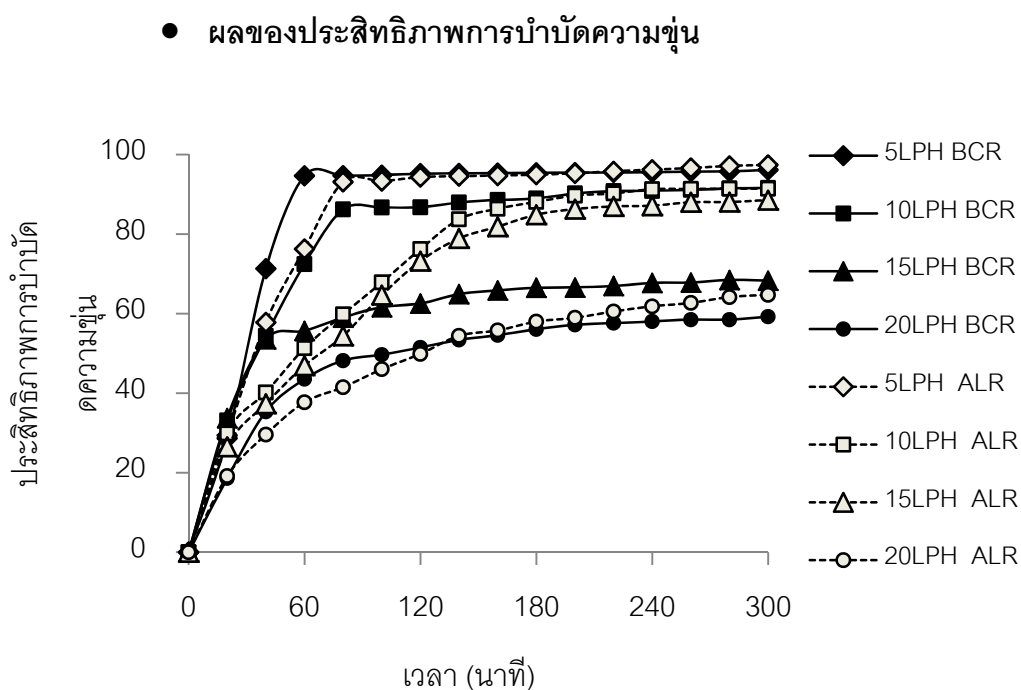
จากผลการทดลองในข้างต้นทำให้สามารถยืนยันผลของการเวียนกลับของของเหลวและประจุอะลูมิเนียม (Liquid recirculation) ที่เกิดขึ้นภายในถังอากาศยก ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมที่แตกต่างจากถังแบบฟองอากาศ รวมถึงทราบข้อดีและข้อด้อยของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่ทำการเดินระบบแบบทีละเท ในการศึกษาต่อไปเป็นการประยุกต์ใช้เพื่อการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

#### 4.6 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเข้า ในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ารวมกับถังปฏิกรณ์ฟองอากาศและแบบอากาศยก

#### 4.6.1 การศึกษากระทบของอัตราการไหลของน้ำเข้า

ในการทดลองเป็นการศึกษาบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า มีขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากนั้นเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเข้า คือ 5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นแสดงในภาพที่ 4-33

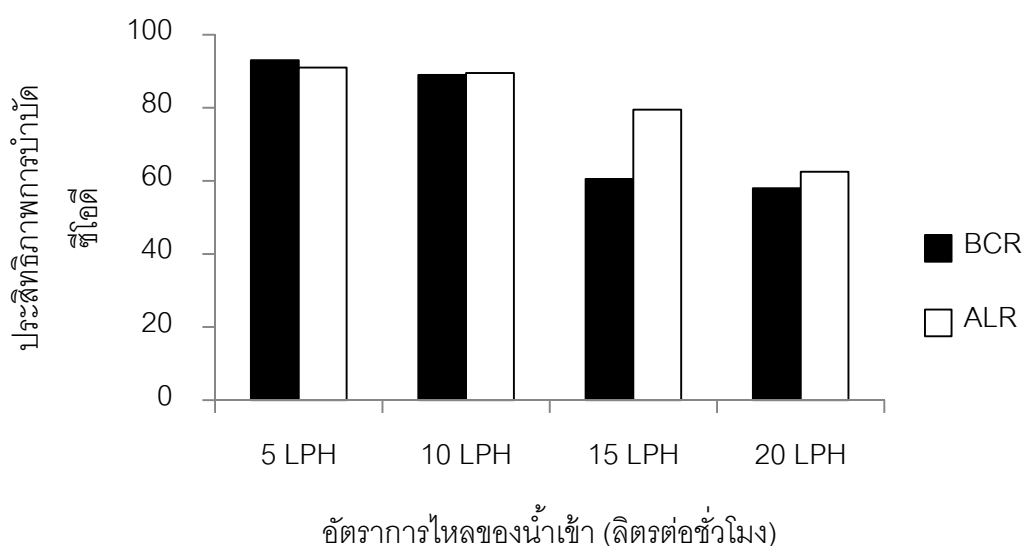


ภาพที่ 4-33 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

จากภาพที่ 4-33 แสดงการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (ปริมาตร 12 ลิตร) และแบบอากาศยก (ปริมาตร 15 ลิตร) โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของทั้งปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า โดยจะเห็นได้ว่า ที่อัตราการไหลของน้ำเข้า 20 ลิตรต่อชั่วโมง (ระยะเวลาพักของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก คือ 36 และ 45 นาที) ให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นต่ำสุด เนื่องจากระยะเวลาพัก

(Detention time) ไม่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างอิมอนของสารโคแอกกูแลนต์ อนุภาค น้ำมัน และฟองอากาศ จึงยังคงเหลืออนุภาคน้ำมันที่ไม่ผ่านการบำบัดเหลืออยู่ในเฟสของเหลวในปริมาณมาก และเมื่อลดอัตราการไหลของน้ำเข้า ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลของระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีระยะเวลาสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมัน อิมอนของสารโคแอกกูแลนต์ และฟองอากาศ เพื่อทำลายเสถียรภาพเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน และเวลาในการแยกชั้นของตะกอนและลอยขึ้นสูผิวหน้าได้ ทำให้เหลืออนุภาคน้ำมันที่อยู่ในเฟสของเหลวในปริมาณน้อยลง

● ผลของประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี

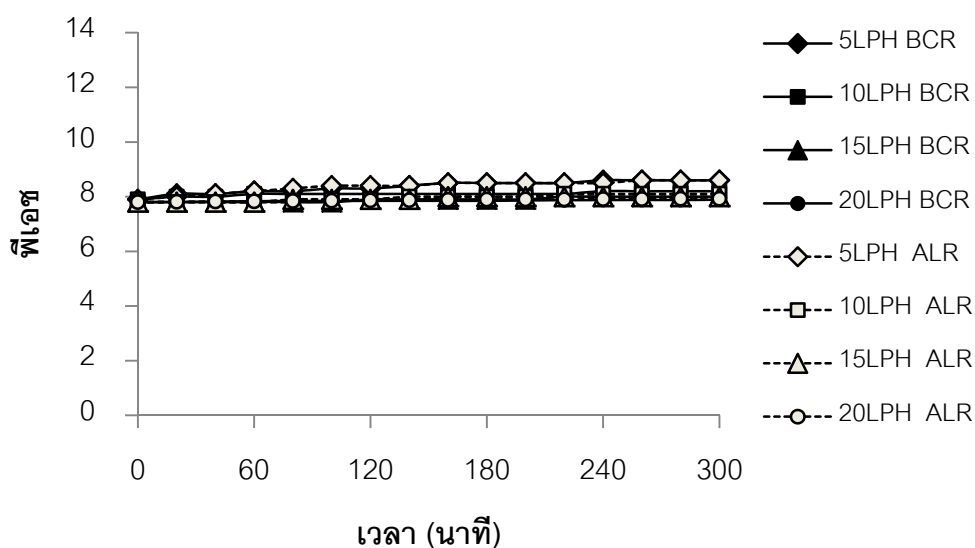


ภาพที่ 4-34 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

จากภาพที่ 4-34 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ของการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก หลังจากเดินระบบแบบต่อเนื่อง เป็นเวลา 600 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า (5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง) ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีลดลงเช่นเดียวกับกรณีของประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลของน้ำเข้าต่ำ ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันและสารโคแอกกูแลนต์ เพื่อให้เกิดการห่อหุ้มอนุภาคน้ำมันด้วยผลึก เกิดเป็นตะกอนลอยขึ้นสูผิวหน้า แต่เมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้อนุภาคน้ำมัน

บางส่วนเหลืออยู่ในเฟสน้ำมีผลทำให้ค่าซีไอดีสูงขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำเข้า 15 ลิตรต่อชั่วโมง โดยพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกมากกว่าในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกมีปริมาตรของน้ำเสียมากกว่าเป็นผลให้มีระยะเวลาพักมาก (เวลากักน้ำในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศและถังปฏิบัติการแบบอากาศยก คือ 48 และ 60 นาที ตามลำดับ) จึงทำให้มีระยะเวลาในการกวนผสมของอนุภาคน้ำมัน อีออนของสารโคแอกกูแลนต์ และฟองอากาศที่เหมาะสมมากกว่าในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ รวมถึงในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกมีส่วนไม่เต็มอากาศไหลวนของเหลวและอะลูมิเนียมอีออนกลับเข้ามาทำปฏิริยากับอนุภาคน้ำมันในส่วนเติมอากาศ ส่งผลให้สามารถรวมตัวเกิดเป็นตะกอนได้มากกว่าในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ

● ผลของพีเอช (pH) ที่เปลี่ยนแปลง

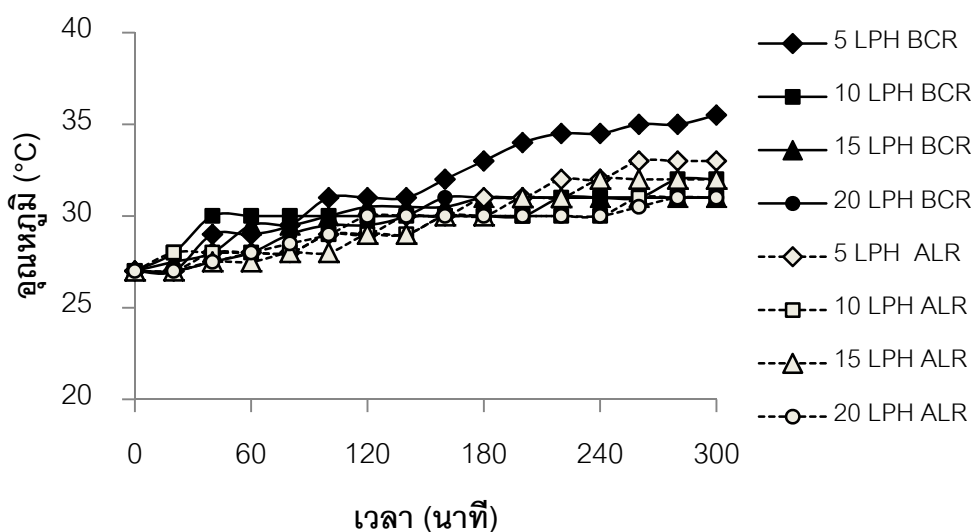


ภาพที่ 4-35 พีเอชที่เปลี่ยนแปลง ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ผลของพีเอชที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เป็นเวลา 300 นาที แสดงในภาพที่ 4-35 พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเข้า (5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง) จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช (พีเอชอยู่ระหว่าง 7-8) โดยพีเอชตลอดการเดินระบบจะค่อนข้างคงที่ เช่นเดียวกับการเดินระบบแบบทีละเท เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานพบว่า พีเอชไม่เกินค่ามาตรฐาน (พีเอช ควรอยู่ในช่วง 5.5-9.0) (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539)

● ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

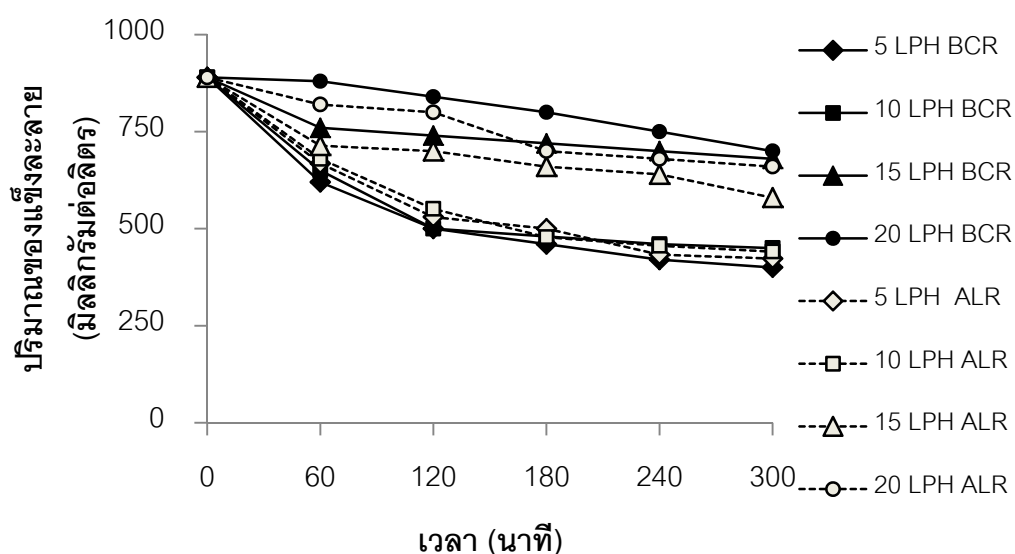


ภาพที่ 4-36 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เมื่อทำการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง เป็นเวลา 600 นาที (ภาพที่ 4-36) จะพบว่า อุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ โดยอุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงสุด เมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าที่ 5 ลิตรต่อชั่วโมง และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า อุณหภูมิของน้ำออกจะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อน ระหว่างน้ำภายในถังปฏิกรณ์และน้ำที่เข้ามา (ฮอลแมน, 2004) โดยเมื่อเปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ พบว่า อุณหภูมิของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ เนื่องจากในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีการถ่ายเทมวลสารที่ดีกว่าในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Merchuk และ Glux, 2002) โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเดินระบบ ที่อัตราการไหลของน้ำเข้า 5 ลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิของน้ำเพิ่มเป็น 35 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลต่อการละลายของอะลูมิเนียมออกไซด์ออกมาในปริมาณสูง จึงทำให้เกิดสีกร่อนของหัวแอดมิดมาก และเป็นผลให้มีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายออกมาในปริมาณที่มากเกิด

ความจะเป็น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิน้ำเสียหลังการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ผ่านมาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม (40 องศาเซลเซียส) อ้างอิงจากประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

● ปริมาณของแข็งละลาย (TDS)

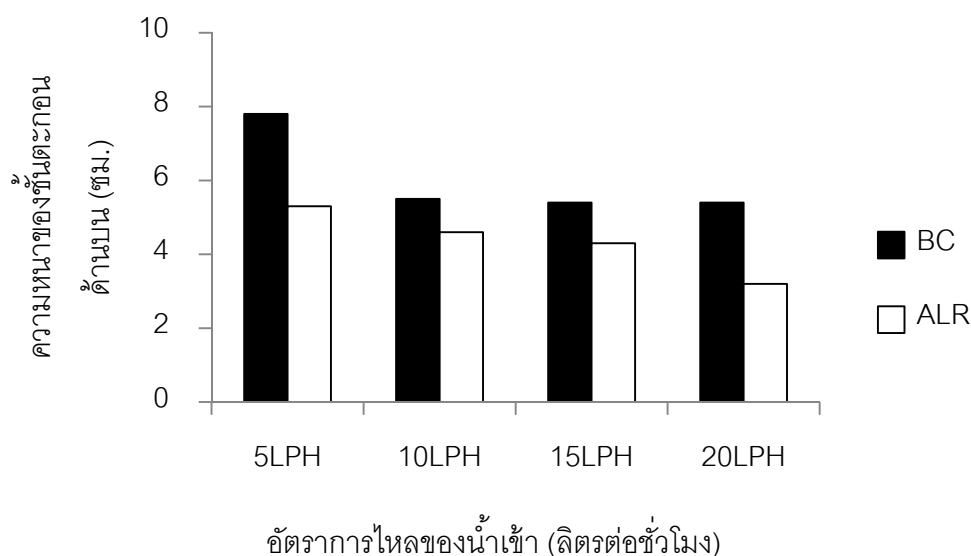


ภาพที่ 4-37 ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่ได้จากการทดลอง คือ อนุภาคของน้ำมัน สารลดแรงตึงผิว และส่วนผสมต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของน้ำมันตัด โดยจากการศึกษาปริมาณของแข็งที่เปลี่ยนไปตามเวลาเมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 4-37 พบว่า ปริมาณของแข็งละลายลดลงตามเวลาในการเดินระบบ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันและส่วนผสมต่างๆ ที่อยู่ในเฟสของเหลวถูกบำบัดโดยการห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกและรวมตัวเป็นตะกอนลอยสู่ผิวน้ำ ทำให้อนุภาคของน้ำมันและสารอื่นๆ ให้ในเฟสของเหลวลดลง เมื่อทำการศึกษาผลของอัตราไหลของน้ำเข้า พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าทำให้ปริมาณของแข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนน้อย จึงทำให้อนุภาคน้ำมันเหลืออยู่ในเฟสน้ำมีมากขึ้น



● ความหนาของชั้นตะกอนด้านบนถังปฏิกริยา



ภาพที่ 4-38 ความหนาของชั้นตะกอนด้านบนถังปฏิกริยาในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

จากการศึกษาความหนาของชั้นตะกอนด้านบนถังปฏิกริยา เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเข้า (5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง) แสดงในภาพที่ 4-38 พบว่า ความหนาของชั้นตะกอนด้านบนลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า ซึ่งความหนาของชั้นตะกอนจะสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีหรือความขุ่นที่ลดลง โดยความหนาของชั้นตะกอนคือฟลอคที่เกิดจากการรวมตัวของอิออนของสารโคแอกกูแลนทที่ไปทำลายเสถียรภาพของน้ำมันแล้วลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ เมื่อประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจึงทำให้ความหนาของชั้นตะกอนลดลงตามไปด้วย

เมื่อเปรียบเทียบชั้นตะกอนด้านบนของการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีความหนาที่น้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก เนื่องจากผลของการหมุนวนของของเหลวภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ทำให้ของความเร็วของของเหลวในส่วนเติมอากาศ (Riser) มีความเร็วที่มากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และดันให้ตะกอนด้านบนเกิดการอัดตัว ทำให้ความหนาของชั้นตะกอนด้านบนของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกน้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

- **ฟังก์ชันการกระจายเรซีเดนซ์ไทม์ (Residence time distribution, RTD)**

การพิจารณาฟังก์ชันการกระจายเรซีเดนซ์ไทม์ (RTD) ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ทำการทดลองคล้ายกับในการเดินระบบแบบที่ละเท โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเข้าต่างๆ ทำการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของน้ำเข้าที่มีผลต่อค่าเลขเพคเลตต์ (Pe) จากแบบจำลองการแพร่แนวแกนทอ และจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) จากแบบจำลองถังกวนอนุกรม โดยในงานวิจัยนี้จะแยกการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เติมอากาศ (riser) และส่วนที่ไม่เติมอากาศ (downcomer) และส่วนที่ 2 คือการพิจารณาส่วนที่ไม่เติมอากาศ (downcomer) ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

### 1. ฟังก์ชันการกระจายเรซีเดนซ์ไทม์ (RTD) ในส่วนเติมอากาศ (riser)

จากการศึกษาในข้างต้นแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ในการทำปฏิกริยานั้น (Contact zone) มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดมาก ดังนั้น การศึกษาฟังก์ชันการกระจายเรซีเดนซ์ไทม์ (RTD) ในส่วนเติมอากาศ (riser) จึงน่าจะเป็นส่วนที่ช่วยอธิบายถึงประสิทธิภาพการบำบัดที่เกิดขึ้นได้ โดยเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation) ใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว คือ 2 เซนติเมตร โดยในการทดลองส่วนนี้จะทำการติดตามสภาพการนำไฟฟ้าของไซเดียวคลอไรด์ที่ทางออก เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเข้าที่ 5 10 15 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์หาฟังก์ชัน  $E(t)$  จากนั้นทำการหาค่าเลขเพคเลตต์ (Pe) จากแบบจำลองการแพร่แนวแกนทอ และจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) จากแบบจำลองถังกวนอนุกรม โดยผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4-8 พบว่า

- เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีจะลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการกักน้ำลดลงหรือระยะเวลาในการทำปฏิกริยา (อธิบายได้จาก เวลากักน้ำ  $(\theta) = \text{ปริมาตรของน้ำเสีย (V)} \div \text{อัตราการไหลของน้ำเข้า (Q)}$ ) และการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า ทำให้ค่าเรซีเดนซ์ไทม์เฉลี่ย  $(\tau)$  ค่าเพคเลตต์ (Pe) และจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) ที่ลดลง

- เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาการกักน้ำ  $(\theta)$  จากทฤษฎี กับค่าเวลาการกักน้ำที่ได้จากการทดลอง (ค่าเรซีเดนซ์ไทม์เฉลี่ย  $(\tau) \times$  จำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N)) ในแต่ละอัตราการไหลของน้ำเข้า พบว่า ค่าเวลาการกักน้ำจากทฤษฎีมีค่ามากกว่าเวลาการกักน้ำที่ได้จากการทดลอง

มาก ซึ่งอาจสรุปได้ว่า รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยามีผลต่อระยะเวลาพัก และจะสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดที่เกิดขึ้นด้วย

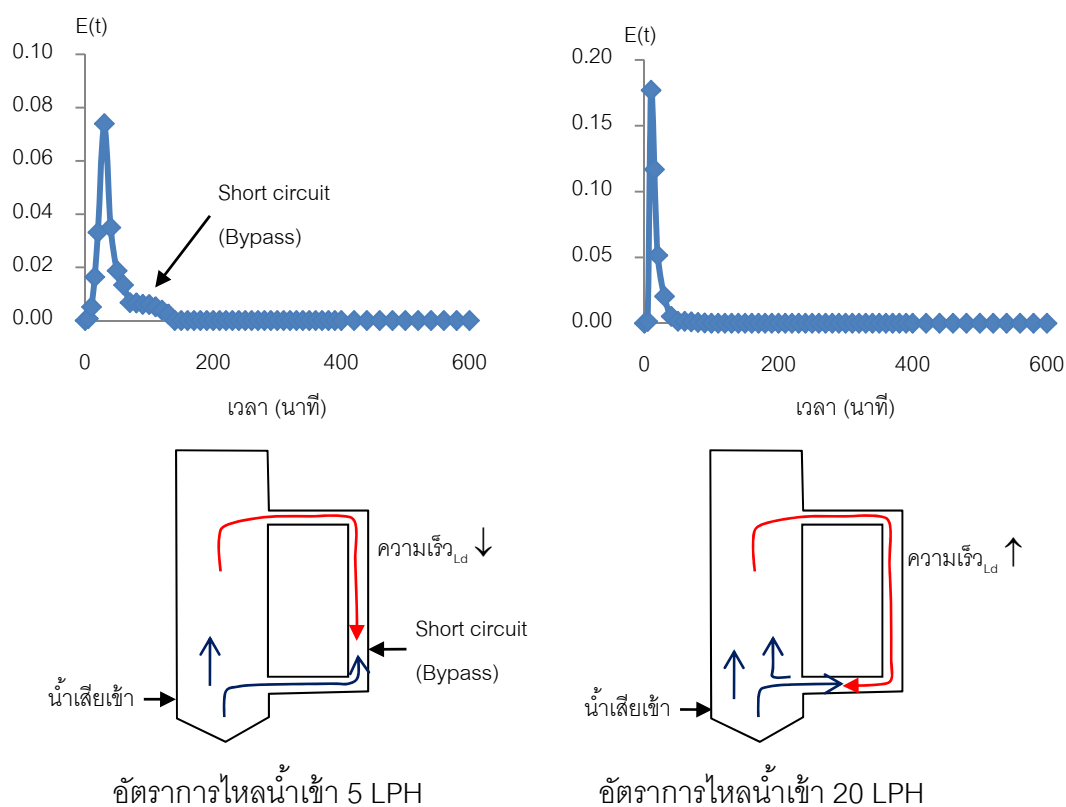
- เมื่อพิจารณาค่าเพคเลตต์ (Pe) และจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) จะลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า ซึ่งจะทำให้รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยามีความเป็นแบบท่อไหล (Plug flow) ลดลง (Essadki และคณะ, 2011) โดยในทุกๆ อัตราการไหลของน้ำเข้า ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ALR) จะมีค่าเพคเลตต์ (Pe) และค่าจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) มากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) จึงทำให้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกสามารถรักษารูปแบบการไหลแบบท่อไหลได้ดีกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า การเดินระบบภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกจึงยังคงให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่มากกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

ตารางที่ 4-8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ค่าเรซีเดนซ์ไทม์เฉลี่ย ( $\tau$ ) เพคเลตต์ (Pe) และจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) ส่วนตัวเติมอากาศ (riser) ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก

อัตรา การไหล ของน้ำเข้า	BCR				ALR			
	ประสิทธิภาพ การบำบัด ความขุ่น(%)	$\tau$ (s)	Pe	N	ประสิทธิภาพ การบำบัด ความขุ่น (%)	$\tau$ (s)	Pe	N
0	99	-	35	16	99	-	44	20
5 LPH	95	223	30	14	97	194	38	19
10 LPH	91	199	28	13	91	189	38	18
15 LPH	68	188	27	12	88	184	34	17
20 LPH	58	180	21	10	64	174	27	13

## 2. ฟังก์ชันการกระจายเรซีเดนซ์ไทม์ (RTD) ในส่วนไม่เต็มอากาศ (downcomer)

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายเรซีเดนซ์ไทม์ในส่วนไม่เต็มอากาศของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก พบว่า สามารถหาค่าเพคเลตต์ (Pe) และค่าจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) จากสมการ 4-11 และ 4-13 ได้ เฉพาะอัตราการไหลของน้ำเข้า ที่ 20 ลิตรต่อชั่วโมง คือ  $Pe = 60$  และ  $N = 40$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในส่วนไม่เต็มอากาศ มีรูปแบบการไหลแบบท่อไหล แต่เมื่อพิจารณาในช่วงที่ให้อัตราการไหลน้อย เช่น 5 10 และ 15 ลิตรต่อชั่วโมงนั้น ไม่สามารถหาค่าเพคเลตต์ (Pe) และค่าจำนวนถังในถังกวนแบบอนุกรม (N) ที่แน่นอนได้ เนื่องจากของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศมีการไหลลัดวงจร (Bypass) ของเฟสน้ำเสียจากส่วนเต็มอากาศ (riser) ไปยังส่วนไม่เต็มอากาศ (ภาพที่ 4-39) โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลต่อรูปแบบของกราฟ RTD ที่มีความซับซ้อน รวมถึงจำเป็นต้องมีการประยุกต์ใช้สมการหรือโมเดลการวิเคราะห์ขั้นสูงเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองดังกล่าว (Essadki และคณะ, 2011)



ภาพที่ 4-39 ลักษณะการไหลของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ  
ที่อัตราการไหลน้ำเข้า 5 และ 20 ลิตรต่อชั่วโมง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และบทประยุกต์เชิงวิศวกรรม

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เช่น ชนิดขั้วไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ ได้ทำการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและรูปแบบการไหล และการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การศึกษาความสามารถในการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์ พบว่า น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสามารถถูกทำลายเสถียรภาพด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล๊อคคูเลชัน โดยใช้ความเข้มข้นของสารส้มหรือเฟอร์ริกคลอไรด์ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียคือ 8 และให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและความขุ่น 99 เปอร์เซ็นต์

- การศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการทดลองในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศแบบทีละเท พบว่า ขั้วอะลูมิเนียมเหมาะสมในการใช้เป็นขั้วไฟฟ้า มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกริยา 100 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการเดินระบบด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก

- การเปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก โดยการใช้ขั้วอะลูมิเนียมเหมาะสมในการใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เมื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบการไหล โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายเรชีเดนซ์ไทม์ พบว่า ถังปฏิกริยาทั้งสองรูปแบบมีรูปแบบการไหลแบบท่อไหล (plug flow) และให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น 99 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเดินระบบภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก มีข้อดีว่าการเดินระบบภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ คือ ความหนาแน่นของชั้นตะกอนที่น้อยกว่า ไม่เกิดชั้นตะกอนบริเวณก้นถังปฏิกริยา อุณหภูมิ และการใช้พลังงานที่น้อยกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

- การศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ฟองอากาศและเฟสของเหลว เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า พบว่า ขนาดของฟองอากาศ ( $D_B$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) ที่ขั้วแคโทดมีแนวโน้มคงที่และลดลงเล็กน้อย แต่มีความถี่ในการเกิดฟองอากาศเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $a$ ) ของฟองอากาศเพิ่มขึ้น รวมถึงเมื่อมีฟองอากาศเกิดขึ้นในปริมาณมากจะทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย โดยแสดงได้จากค่าความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) ที่เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อทำการศึกษาค่าสัดส่วน  $a/G$  พบว่า เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเช่นกัน โดยตัวแปรดังกล่าวข้างต้นมีความสัมพันธ์ต่อทั้งประสิทธิภาพและอัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยถังปฏิกิริยาทั้งสองแบบ

- จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า อัตราการไหลของน้ำเข้ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ความขุ่น อุณหภูมิของของเหลวระหว่างการเดินระบบ ปริมาณของแข็งละลาย ความหนาของชั้นตะกอนด้านบน และรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยา โดยที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องจากระยะเวลาที่น้ำภายในถังน้อยลง และทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงด้วย รวมถึงยังส่งผลกระทบต่อารเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล (ซึ่งวิเคราะห์ในรูปแบบของฟังก์ชันการกระจายเวซิเดนซีไทม์) ที่เกิดขึ้นภายในระบบอีกด้วย

- เมื่อเปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าการเดินระบบในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกจะยังคงรักษาประสิทธิภาพการบำบัดได้มากกว่าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ เนื่องจากมีส่วนไม่เต็มอากาศ (Downcomer) ทำให้ของเหลวไหลกลับเข้ามาในเต็มอากาศ (riser) เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์รูปแบบการไหลโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายเวซิเดนซีไทม์ พบว่า ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกสามารถรักษารูปแบบการไหลแบบท่อไหล (Plug flow reactor) ได้มากกว่าถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- จากผลของปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำพบว่า ภายในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกมีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำมากกว่าในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ ดังนั้นควรมีการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยเพื่อการใช้กระแสน้อยลง ซึ่งเป็นการลดการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้า

- การศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ฟองอากาศ พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $a$ ) และค่าความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) และสัดส่วนสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) ที่คำนวณได้จากการทดลอง มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับกระบวนการรวมตะกอนด้วยวิธีอินดิวิชแอโรฟลอตเชชัน ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปควรมีการศึกษาต่อไปว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เกิดขึ้นจากกลไกกระบวนการปั่นป่วนจากฟองอากาศ หรือเกิดจากกลไกการทำลายเสถียรภาพของอิมulsionของสารโคแอกกูแลนต์

- ควรมีการนำน้ำเสียจริงมาใช้ในกระบวนการ รวมถึงออกแบบและเดินระบบที่มีขนาดใหญ่ยิ่งขึ้น เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยควรระวังในเรื่องคุณสมบัติของน้ำเสียจริงที่มีการปนเปื้อนสารอื่น เช่น โลหะ เป็นต้น

### 5.3 บทประยุกต์เชิงวิศวกรรม

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก ตัวแปรสำคัญที่ควรนำมาพิจารณา ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ปริมาณน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ตัวแปรของขั้วไฟฟ้า (พื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้ำเสีย และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อระยะเวลาที่เก็บ) และรูปร่างของถังปฏิกรณ์ (พื้นที่หน้าตัดส่วนเติมอากาศ / พื้นที่หน้าตัดส่วนไม่เติมอากาศ และตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า) โดยค่าพื้นที่ในการทำปฏิกรณ์ของขั้วอิเล็กโทรดจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของน้ำเสีย ในเชิงของพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ คือ (Surface area/Volume of wastewater,  $A / V$ ) จากการศึกษาพบว่า ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด คือ 0.67 เมตร<sup>-1</sup> ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเดินระบบและประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 5-1 ตัวแปรการออกแบบการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร

ตัวแปรการออกแบบ	ค่าการออกแบบ
Surface area / Volume of wastewater ( $A / V$ )	0.67 เมตร <sup>-1</sup>
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า(Ampere/ Surface area)	100 แอมแปร์/ตารางเมตร
ระยะเวลาในการกักเก็บ	60 นาที
พื้นที่หน้าตัดส่วนเติมอากาศ/พื้นที่หน้าตัดส่วนไม่เติมอากาศ ( $A_1/A_2$ )	3.5
ระดับขั้วไฟฟ้าถึงผิวน้ำ ( $h_D$ )	1.65 เมตร

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กัณฑ์มาศ สุทธิเรืองวงศ์. 2539. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กันตพงศ์ ผิวเหลือง. 2552. การศึกษาถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำ.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดวงกมล ณ ระนอง. 2551. พื้นฐานวิศวกรรมปฏิกิริยาและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. พิมพ์  
ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: อักษรสยามการพิมพ์.
- ทบวงมหาวิทยาลัย. 2528. เคมีเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: อักษรเจริญทัศน์.
- ณัฐวิญญ์ ชวลิตพรศิยา. 2552. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันจากน้ำ  
เสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ,  
สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ธนนท์ เฉลิมสินสุวรรณ. 2552. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน  
และไซโนเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม  
(สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นลินี ตันตึกุล. 2547. พฤติกรรมทางด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารภายในถังผสมผัด  
แบบอากาศยกขนาดใหญ่ที่มีท่อภายในหลายท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ,  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ประเสริฐ ภาวสันต์. 2545. การศึกษากการกระจายตัวของฟองก๊าซภายในถังผสมผัดแบบอากาศยก.  
โครงการวิจัยเลขที่ 172-เคมี-2544 ทูลส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์, คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริเมธ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
โทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.



- พรทิพย์ วงศ์สุโชโต. 2545. พฤติกรรมของฟองก๊าซและการไหลวนภายในของของเหลวในถังสัสม์ผัดอากาศยก ประเภทที่มีการไหลวนแบบภายใน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล. 2555. เอกสารคำสอน วิชา หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 2107662. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันรัช ตันฑุลเวศม์ และมันสิน ตันฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ. 2551. กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไฟฟ้า. วารสารเทคนิค 283 (มกราคม): 1-10.
- สุดสิริ จิตสุภาวัฒน์. 2552. การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรารักษ์ อวณวน. 2552. การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน และแนวคิดการใช้ฟองอากาศเคลือบน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

- Adhoum, N. and Monser, L. 2004. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. Chemical Engineering and Processing. 43: 1281–1287.
- American Water Works Association. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21<sup>th</sup> ed.
- Aurette, Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok: Chulalongkorn.
- Bande, R. M., Prasad, B., Mishra, M. I. and Wasewar, K. L. 2008. Oil field effluent water treatment for safe disposal by electroflotation. Chemical Engineering Journal 137: 503–509
- Bataller, H., Lamaallam, S., Lachaise, J., Graciaa, A. and Dicharry, C. 2004. Cutting fluid emulsions produced by dilution of a cutting fluid concentrate containing a cationic/nonionic surfactant mixture. Journal of Material Processing Technology 152: 215-220.
- Belkacem, M., Bensadok, K., Nezzal, G. and Aurette, M. 1999. Applicability of the model of freezing to the treatment of the cutting oils by ultrafiltration. Entropy. 219: 30-35.
- Bensadok, K., Belkacem, M. and Nezzal, G. 2007. Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation. Deslination. 206: 440-448.
- Bensadok, K., Benammar, S., Lapique, F. and Nezzal G. 2008. Electrocoagulation of cutting oil emulsion using aluminium plate electrode. Journal of Hazardous Materials. 152: 423-430.
- Burke, R. L. 1991. Relocations, repatriation and translocation of amphibians and reptiles. Herpetologica. 47: 350-357.
- Camarasa, E., Carvalho, E., Melerio, L.A.O., Maciel Filho, R., Domingues, A., Wild, G., Poncin, S., Midoux, N. and Bouillard, J. 2001. A Hydrodynamic model for air-lift reactors. Chemical Engineering and Processing. 40: 121-128.
- Chen, G. and He, G. 2003. Separation of water and oil from water-in-oil emulsion by freeze/thaw method. Separation Purification Technology. 31: 83–89.
- Chen G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38 : 11–41.

- Cheremisinoff, N. P. 2002. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. Butterworth-Heinemann.
- Chisti, Y. and Moo-Young, M. 1989. Prediction of liquid circulation velocity in airlift reactors with biological media. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 42: 211-219.
- El Baradie, M. A. 1996. Cutting fluid: Part I Characterisation. Journal of Materials Processing Technology. 56: 786-797.
- Essadki, A.H., Bennajah, M., Gourich, B., Vial, Ch., Azzi, M. and Delmas, H. 2008. Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor – Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study. Chemical Engineering and Process. 47: 1211-1223.
- Essadki, A. H., Gourich, B. Vial, Ch. and Delmas, H. 2011. Residence time distribution measurements in an external-loop airlift reactor: Study of the hydrodynamics of the liquid circulation induced by the hydrogen bubbles. Chemical Engineering Science. 66: 3125–3132.
- Friedrich H. 1962. Ion Exchange. New York : McGraw-Hill.
- Hamza H .A., Stanonik D.J. and Kessick M. A. 1996. Flocculation of lime-treated oil sands tailing. Fuel. 75: 280-284.
- Harif, T., Khai, M. and Adin, A. 2012. Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/ flocculation mechanisms and resulting floc characteristics. Water Research. 26: 3177-3188.
- Holt, P. K., Barton, G. W., Wark., M. and Mitchell, C. A. 2002. A quantitative comparison between chemical dosing and Electrocoagulation. Colloids and Surfaces A. 211: 233-248
- Holt, P.K., Barton, G.W. and Mitchell, C.A. 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. Chemosphere. 59: 355–367.
- Ichikawa, T., Itoh, K., Yamamoto, S. and Sumita, M. 2004. Rapid demulsification of dense oil-in-water emulsion by low external electric field I. Experiment evidence. Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 242(1-3): 21-26.

- Jones, S.T. and Heindel, T.J. 2010. Hydrodynamic Considerations in an External loop Airlift Reactor with a Modified Downcomer. Industrial and Engineering Chemistry Research. 49: 1931-1936.
- Kuo, C.H. and Lee, C.L. 2009. Treatment of Cutting oil emulsion by microwave irradiation. Separation Science and Technology. 44: 1799-1815.
- Levenspiel, O. 1999. Chemical Reaction Engineering. 3<sup>th</sup> Ed. New York: John Wiley & Sons.
- Merchuk, J. and Glux, M. 2002. Bioreactor, Air-lift reactor. Encyclopedia of Bioprocess. 320-353.
- Painmanakul, P., Loubière, K., Hébrard, G., Peuchot, M. and Roustan, M. 2005. Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficient. Chemical Engineering Science. 60: 6480-6491.
- Perez, M., Rodriguez-Cano, R., Romero, L.I. and Sales, D. 2007. Performance of anaerobic thermophilic fluidized bed in the treatment of cutting-oil wastewater. Bioresource Technology. 98: 3456-3463.
- Rios, G., Pazos, C. and Coca, J. 1998. Destabilization of cutting oil emulsions using inorganic salts as coagulants. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 138: 383-389.
- Rosen M.J. 1989. Surfatants and Interfacial Phenomena. 2<sup>nd</sup> ed. New York : John Wiley&Son.
- Saleem, M., Bukhari A. A., and Akram, M. N. 2011. Electrocoagulation for the treatment of wastewater for reuse in irrigation and plantation. Journal of basic and applied Sciences. 7(1): 11-20.
- Svarovsky L. 2000. Solid-Liquid Separation. 4<sup>th</sup> Ed .Butterworth-Heinemann.
- Umran, T. U., Koparal, A. S. and Ogutveren, U. B. 2009. Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes. Journal of Environmental Management. 90: 428-433.
- Zuber, N. and Findlay, J.A. 1965. Average volumetric concentration in two phase flow system. Journal of Heat Transfer-Transaction of the ASME. 87: 453-468.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์

## 1. การวิเคราะห์ค่าซีไอดี

### การวิเคราะห์ซีไอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกตขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร หรือ 20 x 150 มิลลิเมตร ที่มีฝาเกลียวชนิดที่เอพี้
2. อีทตั้งบดคอกกล่องอะลูมิเนียมตัน ลึก 45-50 มิลลิเมตร มีรูขนาดพอดีกับหลอดแก้ว หรือขาตั้งใส่หลอดแก้ว
3. บล็อกฮีทเตอร์ (Block heater) หรือตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิที่  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียส การใช้ตู้อบต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมงที่ 150 องศาเซลเซียส จะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วแตก

#### สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานปอดัวเชื่อมไดโครเมตรสำหรับย่อยสลาย 0.1 N : ชั่งน้ำหนัก  $K_2Cr_2O_7$  (ซึ่งอบแห้งใน 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรด Conc.  $H_2SO_4$  167 มิลลิเมตร และเติม  $HgSO_4$  33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร
2. สารละลายกรดซัลฟริก: เติม  $Ag_2SO_4$  5.5 กรัม ลงใน conc.  $H_2SO_4$  1 กิโลกรัม ตั้งทิ้งไว้ 1 ถึง 2 วัน ให้  $Ag_2SO_4$  ละลาย
3. สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์: ละลาย 1.485 กรัม 1,10-ฟีแนนโทลีนโมโนไฮเดรต และ 695 มิลลิกรัม  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  ในน้ำกลั่นและเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร
4. สารละลายมาตรฐานปอดัวเชื่อมไฮโดรเจนพธาเลต: นำ  $HOOC_6H_4COOK$  มาบดแล้วอบแห้งที่ 120 องศาเซลเซียส ชั่งมา 425 มิลลิกรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นและเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร ปอดัวเชื่อมไฮโดรเจนพธาเลต 1 กรัม มี ซีไอดี เท่ากับ 1.176 กรัม ออกซิเจน และสารละลายนี้จะมีซีไอดีเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้
5. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.10 N: ละลาย  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  39.2 กรัม ในน้ำกลั่น เติม Conc.  $H_2SO_4$  20 มิลลิเมตร ทิ้งให้เย็นแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร นำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานปอดัวเชื่อมไดโครเมตทุกครั้งที่ใช้

### การหาความเข้มข้นของ FAS

เติมสารเคมีชนิดตามตารางที่ ก-1 ลงในหลอดแก้วขนาดที่ต้องการ โดยใช้ น้ำกลั่นแทน ตัวอย่างน้ำทิ้งให้เย็นลง แล้วเติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไตเตรทด้วยสารละลาย FAS

$$\text{นอร์มัลลิตีของสารละลาย FAS} = \frac{\text{ปริมาตรของ } 0.1 \text{ N K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{ มิลลิลิตร} \times 0.10}{\text{ปริมาตร FAS ที่ใช้ไตเตรท, มิลลิลิตร}}$$

ตารางที่ ก-1 ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับขวดแก้วขนาดต่างๆ

หลอดย่อยสลาย (ขนาดของหลอดแก้ว)	ปริมาตรน้ำ ตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ปริมาตรสารละลาย โปตัสเซียมไดโครเมต สำหรับย่อยสลาย (มิลลิลิตร)	สารละลาย กรดซัลฟูริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)
16 x 100 มิลลิลิตร	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150 มิลลิลิตร	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150 มิลลิลิตร	10.0	6.0	14.0	30.0

### วิธีวิเคราะห์

- ใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารเคมีตามตารางที่ 1 โดยเติมตัวอย่างน้ำลงในหลอดแก้ว แล้วเติมสารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย แล้วค่อยๆ เติมสารละลายกรดซัลฟูริกให้เกิดขึ้นกรดอยู่ที่ก้นหลอดแก้ว ปิดฝาให้แน่นพอดี แล้วแกว่งขวดวนไปมาเพื่อให้สารละลายผสมกันดี (ถ้าซีไอดีมากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ลดปริมาตรน้ำตัวอย่างลง แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบตามตาราง)
- นำหลอดแก้วใส่ลงในขวดใส่หลอดแก้ว แล้วเข้าตู้อบที่ 150 องศาเซลเซียส แล้วต้มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- เปิดฝาหลอดแก้ว แล้วเติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไตเตรทด้วย 0.10 N เอฟเอเอส จนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นน้ำตาลแดง (B)
- ทำแบลนด์ด้วยทุกครั้ง โดยใช้ น้ำกลั่นแทนตัวอย่างและทำการวิเคราะห์เหมือนน้ำตัวอย่างน้ำ ดังแสดงแผนผังการวิเคราะห์ซีไอดีโดยวิธีฟลักซ์แบบปิดในภาพที่ ก-1

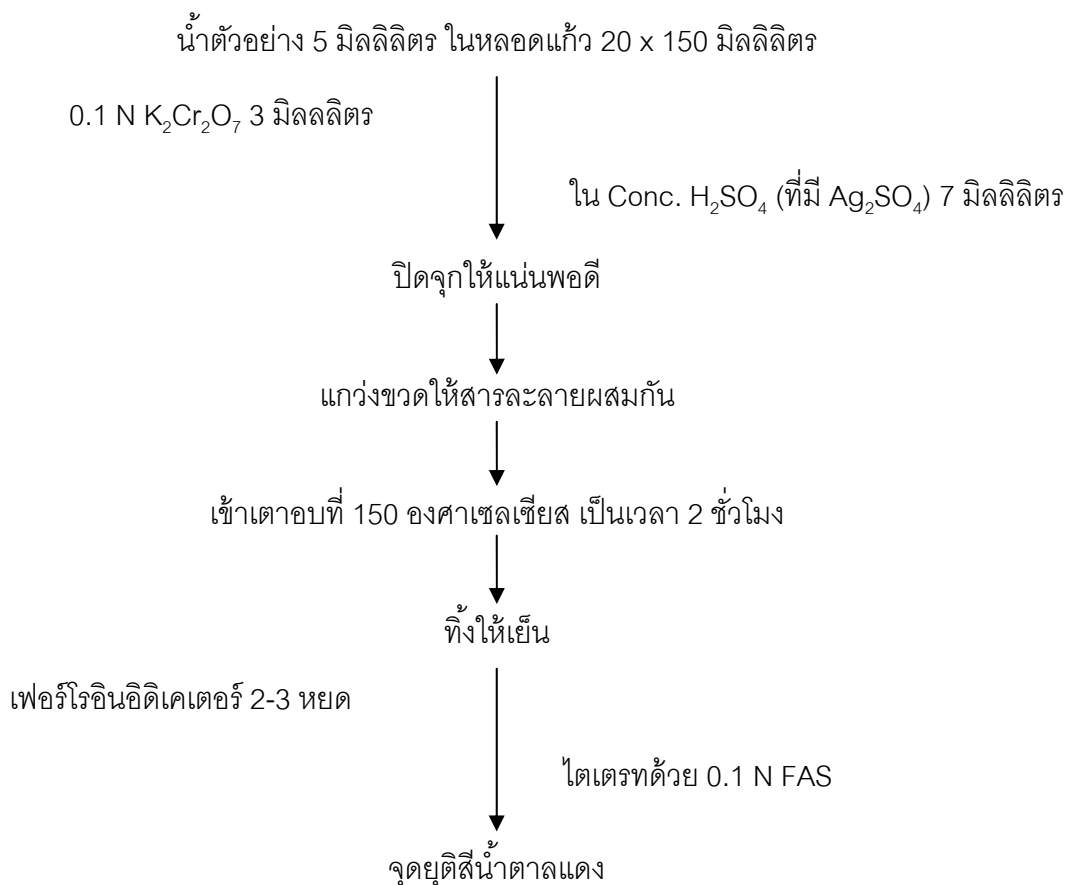


### การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี, มิลลิกรัมต่อลิตร} = \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ, มิลลิลิตร}}$$

- เมื่อ A : มิลลิลิตรของเฟอเอเอส ที่ใช้ไตเตรทแบลงค์  
 B : มิลลิลิตรของเฟอเอเอส ที่ใช้ไตเตรทน้ำตัวอย่าง  
 N : นอร์มัลลิตี ของเฟอเอเอส

### การวิเคราะห์ซีโอดีโดยวิธีฟลักซ์แบบปิด



หมายเหตุ: การทำแบลงค์ใช้น้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร แทนน้ำตัวอย่างน้ำและทำทุกขั้นตอนเหมือนตัวอย่าง

ภาพที่ ก-1 แผนผังการวิเคราะห์ซีโอดีโดยวิธีฟลักซ์แบบปิด

## 2. การวิเคราะห์น้ำมันและไขมัน

### การวิเคราะห์น้ำมันและไขมันโดยวิธีการสกัดด้วยกรวยแยก

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร มีฝาปิดชนิดเทฟลอน
2. ขวดกลั่น ขนาด 125 มิลลิลิตร (หรือขวดรูปชมพู่)
3. อ่างน้ำร้อน
4. กระดาษกรอง (whatman NO.40)

#### สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก HCl, 1+1
2. เฮกเซน (n-Hexane)
3. โซเดียมซัลเฟต  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , ผลึก

#### วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างมาทำให้เป็นกรดที่มีพีเอช 2 หรือต่ำกว่า (โดยทั่วไปใช้ HCl 5 มิลลิลิตร/น้ำ 1 ลิตร)
2. นำตัวอย่างนำเสีย 20 มิลลิลิตร (ถ้าเป็นน้ำสะอาดควรถือปริมาณน้ำมากกว่า 500 มิลลิลิตร) ปิดลงในกรวยแยก ล้างภาชนะใส่ตัวอย่างน้ำด้วยเฮกเซน 20 มิลลิลิตร แล้วเทในกรวยแยก ปิดฝาและเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น ปล่อยชั้นน้ำลงในปิเกตอร์ที่สะอาด แล้วจึงปล่อยชั้นเฮกเซนลงในขวดกลั่นที่ชั่งน้ำหนักแล้ว โดยปล่อยให้ไหลผ่านกระดาษกรองที่อยู่บนกรวยที่มี  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  1 กรัม หรือมากกว่าใส่อยู่ (ภาพที่ ก-2)
3. นำตัวอย่างเดิมสกัดแยกตามวิธีข้างต้นอย่างน้อย 3 ครั้ง ด้วยเฮกเซน 20 มิลลิลิตรต่อ 1 ครั้ง แล้วเทรวมกันในขวดกลั่นที่ชั่งน้ำหนักแล้วขวดเดิม และล้างกระดาษกรองด้วยเฮกเซน 10-20 มิลลิลิตร
4. ระเหยเฮกเซนจากขวดกลั่นในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วนำขวดกลั่นไปเข้าตู้อบ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดสิกเกตอร์ 30 นาที และชั่งน้ำหนัก น้ำหนักของขวดกลั่นที่เพิ่มขึ้นคือปริมาณน้ำมันและไขมัน

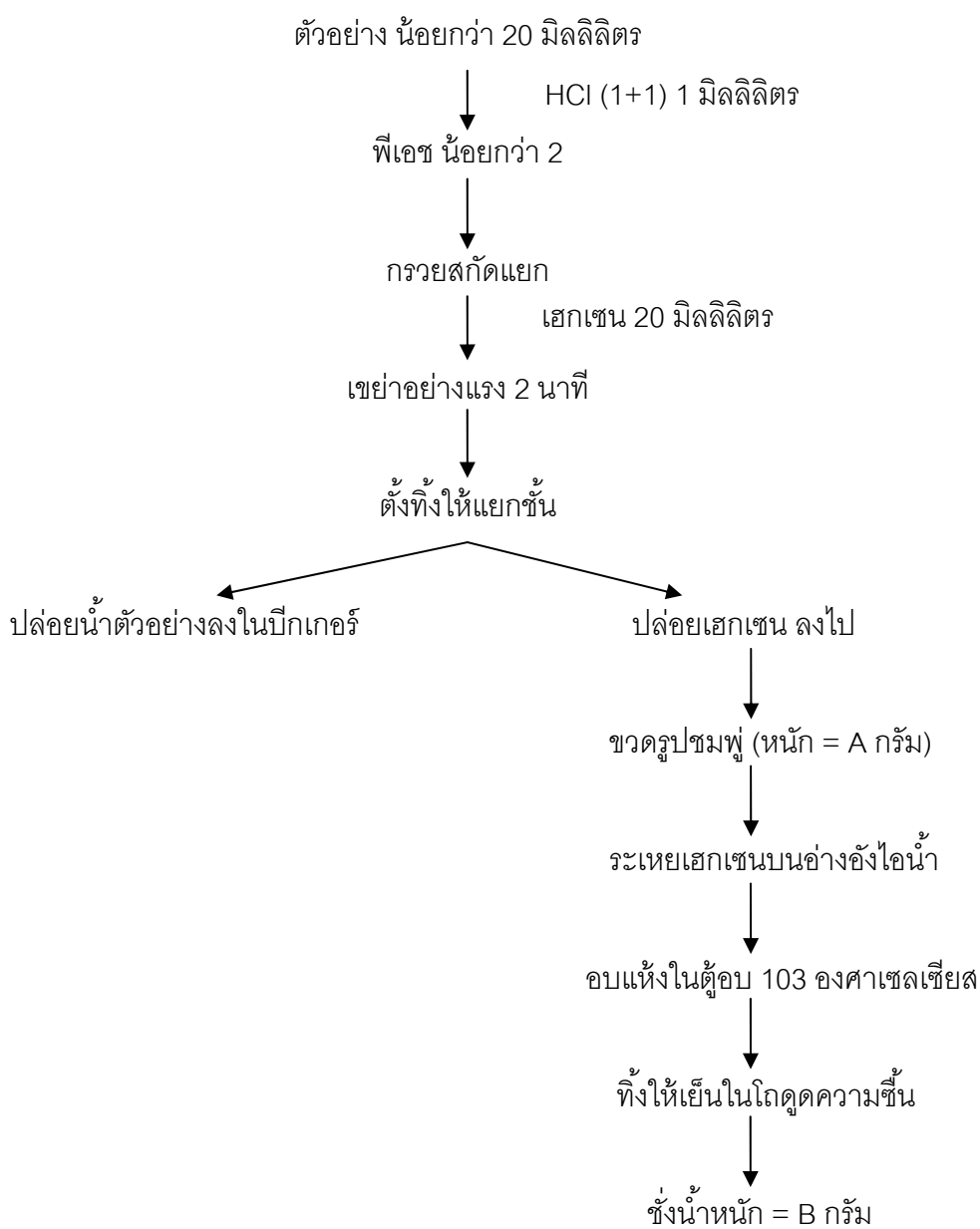
## การคำนวณ

$$\text{น้ำมันและไขมัน, มิลลิกรัมต่อลิตร} = \frac{(A-B) \times 1,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ, มิลลิลิตร}}$$

เมื่อ A : น้ำหนักของขวดกลั่นหลังการทดลอง, มิลลิกรัม

B : น้ำหนักของขวดกลั่นก่อนการทดลอง, มิลลิกรัม

## การวิเคราะห์น้ำมันและไขมันโดยวิธีการสกัดด้วยกรวยแยก



ภาพที่ ก-2 แผนผังการวิเคราะห์น้ำมันและไขมันโดยวิธีการสกัดด้วยกรวยแยก

ภาคผนวก ข

การศึกษาความสามารถในการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์

## ภาคผนวก ข-1 ผลการศึกษาความสามารถในการรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์

ตารางที่ ข-1.1 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่างๆ โดยเติมสารส้มความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความขุ่นเริ่มต้น 1,394 NTU ซีโอดีเริ่มต้น 3,914 มิลลิกรัมต่อลิตร)

pH เริ่มต้น	% การบำบัด		pH น้ำออก	TDS น้ำออก (มก./ล.)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
3	0	40.73	1.84	1930
4	0	42.77	1.95	1200
5	0	42.77	2.46	299
6	0	46.86	3.37	222
7	16.50	65.25	4.07	207
8	98.47	99.59	6.07	189
9	98.90	95.50	6.35	216
10	0	55.03	7.44	274
11	7.03	46.86	9.63	430
12	34.86	42.77	12.3	2790

ตารางที่ ข-1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ในสภาวะความเป็นกรด-ต่าง (pH) ต่างๆ โดยเติมเฟอริกคลอไรด์ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความขุ่นเริ่มต้น 1,394 NTU ซีโอดีเริ่มต้น 3,914 มิลลิกรัมต่อลิตร)

pH เริ่มต้น	% การบำบัด		pH น้ำออก	TDS น้ำออก (มก./ล.)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
3	28.84	40.73	2.63	1732
4	26.97	48.90	2.76	962
5	10.62	59.12	3.00	734
6	0	63.21	3.08	269
7	33.14	65.25	3.75	365
8	99.18	99.18	6.55	293
9	96.24	97.14	6.77	340
10	79.20	86.71	7.17	409
11	55.09	79.56	7.63	488
12	53.08	75.47	11.6	1787

ตารางที่ ข-1.3 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยการเติมสารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ (ความขุ่นเริ่มต้น 1,394 NTU ซีโอดีเริ่มต้น 3,914 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH เริ่มต้น 8)

ความเข้มข้น สารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การบำบัด		pH น้ำออก	TDS น้ำออก (มก./ล.)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
40	46.56	42.77	6.96	165
60	99.07	95.91	6.85	187
70	98.99	99.59	6.8	192
80	98.47	99.59	6.07	189
100	77.40	82.63	6.54	192
120	38.67	69.34	6.4	195

ตารางที่ ข-1.4 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยการเติมเพอร์ริคคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ความขุ่นเริ่มต้น 1,394 NTU ซีโอดีเริ่มต้น 3,914 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH เริ่มต้น 8)

ความเข้มข้น $FeCl_3$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การบำบัด		pH น้ำออก	TDS น้ำออก (มก./ล.)
	ความขุ่น	ซีโอดี		
40	0	48.90	7.1	195
60	0	61.17	7.21	196
70	99.24	96.73	7.43	206
80	99.18	99.18	6.55	293
100	2.30	59.12	6.2	239
120	2.73	62.19	5.22	358



ภาพที่ ข-1.1 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยวิธีจาร์เทสต์



ภาพที่ ข-1.2 ผลของความเป็นกรด-ด่าง ของสารส้ม ในการบำบัดน้ำด้วยวิธีจาร์เทสต์



ภาพที่ ข-1.3 ผลของความเข้มข้นสารส้ม ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีจาร์เทสต์



ภาพที่ ข-1.4 ผลของความเป็นกรด-ด่าง ของเฟอริกคลอไรด์ ในการบำบัดด้วยวิธีจาร์เทสต์



ภาพที่ ข-1.5 ผลของความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ ในการบำบัดด้วยวิธีจาร์เทสต์



ภาคผนวก ค  
การศึกษาความสามารถในการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

ภาคผนวก ค-1 ผลการศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการทดลองในถังปฏิกริยา  
ฟองอากาศแบบที่ละเท

ตารางที่ ค-1.1 ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ในถังปฏิกริยา  
แบบฟองอากาศ (ขั้วไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 A/m<sup>2</sup>, ระยะห่าง  
ระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	ชนิดของขั้วไฟฟ้า		
	ขั้วอะลูมิเนียม	ขั้วเหล็ก	ขั้วแกรไฟต์
0	0.00	0.00	0.00
10	0.48	0.00	0.00
20	22.13	0.00	0.00
30	66.05	33.07	0.00
40	92.85	75.62	0.00
50	99.42	94.70	0.43
60	99.52	97.95	0.31
70	99.54	98.69	1.30
80	99.55	99.25	1.80
90	99.55	99.72	2.42
100	99.59	99.62	3.10
110	99.62	99.74	3.91
120	99.66	99.76	4.90

ตารางที่ ค-1.2 ผลของชนิดข้าวไฟฟ้าที่มีผลต่อความเป็นกรด-ด่าง(pH) ที่เปลี่ยนแปลง ในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (ข้าวไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 125 A/m<sup>2</sup>, ระยะห่างระหว่างข้าว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	ชนิดของข้าวไฟฟ้า		
	ข้าวอะลูมิเนียม	ข้าวเหล็ก	ข้าวแกรไฟต์
0	7.4	7.4	7.4
10	7.4	7.4	7.4
20	7.4	7.4	7
30	7.4	7.5	7
40	7.4	7.5	6.9
50	7.4	7.6	6.8
60	7.4	7.6	6.8
70	7.4	7.7	6.6
80	7.4	7.7	6.6
90	7.5	7.8	6.6
100	7.5	7.8	6.6
110	7.5	7.9	6.5
120	7.5	8	6.5

ตารางที่ ค-1.3 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความชื้น ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 A/m<sup>2</sup> และ 125 A/m<sup>2</sup>)

เวลา (นาที)	50 A/m <sup>2</sup>			125 A/m <sup>2</sup>		
	ระยะห่างระหว่างขั้ว			ระยะห่างระหว่างขั้ว		
	1 ซม.	2 ซม.	4 ซม.	1 ซม.	2 ซม.	4 ซม.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	ND
10	0.00	2.96	0.00	0.75	0.48	ND
20	0.00	3.07	0.00	23.94	22.13	ND
30	0.00	18.22	0.00	80.23	66.05	ND
40	0.00	35.46	11.05	96.85	92.85	ND
50	6.75	58.84	30.41	99.71	99.42	ND
60	40.52	73.98	54.50	99.73	99.52	ND
70	80.19	90.45	77.29	99.74	99.54	ND
80	94.42	96.71	90.24	99.75	99.55	ND
90	97.47	97.91	96.95	99.75	99.55	ND
100	99.06	98.20	98.71	99.77	99.59	ND
110	99.15	99.15	99.15	99.79	99.62	ND
120	99.73	98.74	99.41	99.81	99.66	ND

หมายเหตุ: ND คือ Not done (ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากความจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 63 โวลต์)

ตารางที่ ค-1.4 ผลของจำนวนชั่วโมงไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (โดยใช้ชั่วโมงอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ระยะห่างระหว่างชั่วโมง 2 ซม.)

เวลา (นาที)	จำนวนชั่วโมงไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า				
	25 A/m <sup>2</sup>	50 A/m <sup>2</sup>	75 A/m <sup>2</sup>	100 A/m <sup>2</sup>	125 A/m <sup>2</sup>
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	2.96	7.08	2.43	0.48
20	0.00	3.07	9.25	19.65	22.14
30	0.00	18.22	40.00	57.06	66.05
40	0.00	35.46	69.67	89.61	92.85
50	0.00	58.84	88.33	99.40	99.42
60	0.00	73.98	98.50	99.41	99.52
70	0.00	90.45	99.42	99.42	99.54
80	0.00	96.71	99.47	99.47	99.55
90	3.33	97.91	99.48	99.50	99.55
100	10.98	98.20	99.51	99.51	99.59
110	13.71	99.15	99.69	99.54	99.62
120	32.35	98.74	99.79	99.62	99.66

ตารางที่ ค-1.5 ผลของจำนวนชั่วโมงไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น ที่มีผลต่อพีเอช(pH) ที่เปลี่ยนแปลง ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	จำนวนชั่วโมงไฟฟ้า จำนวน 2 แผ่น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า				
	25 A/m <sup>2</sup>	50 A/m <sup>2</sup>	75 A/m <sup>2</sup>	100 A/m <sup>2</sup>	125 A/m <sup>2</sup>
0	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
10	7.5	7.5	7.4	7.5	7.6
20	7.5	7.6	7.5	7.6	7.7
30	7.6	7.6	7.6	7.9	7.8
40	7.6	7.7	7.6	8.0	7.9
50	7.7	7.7	7.7	8.0	7.9
60	7.7	7.7	7.8	8.1	8.0
70	7.7	7.8	7.8	8.2	8.1
80	7.7	7.8	7.9	8.2	8.2
90	7.7	7.8	8.0	8.2	8.3
100	7.7	7.8	8.1	8.3	8.4
110	7.7	7.8	8.2	8.3	8.5
120	7.7	7.8	8.2	8.5	8.5

ตารางที่ ค-1.6 ผลของจำนวนชั่วโมงไฟฟ้า จำนวน 4 แผ่น ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (โดยใช้ชั่วโมงอะลูมิเนียม จำนวน 4 แผ่น, ระยะห่างระหว่างชั่วโมง 2 ซม.)

เวลา (นาที)	จำนวนชั่วโมงไฟฟ้า จำนวน 4 แผ่น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า					
	25 A/m <sup>2</sup>	50 A/m <sup>2</sup>	75 A/m <sup>2</sup>	100 A/m <sup>2</sup>	125 A/m <sup>2</sup>	250 A/m <sup>2</sup>
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.25
20	0.00	0.00	0.00	2.75	8.59	77.57
30	0.00	0.00	1.16	21.21	38.47	97.08
40	0.00	0.00	8.46	58.06	80.26	99.31
50	0.00	6.67	20.23	86.68	96.28	99.4
60	0.00	17.22	39.08	97.32	98.44	99.44
70	0.00	27.18	60.42	99.58	99.66	99.44
80	3.55	43.43	80.76	99.71	99.66	99.51
90	18.18	75.15	93.7	99.73	99.66	99.58
100	35.75	90.36	98.93	99.73	99.73	99.58
110	47.22	96.38	99.71	99.73	99.73	99.65
120	66.60	99.2	99.8	99.73	99.73	99.65

ตารางที่ ค-1.7 ผลของจำนวนชั่วโมงไฟฟ้า จำนวน 4 แผ่น ที่มีผลต่อพีเอช(pH) ที่เปลี่ยนแปลง ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 4 แผ่น, ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	จำนวนชั่วโมงไฟฟ้า จำนวน 4 แผ่น ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า					
	25 A/m <sup>2</sup>	50 A/m <sup>2</sup>	75 A/m <sup>2</sup>	100 A/m <sup>2</sup>	125 A/m <sup>2</sup>	250 A/m <sup>2</sup>
0	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
10	7.5	7.5	7.4	7.5	7.6	8.6
20	7.5	7.6	7.5	7.6	7.7	9.0
30	7.6	7.6	7.6	7.9	7.8	9.2
40	7.6	7.7	7.6	8.0	7.9	9.6
50	7.7	7.7	7.7	8.0	7.9	9.8
60	7.7	7.7	7.8	8.1	8.0	9.9
70	7.7	7.8	7.8	8.2	8.1	10.2
80	7.7	7.8	7.9	8.2	8.2	10.3
90	7.7	7.8	8.0	8.2	8.3	10.6
100	7.7	7.8	8.1	8.3	8.4	10.6
110	7.7	7.8	8.2	8.3	8.5	10.6
120	7.7	7.8	8.2	8.5	8.5	10.6



ภาคผนวก ค-2 การศึกษากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอกแบบที่ละเท

ตารางที่ ค-2.1 ผลของระดับน้ำด้านบนถังปฏิริยาถังปฏิริยาแบบอากาศยก ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ในถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( ใช้ขี้วัวละอุมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $100 \text{ A/m}^2$ , ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	ระดับน้ำด้านบนถังปฏิริยา		
	0 ซม.	10 ซม.	20 ซม.
0	0.00	0.00	0.00
10	12.70	8.25	2.43
20	31.62	34.20	19.65
30	66.49	62.63	57.06
40	82.09	83.44	89.61
50	97.32	95.72	99.40
60	99.24	99.28	99.41
70	99.53	99.65	99.42
80	99.33	99.56	99.47
90	99.64	99.81	99.50
100	99.65	99.82	99.51
110	99.61	99.77	99.54
120	99.83	99.66	99.62

ตารางที่ ค-2.2 ผลของระดับน้ำด้านบนถึงปฏิริยาถึงปฏิริยาแบบอากาศยก ที่มีผลต่อพีเอช (pH) ที่เปลี่ยนแปลง ในถึงปฏิริยาแบบอากาศยก ( ใช้ขี้วัวละอุนิยม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 A/m<sup>2</sup>, ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	ระดับน้ำด้านบนถึงปฏิริยา		
	0 ซม.	10 ซม.	20 ซม.
0	7.04	7.37	7.4
10	7.34	7.26	7.5
20	7.32	7.38	7.5
30	7.42	7.35	7.5
40	7.55	7.39	7.6
50	7.28	7.5	7.6
60	7.22	7.35	7.7
70	7.02	7.35	7.7
80	7.04	7.39	7.8
90	6.95	7.53	7.8
100	6.76	7.48	7.9
110	6.52	7.32	8
120	6.16	7.35	8

ภาคผนวก ค-3 การเปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก  
มีการไหลวนภายนอก (ALR) แบบที่ละเท

ตารางที่ ค-3.1 ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น  
ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า				
	25 A/m <sup>2</sup>	50 A/m <sup>2</sup>	75 A/m <sup>2</sup>	100 A/m <sup>2</sup>	125 A/m <sup>2</sup>
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	2.96	7.08	2.43	0.48
20	0.00	3.07	9.25	19.65	22.14
30	0.00	18.22	40.00	57.06	66.05
40	0.00	35.46	69.67	89.61	92.85
50	0.00	58.84	88.33	99.40	99.42
60	0.00	73.98	98.50	99.41	99.52
70	0.00	90.45	99.42	99.42	99.54
80	0.00	96.71	99.47	99.47	99.55
90	3.33	97.91	99.48	99.50	99.55
100	10.98	98.20	99.51	99.51	99.59
110	13.71	99.15	99.69	99.54	99.62
120	32.35	98.74	99.79	99.62	99.66

ตารางที่ ค-3.2 ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า				
	25 A/m <sup>2</sup>	50 A/m <sup>2</sup>	75 A/m <sup>2</sup>	100 A/m <sup>2</sup>	125 A/m <sup>2</sup>
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	5.71
30	0.00	0.00	0.00	3.45	18.63
40	0.00	0.00	1.06	74.52	40.35
50	0.00	0.00	20.79	93.16	73.78
60	0.00	0.00	36.77	98.16	92.11
70	0.00	0.38	67.85	99.59	99.18
80	0.00	2.82	88.71	99.60	99.41
90	0.00	14.63	97.16	99.60	99.47
100	3.93	40.24	99.87	99.62	99.52
110	12.16	75.89	99.87	99.65	99.55
120	29.21	93.28	99.87	99.70	99.62

ตารางที่ ข-3.3 ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อความหนาของชั้นตะกอนด้านบนถึงปฏิกิริยา (เซนติเมตร) ในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และอากาศยก (ALR) (โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า									
	25 A/m <sup>2</sup>		50 A/m <sup>2</sup>		75 A/m <sup>2</sup>		100 A/m <sup>2</sup>		125 A/m <sup>2</sup>	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.5	0.1	0.5	0.6
20	0.2	0.1	0.3	0.2	1.0	0.5	1.6	0.5	1.8	1.0
30	0.2	0.2	0.6	0.6	1.7	0.6	3.0	0.90	3.0	1.6
40	0.3	0.3	1.2	0.8	2.4	0.9	4.2	2.6	4.2	3.3
50	0.5	0.3	1.6	1.00	3.7	1.2	4.7	3.0	4.8	3.6
60	0.7	0.4	2.0	1.2	3.8	2.2	5.0	3.4	5.2	4.0
70	1.0	0.5	2.6	1.30	4.2	3.0	5.3	4.2	5.8	4.5
80	1.2	0.6	3.0	1.4	4.6	4.0	6.0	4.5	6.3	4.8
90	1.3	0.8	3.1	1.5	5.2	4.3	6.2	4.8	6.9	5.0
100	1.5	1.0	3.5	2.2	6.1	4.5	6.8	5.0	7.3	5.2
110	1.7	1.3	3.6	3.0	6.8	4.8	7.6	5.2	7.8	5.5
120	2.0	1.6	4.0	3.4	7.1	5.0	8.0	5.2	8.3	5.7

ภาคผนวก ค-4 การเปรียบเทียบการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยกเดินระบบแบบที่ละเท ( ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 A/m<sup>2</sup>, ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

ตารางที่ ค-4.1 ค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ซีไอดี พีเอส (pH) ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และอากาศยก (ALR) ( ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 A/m<sup>2</sup>, ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	% การบำบัด ความขุ่น		% การบำบัด ซีไอดี		pH		TDS (มก./ล.)	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	0.00	0.00	0.00	0.00	7.4	7.4	195	195
10	2.43	0.00	-	-	7.5	7.5	193	195
20	19.65	0.00	38.54	20.00	7.5	7.5	192	194
30	57.06	2.00	-	-	7.5	7.5	187	191
40	89.61	16.56	88.54	50.00	7.6	7.5	183	188
50	99.40	73.81	-	-	7.6	7.5	173	187
60	99.41	96.46	95.00	92.00	7.7	7.5	169	186
70	99.42	99.23	-	-	7.7	7.5	164	184
80	99.47	99.43	95.42	95.20	7.8	7.6	162	180
90	99.50	99.61	-	-	7.8	7.6	160	179
100	99.51	99.65	95.42	96.00	7.9	7.7	159	170
110	99.54	99.72	-	-	8.0	7.8	155	164
120	99.62	99.77	95.83	97.60	8.0	7.9	153	161

ตารางที่ ค-4.2 ค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซีโอดี พีเอส (pH) ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และอากาศยก (ALR) ( ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 A/m<sup>2</sup>, ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	พลังงานที่ใช้ (วัตต์)		อุณหภูมิ (°C)		ตะกอนด้านบน (ซม)		ลักษณะน้ำเสีย ด้านล่าง	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	42.9	42.9	25	25	42.9	42.9	25	25
10	43.4	42.9	26	25.5	43.4	42.9	26	25.5
20	43.9	43.3	27	25.5	43.9	43.3	27	25.5
30	44.4	43.7	27.5	25.5	44.4	43.7	27.5	25.5
40	45.0	44.1	28	26	45.0	44.1	28	26
50	45.7	44.4	28.5	26	45.7	44.4	28.5	26
60	46.4	45.1	28.5	26	46.4	45.1	28.5	26
70	47.4	45.9	28.5	26.5	47.4	45.9	28.5	26.5
80	49.0	46.9	28.5	26.5	49.0	46.9	28.5	26.5
90	49.5	47.7	28.5	26.5	49.5	47.7	28.5	26.5
100	50.1	48.8	28.5	27	50.1	48.8	28.5	27
110	51.0	49.5	29	27	51.0	49.5	29	27
120	51.8	50.4	29	27	51.8	50.4	29	27

ภาคผนวก ค-5 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ ค-5.1 ผลของของอัตราการไหลของน้ำเข้า ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) (ใช้ขี้วัวอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $100 \text{ A/m}^2$ , ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของน้ำเข้า							
	5 ลิตรต่อชั่วโมง		10 ลิตรต่อชั่วโมง		15 ลิตรต่อชั่วโมง		20 ลิตรต่อชั่วโมง	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	28.67	29.39	33.12	29.88	33.73	26.54	18.61	19.16
40	71.33	57.81	54.38	40.17	53.57	37.35	35.36	29.59
60	94.68	76.29	72.47	51.33	55.68	46.93	43.55	37.70
80	94.71	93.17	86.23	59.83	59.03	54.42	48.20	41.50
100	94.84	93.34	86.71	67.86	61.62	64.68	49.69	46.03
120	95.23	94.35	86.76	76.23	62.54	73.22	51.49	49.89
140	95.27	94.58	87.97	83.73	64.92	78.93	53.41	54.42
160	95.37	94.73	88.61	86.39	65.84	81.88	54.59	55.78
180	95.44	94.95	88.98	88.11	66.54	84.89	56.08	57.99
200	95.48	95.30	90.24	89.71	66.59	86.30	57.20	58.96
220	95.53	95.83	90.82	90.24	66.97	86.98	57.63	60.54
240	95.55	96.22	90.88	91.30	67.73	87.16	58.06	61.85
260	95.73	96.64	91.14	91.37	67.84	88.02	58.50	62.70
280	95.78	97.16	91.51	91.43	68.49	88.08	58.50	64.17
300	96.15	97.42	91.61	91.43	68.32	88.57	59.24	64.74



ตารางที่ ค-5.2 ผลของของอัตราการไหลของน้ำเข้า ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) (ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $100 \text{ A/m}^2$ , ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของน้ำเข้า							
	5 ลิตรต่อชั่วโมง		10 ลิตรต่อชั่วโมง		15 ลิตรต่อชั่วโมง		20 ลิตรต่อชั่วโมง	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	93.0	91.0	89.0	89.5	61.0	79.5	58	62.5

ตารางที่ ค-5.3 ผลของของอัตราการไหลของน้ำเข้า ที่มีการบำบัดน้ำมัน (FOG, มิลลิกรัมต่อลิตร) ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) (ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $100 \text{ A/m}^2$ , ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของน้ำเข้า							
	5 ลิตรต่อชั่วโมง		10 ลิตรต่อชั่วโมง		15 ลิตรต่อชั่วโมง		20 ลิตรต่อชั่วโมง	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	208	208	208	208	208	208	208	208
300	3.4	3.4	4.0	3.9	20.2	9.8	46.7	38.6

ตารางที่ ค-5.4 ผลของของอัตราการไหลของน้ำเข้า ที่มีผลต่อความหนาของชั้นตะกอนด้านบนบน (cm) ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) (ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $100 \text{ A/m}^2$ , ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของน้ำเข้า							
	5 ลิตรต่อชั่วโมง		10 ลิตรต่อชั่วโมง		15 ลิตรต่อชั่วโมง		20 ลิตรต่อชั่วโมง	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	7.8	5.3	5.5	4.6	5.4	4.3	5.4	3.2

ตารางที่ ค-5.5 ผลของของอัตราการไหลของน้ำเข้า ที่มีผลต่อพีเอชที่เปลี่ยนแปลง ในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) (ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $100 \text{ A/m}^2$ , ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของน้ำเข้า							
	5 ลิตรต่อชั่วโมง		10 ลิตรต่อชั่วโมง		15 ลิตรต่อชั่วโมง		20 ลิตรต่อชั่วโมง	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	7.9	7.9	7.9	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
20	8.1	8	8	7.8	7.8	7.8	7.81	7.81
40	8.1	8.1	8	7.8	7.8	7.8	7.82	7.82
60	8.2	8.2	8.1	7.8	7.8	7.8	7.83	7.83
80	8.2	8.3	8.1	7.8	7.8	7.9	7.84	7.84
100	8.3	8.4	8.1	7.9	7.8	7.9	7.85	7.85
120	8.3	8.4	8.1	7.9	7.9	7.9	7.85	7.86
140	8.4	8.4	8.1	8	7.9	7.9	7.85	7.87
160	8.5	8.5	8.1	8	7.9	8	7.85	7.88
180	8.5	8.5	8.1	8	7.9	8	7.85	7.89
200	8.5	8.5	8.1	8	7.9	8	7.86	7.9
220	8.5	8.5	8.1	8.1	8	8	7.87	7.9
240	8.6	8.5	8.2	8.1	8	8	7.88	7.91
260	8.6	8.6	8.2	8.1	8	8	7.88	7.91
280	8.6	8.6	8.2	8.1	8	8	7.88	7.92
300	8.6	8.6	8.2	8.1	8	8	7.89	7.92

ตารางที่ ค-5.6 ผลของของอัตราการไหลของน้ำเข้า ที่มีผลต่ออุณหภูมิของน้ำเสีย ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และแบบอากาศยก (ALR) (ใช้ขั้วอะลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $100 \text{ A/m}^2$ , ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม.)

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของน้ำเข้า							
	5 ลิตรต่อชั่วโมง		10 ลิตรต่อชั่วโมง		15 ลิตรต่อชั่วโมง		20 ลิตรต่อชั่วโมง	
	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR	BCR	ALR
0	27	27	27	27	27	27	27	27
20	27	27	28	28	27.5	27	27	27
40	29	28	30	28	28	27.5	27.5	27.5
60	29	28	30	28	29.5	27.5	28	28
80	29.5	28	30	28	29.5	28	29	28.5
100	31	29	30	29	30	28	29.5	29
120	31	29	30	29	30.5	29	29.5	30
140	31	30	30	29	30.5	29	30	30
160	32	30	30	30	30.5	30	31	30
180	33	31	30	30	31	30	31	30
200	34	31	30	30	31	31	31	30
220	34.5	32	31	30	31	31	31	30
240	34.5	32	31	30	31	31	31	30
260	35	33	31	31	31	31	31	30.5
280	35	33	32	31	31	31	31	31
300	35.5	33	32	31	31	13	31	31

ภาคผนวก ง  
ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่าย

## ภาคผนวก ง-1 ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบที่ละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ใช้ขั้วอะลูมิเนียม กว้าง 5 ซม. ยาว 20 ซม. หน้า 2 ซม. จำนวน 2 แผ่น วางห่างกัน 2 ซม. ที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

ถึงปฏิบัติการ	แบบฟองอากาศ		แบบอากาศยก	
	ปริมาณน้ำเสีย (v, ลิตร)	12	12	12
ขั้วไฟฟ้า	จำนวน 2 แผ่น	จำนวน 4 แผ่น	จำนวน 2 แผ่น	จำนวน 2 แผ่น
เวลาในการทำปฏิบัติการ (t, นาที)	120	120	120	120
กระแสไฟฟ้า (I, แอมแปร์)	1.25	2.5	1	1
ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (V, โวลต์)	63	63	50	50
น้ำหนักขั้วหายไป (กรัม)	0.9994	2.2615	0.7992	0.7217
ปริมาณตะกอนด้านบน (มล.)	576	972	555	361
ค่าใช้จ่ายรวม (บาทต่อลบม.)	53.81	110.55	36.31	28.22

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่าย การเดินระบบในถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศ ที่กระแสไฟฟ้า 1.25 A

- พลังงานที่ใช้ =  $VIt/1000$   
 $= (63 \text{ V} \times 1.25 \text{ A} \times (120/60 \text{ h})) / (1000 \times 12/1000)$   
 $= 13.125 \text{ kW-h ต่อลบม.}$
- ค่าไฟฟ้าจาก ECF = พลังงานที่ใช้ x ค่ายูนิตต่อหน่วย x ภาษีร้อยละ 7  
 $= 13.125 \text{ kW-h} \times 2.8095^* \text{ บาทต่อหน่วย} \times 1.07$   
 $= 39.46 \text{ บาท}$
- ราคาขั้วอะลูมิเนียม 155 บาท/กิโลกรัม  
(น้ำหนักขั้วหายไป 0.9994 กรัม/12 ลิตร = 83.28 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
ค่าขั้วไฟฟ้า =  $83.28 \times 0.155 = 12.91 \text{ บาท}$
- ค่ากำจัดตะกอน  
(ตะกอนด้านบน 576 มิลลิลิตร/12 ลิตร = 48 ลิตร/ลูกบาศก์เมตร)  
 $= 48 \text{ ลิตร} \times 30^{**} \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} = 1.44 \text{ บาท}$
- ดังนั้นค่าใช้จ่าย =  $39.46 + 12.91 + 1.44$   
 $= 53.81 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$

ภาคผนวก ง-2 ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ภาคผนวก ง-2.1 ถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศ (BCR)

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศ ปริมาตร 12 ลิตร ใช้ขั้วอะลูมิเนียม กว้าง 5 ซม. ยาว 20 ซม. หน้า 2 ซม. จำนวน 2 แผ่น วางห่างกัน 2 ซม. ใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 50 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์ มีอัตราการไหลของน้ำเข้า คือ 15 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 0.07 กิโลวัตต์

ถ้าต้องการบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้เวลาในการเดินระบบ เป็นเวลา 66.7 ชั่วโมง สามารถประมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดจากระบบได้ดังนี้

- พลังงานที่ใช้ =  $VIt/1000$   
 $= (50 \text{ V} \times 1.00 \text{ A} \times (66.7 \text{ h})) / 1000$   
 $= 3.335 \text{ กิโลวัตต์ ชั่วโมง}$
- ค่าไฟฟ้าจาก ECF = พลังงานที่ใช้ x ค่ายูนิตต่อหน่วย x ภาษีร้อยละ 7  
 $= 3.335 \text{ kW-h} \times 2.8095^* \text{ บาทต่อหน่วย} \times 1.07$   
 $= 10.03 \text{ บาท}$
- ค่าไฟฟ้าจากเครื่องสูบน้ำ  
 $= (0.07 \text{ kW} \times 66.7 \text{ h}) \times 2.8095^* \text{ บาทต่อหน่วย} \times 1.07$   
 $= 14.04 \text{ บาท}$
- ราคาขั้วอะลูมิเนียม 155 บาท/กิโลกรัม  
 (น้ำหนักขั้วหายไป 0.7992 กรัม/12 ลิตร = 66.6 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 ค่าขั้วไฟฟ้า =  $66.6 \times 0.155 = 10.323 \text{ บาท}$
- ค่ากำจัดตะกอน  
 (ตะกอนด้านบน 375 มิลลิลิตร/12 ลิตร = 31.25 ลิตร/ลูกบาศก์เมตร)  
 $= 31.25 \text{ ลิตร} \times 30^{**} \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} = 0.9375 \text{ บาท}$
- ดังนั้นค่าใช้จ่าย =  $10.03 + 14.04 + 10.323 + 0.9375$   
 $= 35.33 \text{ บาท}$   
 (และน้ำเสียได้ขั้วไฟฟ้า ไม่ถูกบำบัด)

## ภาคผนวก ง-2.2 ถึงปฏิบัติการแบบอากาศยก (ALR)

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในถังปฏิบัติการแบบอากาศยก ปริมาตร 15 ลิตร ใช้ขั้วอะลูมิเนียม กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 20 ซม. หนา 2 ซม. จำนวน 2 แผ่น วางห่างกัน 2 ซม. ใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 50 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์ มีอัตราการไหลของน้ำเข้า คือ 15 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 0.07 กิโลวัตต์

ถ้าต้องการบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้เวลาในการเดินระบบ เป็นเวลา 66.7 ชั่วโมง สามารถประมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดจากระบบได้ดังนี้

- พลังงานที่ใช้ =  $VIt/1000$   
=  $(50 \text{ V} \times 1.00 \text{ A} \times (66.7 \text{ h})) / 1000 = 3.335 \text{ kW-h}$
  - ค่าไฟฟ้าจาก ECF = พลังงานที่ใช้ x ค่ายูนิตต่อหน่วย x ภาษีร้อยละ 7  
=  $3.335 \text{ kW-h} \times 2.8095^* \text{ บาทต่อหน่วย} \times 1.07$   
= 10.03 บาท
  - ค่าไฟฟ้าจากเครื่องสูบน้ำ  
=  $(0.07 \text{ kW} \times 66.7 \text{ h}) \times 2.8095^* \text{ บาทต่อหน่วย} \times 1.07$   
= 14.04 บาท
  - ราคาขั้วอะลูมิเนียม 155 บาท/กิโลกรัม  
(น้ำหนักขั้วหายไป 0.7217 กรัม/15 ลิตร = 48.12 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
ค่าขั้วไฟฟ้า =  $48.12 \times 0.155 = 7.46 \text{ บาท}$
  - ค่ากำจัดตะกอน  
(ตะกอนด้านบน 299 มิลลิลิตร/15 ลิตร = 19.94 ลิตร/ลูกบาศก์เมตร)  
=  $19.94 \text{ ลิตร} \times 30^{**} \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} = 0.598 \text{ บาท}$
- ดังนั้นค่าใช้จ่าย =  $10.03 + 14.04 + 7.46 + 0.598$   
= 32.128 บาท

(\* หมายเหตุ : อัตราค่าไฟฟ้า 1 ยูนิต/หน่วย เป็นการคำนวณจากการประกอบกิจการขนาดกลาง คิดอัตราแบบปกติในขนาดแรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์ มีค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.8095 บาทต่อหน่วย, ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีผลตั้งแต่ กรกฎาคม พ.ศ.2554 เป็นต้นไป

\*\* : ราคากำจัดตะกอน โดยฝังกลบ ราคา 30 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยการประมาณ ขึ้นกับชนิดของตะกอนและระยะทางในการขนส่ง)

ภาคผนวก จ



ภาคผนวก จ การคำนวณความเข้มข้นของอะลูมิเนียม

ภาคผนวก จ-1 ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ ในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 120 นาที

ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ สามารถคำนวณจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) โดยมีสมการดังนี้

$$C_{Al} = \frac{M\Phi_e It}{nFV} = \frac{M\Phi_e Q}{nFV}$$

และ

$$\Phi_e = \frac{nF\Delta m}{MQ} = \frac{nF\Delta m}{Mit}$$

- เมื่อ  $C_{Al}$  : ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ (กรัมต่อลิตร)  
 $M$  : น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด (กรัมต่อโมล),  
 $I$  : ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์),  
 $n$  : จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิริยารีดอกซ์ ( $Al = 3$ ),  
 $t$  : เวลาที่ใช้ (วินาที),  
 $F$  : ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ,  
 $V$  : ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ลิตร) และ  $\Phi_e$  คือ ค่าฟาราดีกียีล (Faradic yield)  
 $\Delta m$  : น้ำหนักของขั้วอะลูมิเนียม (Al) ที่หายไป (กรัม)

ตารางที่ จ-1 ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ และแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 120 นาที

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	ถังปฏิริยาแบบ ฟองอากาศ			ถังปฏิริยาแบบ อากาศยก		
		น้ำหนักของขั้ว Al ที่หายไป	$\Phi_e$	C(t)	น้ำหนักของขั้ว Al ที่หายไป	$\Phi_e$	C(t)
25	0.25	0.3292	1.96	27	0.3008	1.79	20
50	0.50	0.4463	1.33	37	0.385	1.14	26
75	0.75	0.6351	1.26	53	0.5542	1.10	37
100	1.00	0.7992	1.19	67	0.7217	1.07	48
125	1.25	0.9994	1.19	83	0.9006	1.07	60

ภาคผนวก จ-2 ปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำจากทฤษฎี และที่วัดได้จากวิธี  $N_2O-C_2H_2$  Flame Atomic Atomic Absorption Spectrophotometry ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลาต่างๆ

เมื่อศึกษาการละลายปริมาณของไอออนอะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$  ions) ที่ละลายน้ำจากทฤษฎีอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

$$W = \frac{I \cdot t \cdot M}{Z \cdot F}$$

- โดยที่ W : ปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ, กรัม  
 I : ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง, แอมแปร์  
 M : น้ำหนักโมเลกุลที่ไอออน, กรัมต่อโมล  
 Z : จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์, ประจุต่อโมล  
 t : เวลาที่ใช้, วินาที  
 F : ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ

ตารางที่ จ-2 ปริมาณ  $Al^{3+}$  ที่ละลายในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาที)	ปริมาณ $Al^{3+}$ ที่ละลายในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ		ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก		
	จากการคำนวณ	ค่าเฉลี่ยจากการวัดด้วยวิธี AA	จากการคำนวณ	ค่าเฉลี่ยจากการวัดด้วยวิธี AA	
			Riser	Downcommer	
0	0	0	0	0	0
20	7.457	0.041	9.321	0.093	0.033
40	14.913	0.088	18.642	0.742	0.421
60	22.370	0.295	27.962	1.217	0.453
80	29.826	0.516	37.283	1.114	0.517
100	37.283	0.573	46.604	1.589	0.642
120	44.740	0.904	55.925	1.87	1.047

ภาคผนวก จ-3 การศึกษาผลของฟังก์ชันการกระจายเรซิดเดนซีไทม์ (residence time distribution, RTD)

ตารางที่ จ-3.1 การติดตามความนำไฟฟ้าในการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) และอากาศยก (ALR) ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร แบบที่ละเท

เวลา (วินาที)	BCR ความนำไฟฟ้า (mS/m <sup>2</sup> )	ALR ความนำไฟฟ้า (mS/m <sup>2</sup> )
0	217	283
5	217	283
10	217	283
15	217	283
20	217	283
30	217	283
40	217	283
50	217	283
60	218	283
70	218	283
80	217	283
90	221	283
100	223	283
110	224	283
120	234	283
130	235	315
140	238	365
150	240	378
160	253	392
170	253	389
180	260	382
190	272	380
200	276	377
210	280	371
220	278	363
230	270	348
240	268	343

เวลา (วินาที)	BCR ความนำไฟฟ้า (mS/m <sup>2</sup> )	ALR ความนำไฟฟ้า (mS/m <sup>2</sup> )
250	259	331
260	255	325
270	254	318
280	252	312
290	249	305
300	242	302
310	238	294
320	237	283
330	235	283
340	233	283
350	227	283
360	223	283
370	218	283
380	220	283
390	217	283
400	217	283
420	217	283
440	217	283
460	217	283
480	217	283
500	217	283
520	217	283
540	217	283
560	217	283
580	217	283
600	217	283

ตารางที่ จ-3.1 การติดตามความนำไฟฟ้าในการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าต่างๆ โดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เวลา (วินาที)	ความนำไฟฟ้า(mS/m <sup>2</sup> )			
	5 LPH	10 LPH	15 LPH	20 LPH
0	217	217	217	217
5	217	217	217	217
10	217	217	217	217
15	217	217	217	217
20	217	217	217	217
30	217	217	217	217
40	217	217	217	217
50	217	217	217	217
60	218	219	219	220
70	218	223	223	228
80	220	224	224	231
90	221	226	226	236
100	224	230	230	249
110	228	236	240	255
120	232	238	248	267
130	238	242	252	291
140	248	258	264	302
150	250	281	271	304
160	258	284	278	305
170	264	290	282	301
180	268	292	282	298
190	274	290	284	300
200	280	287	282	298
210	282	284	272	294
220	284	284	268	287
230	286	277	257	276
240	284	274	250	261

เวลา (วินาที)	ความนำไฟฟ้า(mS/m <sup>2</sup> )			
	5 LPH	10 LPH	15 LPH	20 LPH
250	272	257	244	252
260	269	248	241	248
270	258	237	234	241
280	250	233	233	230
290	244	231	228	228
300	240	230	223	224
310	239	227	221	222
320	234	227	220	220
330	235	225	219	219
340	232	224	219	218
350	230	222	218	218
360	228	218	218	217
370	224	218	217	217
380	220	218	217	217
390	218	217	217	217
400	217	217	217	217
420	217	217	217	217
440	217	217	217	217
460	217	217	217	217
480	217	217	217	217
500	217	217	217	217
520	217	217	217	217
540	217	217	217	217
560	217	217	217	217
580	217	217	217	217
600	217	217	217	217

ตารางที่ จ-3.2 การติดตามความนำไฟฟ้าในการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ALR) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าต่างๆ โดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เวลา (วินาที)	ความนำไฟฟ้า(mS/m <sup>2</sup> )			
	5 LPH	10 LPH	15 LPH	20 LPH
0	283	283	283	283
5	283	283	283	283
10	283	283	283	283
15	283	283	283	283
20	283	283	283	283
30	283	283	283	283
40	283	283	283	283
50	283	283	283	283
60	283	283	283	283
70	283	283	283	283
80	283	283	283	283
90	283	283	283	293
100	283	283	302	307
110	298	302	309	350
120	304	317	315	370
130	347	331	345	389
140	396	365	387	412
150	411	382	408	417
160	426	402	412	422
170	422	403	408	417
180	419	398	407	413
190	418	387	405	406
200	406	380	403	400
210	398	377	397	375
220	387	355	372	356
230	376	337	346	341
240	369	336	346	330

เวลา (วินาที)	ความนำไฟฟ้า(mS/m <sup>2</sup> )			
	5 LPH	10 LPH	15 LPH	20 LPH
250	354	320	324	325
260	350	317	306	304
270	332	307	302	298
280	310	301	298	294
290	289	299	294	283
300	287	294	284	283
310	284	285	283	283
320	283	283	283	283
330	283	283	283	283
340	283	283	283	283
350	283	283	283	283
360	283	283	283	283
370	283	283	283	283
380	283	283	283	283
390	283	283	283	283
400	283	283	283	283
420	283	283	283	283
440	283	283	283	283
460	283	283	283	283
480	283	283	283	283
500	283	283	283	283
520	283	283	283	283
540	283	283	283	283
560	283	283	283	283
580	283	283	283	283
600	283	283	283	283

ภาคผนวก จ-4 การศึกษาค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและเฟสของเหลว

ตารางที่ จ-4.1 ค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ในการเดินระบบในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (BCR) เมื่อเดินระบบโดยใช้หัวอะลูมิเนียมเป็นหัวไฟฟ้า

ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	ขนาด ฟองอากาศ (mm)	อัตราการไหล (Q <sub>g</sub> ) (m <sup>3</sup> /s)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (a) (m <sup>-1</sup> )	ความเร็ว เกรเดียนท์ (G) (s <sup>-1</sup> )
25	0.33	6.21 x 10 <sup>-8</sup>	3.77	8.753
50	0.33	8.43 x 10 <sup>-8</sup>	5.11	10.192
75	0.33	1.2 x 10 <sup>-7</sup>	7.27	12.158
100	0.32	1.51 x 10 <sup>-7</sup>	9.44	13.638
125	0.32	1.89 x 10 <sup>-7</sup>	11.80	15.251

ตารางที่ จ-4.2 ค่าทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ในการเดินระบบในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ALR) เมื่อเดินระบบโดยใช้หัวอะลูมิเนียมเป็นหัวไฟฟ้า

ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	ขนาด ฟองอากาศ (mm)	อัตราการไหล (Q <sub>g</sub> ) (m <sup>3</sup> /s)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (a) (m <sup>-1</sup> )	ความเร็ว เกรเดียนท์ (G) (s <sup>-1</sup> )
25	0.33	5.68 x 10 <sup>-8</sup>	2.76	8.367
50	0.33	7.27 x 10 <sup>-8</sup>	3.53	9.466
75	0.33	1.05 x 10 <sup>-7</sup>	5.08	11.357
100	0.32	1.36 x 10 <sup>-7</sup>	6.82	12.960
125	0.32	1.70 x 10 <sup>-7</sup>	8.51	14.478

ตารางที่ จ-4.3 ความเร็วของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศในการเดินระบบในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ALR) เมื่อเดินระบบโดยใช้หัวอะลูมิเนียมเป็นหัวไฟฟ้า

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	ความเร็วของเหลวในส่วน ไม่เต็มอากาศ (U <sub>LD</sub> ) (cm/s)
25	3.676
50	4.049
75	4.552
100	4.819
125	5.217

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชยานิน พรหมจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 21 เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2528 ที่จังหวัด นครพนม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีวะวิทยา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2552

### การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

- [1] Chayanin Prommajun, Nattawin Chawaloesthesi and Pisut Painmanakul. “Application of Bubble Column and Air-lift Reactors for Oily Wastewater Treatment by Electro-Coagulation/Flotation Process” Proceedings of the 4<sup>th</sup> AUN/SEED-Net Regional Conference on Global Environment and Seminar of NRCT- JSPS Asian Core Program. The Emerald Hotel Bangkok, Thailand 18-19 January, 2012.
- [2] ชยานิน พรหมจันทร์, ณัฐวิญญู ขวเลิศพรศิยา, และ พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล “การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศและอากาศยก” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 11 และ 1<sup>st</sup> International Conference on Environmental Science, Engineering and Management. ณ โรงแรมโพธิ์วิล รีสอร์ท แอนด์ สปา เชียงราย วันที่ 21-23 มีนาคม 2555.
- [3] Chayanin Prommajun, Nattawin Chawaloesthesi and Pisut Painmanakul. “Application of Bubble Column and Air-lift Reactors for Oily Wastewater Treatment by Electro-Coagulation/Flotation Process” Publication in Thai Environmental Engineering Journal vol 26. No.1 January-April 2012: 13-17.