

การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยการรวมตะกอน
ด้วยไฟฟ้าที่มีการเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนิโพลาร์หลายเซลล์

นาย อนุรักษ์ กสิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF BIODIESEL WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION
WITH MONOPOLAR MULTIPLE ELECTRODES

Mr. Nattapon Kasiwat

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มี
การเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมนิโพลาร์หลายเซลล์

โดย

นาย ณิชพล กสิวัฒน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณี)

ณัฐพล กสิวัฒน์ : การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการเรียง
ขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์หลายเซลล์ (TREATMENT OF BIODIESEL WASTEWATER
BY ELECTROCOAGULATION WITH MONOPOLAR MULTIPLE ELECTRODES)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 113 หน้า

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกสูง เนื่องจากมี
การปนเปื้อนของมลสารจำพวกไขมันและน้ำมัน สบู่ เมทานอล รวมทั้งกลีเซอรอลในปริมาณที่สูง
จึงยากต่อการบำบัดด้วยระบบทางชีวภาพโดยทั่วไป การวิจัยนี้เป็นการทดลองบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ชนิดขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ และแกรไฟต์-
แกรไฟต์ ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไหลต่อเนื่อง การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์หลายเซลล์
ต่อแบบขนาน โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการทดลองทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ ชนิดของขั้วไฟฟ้า
2 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ และแกรไฟต์-แกรไฟต์ อัตราการไหล 3 ค่า ได้แก่ 1 4 และ 6
ลิตร/ชั่วโมง และค่ากระแสไฟฟ้า 3 ค่า ได้แก่ 1 2 และ 3 แอมแปร์ จากการศึกษาพบว่า
ประสิทธิภาพการในการกำจัดไขมันและน้ำมัน ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีจะแปรผันตามหลาย
ปัจจัย ได้แก่ ชนิดขั้วไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อัตราการไหล และพีเอชในระบบ โดย สภาวะที่เหมาะสม
ในบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล คือ การใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์ ป้อนน้ำเสียด้วย อัตราการไหล
4 ลิตร/ชั่วโมง และ กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมัน
ของแข็งแขวนลอยและซีโอดี เท่ากับร้อยละ 97.58 81.74 และ 18.91 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า
ระบบสามารถผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 17.71 มิลลิลิตร/นาที่ โดยใช้พลังงานเท่ากับ
2.25 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร และพีเอชน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเท่ากับ 6.88

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2552.....

##5070553621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : BIODIESEL WASTEWATER/ ELECTROCOAGULATION/ GREASE AND OIL REMOVAL/ COD REMOVAL

NATTAPON KASIWAT : TREATMENT OF BIODIESEL WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION WITH MONOPOLAR MULTIPLE ELECTRODES.
 THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF ORATHAI CHAVALPARIT,Ph.D., 113 pp.

Wastewater from biodiesel production process contains a high level of chemical oxygen demand (COD) due to contamination of high contents of grease & oil, soap, methanol, and glycerol. Thus, conventional biological treatment processes are not satisfactory for removal of the wastewater contaminants. This research was aimed to study the treatment of biodiesel production wastewater using a continuous flow electrocoagulation reactor with monopolar electrodes. The effects of various experimental parameters were investigated including electrode type (aluminium-graphite and graphite-graphite), flow rate (1, 4, and 6 L/hr), and current density (1, 2, and 3 A). Results showed that the removal efficiencies for grease & oil, suspended solids, and COD were varied with the electrode type, current density, flow rate, and wastewater pH. The study electrocoagulation system was effective at reducing grease & oil, suspended solids, and COD by 97.58%, 81.74%, and 18.91%, respectively, at the optimum conditions of 4-L/hr flow rate, 2-A current density, and aluminium-graphite as electrodes. Moreover, the electrocoagulation process had the gas production of 17.71 ml/min and effluent pH of 6.88. Energy consumption for this wastewater treatment was 2.25 kW-hr/m³.

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

Field of study : ..Environmental Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year : ...2009.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง รวมถึงแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ และอาจารย์ ดร. มณีรัตน์ องค์กรรรณดี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอน และถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ที่สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ปตท. เคมิคอล จำกัด(มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องน้ำเสียในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ความรัก กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมาจนประสบความสำเร็จ

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สำหรับทุกๆ ความช่วยเหลือที่มีให้จนประสบความสำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไบโอดีเซล.....	4
2.1.1 ความหมายของไบโอดีเซล.....	4
2.1.2 ประเภทของไบโอดีเซล.....	4
2.1.3 วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล.....	5
2.1.4 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์.....	6
2.1.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	7
2.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อน.....	9
2.3 กระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	10
2.3.1 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	10
2.3.2 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	13
2.3.3 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเฉื่อยและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	15
2.3.4 ค่าการนำไฟฟ้า.....	16
2.3.5 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ.....	17
2.3.6 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี.....	18
2.4 การประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย.....	19
2.4.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation: EO).....	19
2.4.2 กระบวนการรวมตัวตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation: EC).....	21

	หน้า
2.4.3 การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีของกระบวนการรวมตะกอน ด้วยไฟฟ้า.....	23
2.4.4 ชนิดขั้วไฟฟ้า (Electrodes).....	25
2.5 การควบคุมสมรรถภาพการทำงานของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation: EC).....	27
2.5.1 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	27
2.5.2 หลักการในการออกแบบระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	28
2.5.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	28
2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
2.6.1 การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลและน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน.....	29
2.6.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันและไขมัน โดยกระบวนการรวม ตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	31
2.6.3 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วย ไฟฟ้า.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 แผนการวิจัย.....	34
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.2.1 ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	35
3.2.2 ขั้วไฟฟ้า.....	36
3.2.3 การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ปฏิกรณ์.....	36
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	37
3.3.1 น้ำเสีย.....	37
3.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	39
3.3.3 ตัวแปรศึกษา.....	40
3.4 วิธีการทดลอง.....	42
3.4.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	42
3.4.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ ขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์.....	43
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย ตะกอนและก๊าซที่เกิดขึ้น.....	43
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	44

	หน้า
4.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	44
4.2 การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	44
4.2.1 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....	45
4.2.2 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....	50
4.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซ.....	55
4.2.4 พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบ.....	57
4.2.5 น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สลายตัวไปหลังการทดลอง.....	59
4.2.6 พลังงานที่ใช้ในการทดลอง.....	61
4.2.7 สรุปผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนด้วย ไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	64
4.3 การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์.....	66
4.3.1 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....	66
4.3.2 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....	71
4.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซ.....	75
4.3.4 พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบ.....	76
4.3.5 น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สลายตัวไปหลังการทดลอง.....	77
4.3.6 พลังงานที่ใช้ในการทดลอง.....	79
4.3.7 สรุปผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนด้วย ไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	81
4.4 การเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....	82
4.4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด.....	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.1.1 ศึกษาผลของชนิดขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและ น้ำมันจากน้ำเสียไปโอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการต่อ ขั้วแบบ โมโน โพลาร์หลายเซลล์.....	84
5.1.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันไป โอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบ โมโน โพลาร์ หลายเซลล์.....	85

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	92
ภาคผนวก ข ภาพประกอบการทดลอง.....	101
ภาคผนวก ค การคำนวณกระแสไฟฟ้าและค่าจี้ไฟฟ้า.....	105
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์เมทานอล กลีเซอรอล และตะกอน.....	107
ภาคผนวก จ ตัวอย่างคักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กทรอนิกส์ 25 องศาเซลเซียส.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113

สารบัญญัตราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	ศักยภาพของตัวออกซิไดส์ตามสารตั้งต้น.....	21
ตารางที่ 3.1	ลักษณะน้ำเสียของกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล.....	38
ตารางที่ 3.2	ค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลอง.....	41
ตารางที่ 3.3	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสียและตะกอน.....	43
ตารางที่ 4.1	ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล.....	44
ตารางที่ 4.2	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียโดยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	45
ตารางที่ 4.3	ผลการทดลองแสดงอัตราการเกิดก๊าซในระบบ.....	55
ตารางที่ 4.4	น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่สลายตัวและค่าขี้ไฟฟ้า.....	59
ตารางที่ 4.5	ผลของค่าพลังงานและค่าไฟฟ้า.....	62
ตารางที่ 4.6	สรุปผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนด้วย ไฟฟ้าโดยใช้ขี้ไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	65
ตารางที่ 4.7	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียโดยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	66
ตารางที่ 4.8	ผลการทดลองแสดงอัตราการเกิดก๊าซในระบบ.....	75
ตารางที่ 4.9	น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่สลายตัวและค่าขี้ไฟฟ้า.....	78
ตารางที่ 4.10	ผลของค่าพลังงานและค่าไฟฟ้า.....	79
ตารางที่ 4.11	สรุปผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนด้วย ไฟฟ้าโดยใช้ขี้ไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์.....	81

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์.....	4
รูปที่ 2.2	กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	8
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์เมื่อควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	13
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่.....	14
รูปที่ 2.5	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน.....	24
รูปที่ 2.6	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม.....	24
รูปที่ 2.7	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์.....	25
รูปที่ 3.1	อุปกรณ์และถังปฏิกรณ์.....	35
รูปที่ 3.2	ขนาดและองค์ประกอบของถังปฏิกรณ์.....	35
รูปที่ 3.3	การจัดเรียงขั้วแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์ต่อขนานที่ใช้ในการทดลอง.....	36
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการป้อนน้ำเสียเข้าระบบ.....	37
รูปที่ 3.5	แผนผังการบำบัดน้ำเสีย.....	38
รูปที่ 3.6	ผังการทดลองที่ใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	39
รูปที่ 3.7	ผังการทดลองที่ใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์.....	40
รูปที่ 4.1	ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	46
รูปที่ 4.2	ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	47
รูปที่ 4.3	ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอไลท์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	49
รูปที่ 4.4	ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	51
รูปที่ 4.5	ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	52
รูปที่ 4.6	ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดซีโอไลท์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	54
รูปที่ 4.7	ผลของกระแสต่อการเกิดก๊าซที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	56
รูปที่ 4.8	ผลของอัตราการไหลต่อการเกิดก๊าซที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	57
รูปที่ 4.9	กราฟการตกตะกอนของอะลูมิเนียมที่พีเอชต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.10	ระดับพีเอชกับช่วงเวลาเก็บน้ำที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	58
รูปที่ 4.11	ผลของขั้วไฟฟ้าที่ลดลงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	60
รูปที่ 4.12	ผลของค่าขั้วไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์.....	60

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.13	ค่าขั้วไฟฟ้าต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์..... 61
รูปที่ 4.14	ค่าไฟฟ้าที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์..... 63
รูปที่ 4.15	ค่าไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์..... 63
รูปที่ 4.16	ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา..... 64
รูปที่ 4.17	น้ำเสียก่อน-หลังทำปฏิกิริยา..... 65
รูปที่ 4.18	ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์.. 68
รูปที่ 4.19	ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์ 69
รูปที่ 4.20	ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดชีโอดีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 70
รูปที่ 4.21	ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์. 72
รูปที่ 4.22	ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 72
รูปที่ 4.23	ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดชีโอดีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 74
รูปที่ 4.24	ผลของกระแสต่อการเกิดก๊าซที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 75
รูปที่ 4.25	ผลของอัตราการไหลต่อการเกิดก๊าซที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 76
รูปที่ 4.26	ระดับพีเอชกับช่วงเวลาเก็บน้ำที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 77
รูปที่ 4.27	ค่าขั้วไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 78
รูปที่ 4.28	ค่าไฟฟ้าที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 79
รูปที่ 4.29	ค่าไฟฟ้าที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์..... 80
รูปที่ 4.30	ค่าไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์ 80
รูปที่ 4.31	ผลของขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมัน..... 82
รูปที่ 4.32	ผลของขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย..... 83
รูปที่ 4.33	ผลของขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดี..... 83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากนโยบายรัฐบาลที่ได้มีการกำหนด แผนปฏิบัติการการพัฒนาและส่งเสริมการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซล โดยตั้งเป้าหมายในปี 2554 จะสามารถทดแทนปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลได้ถึง 8.5 ล้านลิตรต่อวัน จากนโยบายนี้ส่งผลให้มีการตั้งหน่วยงานส่งเสริมการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้มีของเสียและน้ำเสียเกิดขึ้นมาก ปัจจุบันโรงงานไบโอดีเซลในประเทศไทยมีจำนวนทั้งสิ้น 43 โรงงาน กำลังการผลิตทั้งสิ้น 1.5 ล้านลิตร/วัน โรงงานไบโอดีเซลมากกว่าร้อยละ 90 ใช้น้ำมัน ปาล์ม เป็นวัตถุดิบและใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาของไขมันและน้ำมันกับแอลกอฮอล์ที่ทำให้เกิดไบโอดีเซล(เมทิลเอสเทอร์) กับกลีเซอรอล โดยใช้สารต่างตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจะมีขั้นตอนการล้างน้ำมันเพื่อให้ไขมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความสะอาดและมีคุณภาพได้ตามมาตรฐาน โดยใช้น้ำเป็นตัวดูดซับแอลกอฮอล์ สารต่าง และสบู่ ส่วนเกินที่เหลือค้างอยู่ในน้ำมันออกไป ทำให้น้ำเสียมีการปนเปื้อนน้ำมัน สบู่ กลีเซอรอล และเมทานอล ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งไม่สามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงได้ ในขณะที่การวิจัยและศึกษาในเรื่องของการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลยังมีอยู่อย่างจำกัด ทำให้ต้องมีการศึกษาและวิจัยเพื่อหาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพ เหมาะสมกับค่าใช้จ่ายและเพื่อรองรับการขยายตัวของกำลังการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น

ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation process) เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการสร้างตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ ที่ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวให้อิเล็กตรอนผ่านทางขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน และไฮโดรไลซิส ที่ทำให้น้ำเกิดแตกตัวได้ก๊าซไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งจะเป็นสารรวมตะกอน ช่วยให้สารแขวนลอยเล็กๆ รวมตัวกันตกตะกอนและแยกตัวออกได้ดี ทำให้สามารถกำจัดซีโอดี ไขมันและน้ำมัน และของแข็งแขวนลอย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สร้างและดูแลระบบได้ง่าย สามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้นของโรงกลั่นไบโอดีเซลได้ เพื่อลดค่าซีโอดี ไขมันและน้ำมัน และของแข็งแขวนลอยก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของชนิดขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันจากน้ำเสียไบโอดีเซลด้วยการระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์
2. ศึกษาผลกระทบของอัตราการไหล และกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันจากน้ำเสียไบโอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้กระบวนการการผลิตทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
2. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าระดับห้องปฏิบัติการ เป็นการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) โดยใช้ถังปฏิกรณ์ปริมาตร 2 ลิตร
3. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วแกรไฟต์ โดยแบ่งการจัดคู่ขั้วไฟฟ้าออกเป็น 2 ชุด คือ
 - ชุดที่ 1 ใช้ขั้วแอโนดเป็นขั้วอะลูมิเนียมและขั้วแคโทดเป็นขั้วแกรไฟต์
 - ชุดที่ 2 ใช้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเป็นขั้วแกรไฟต์
4. จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

1.5 เซนติเมตร

5. ศึกษาตัวแปรต่างๆตามที่กำหนด ดังนี้
 - ปรับเปลี่ยนอัตราการไหล 3 ค่า ได้แก่ 1 4 และ 6 ลิตร/ชั่วโมง
 - กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 1 2 และ 3 แอมแปร์
6. พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าพีเอช ไขมันและน้ำมัน ซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย เมทานอล กลีเซอรอล น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ลดลง และองค์ประกอบของตะกอนที่เกิดจากการบำบัด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีแนวทางการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นจากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบรวมตะกอน
ด้วยไฟฟ้าของโรงงานผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

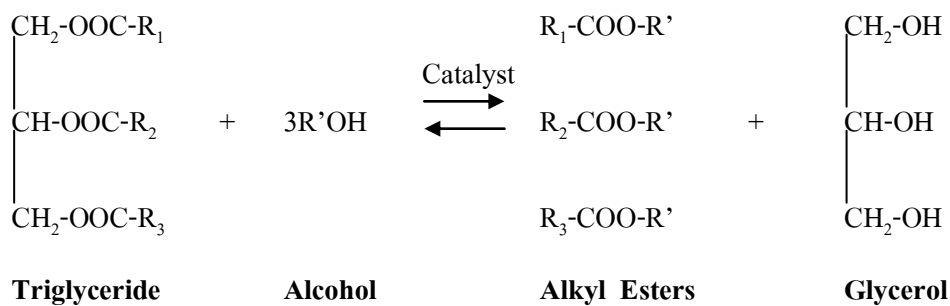
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

2.1.1 ความหมายของไบโอดีเซล (กระทรวงพลังงาน, 2548)

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Alcoholysis ซึ่งเป็นปฏิกิริยาของไขมันและน้ำมันกับแอลกอฮอล์ที่ทำให้เกิดอัลคิลเอสเทอร์ (Biodiesel) กับกลีเซอรอล โดยปกติจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยเพื่อลดเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา และเพิ่มปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังแสดงในสมการ



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์

กลีเซอรอลจะเป็นผลพลอยได้ที่มีคุณค่าทางอุตสาหกรรม เครื่องสำอาง เอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายน้ำมันดีเซล จะใช้แทนน้ำมันดีเซลหรือเติมเป็นส่วนผสมในน้ำมันดีเซลสำหรับใช้กับเครื่องยนต์

2.1.2 ประเภทของไบโอดีเซล ที่นำมาใช้งานแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

1. น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ ไบโอดีเซลชนิดนี้เป็นการนำเอาไขมันพืช เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว หรือน้ำมันสัตว์มาใช้โดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลแบบไม่ต้องผสมสารเคมีอื่น ซึ่งไบโอดีเซลชนิดนี้ใช้ได้กับเฉพาะเครื่องยนต์รอบต่ำ มีคุณสมบัติแตกต่างจากดีเซลมาก ทำให้

เครื่องยนต์สันดาปไม่สมบูรณ์ เครื่องสะดุด และเกิดตะกอนขาวติดอยู่ในถังน้ำมัน ทำให้เครื่องยนต์มีความหนืดเมื่ออุณหภูมิต่ำลง มีผลต่อการสตาร์ทเครื่องทำให้เครื่องติดยากหรืออาจไม่ติดเลย

2. **ไบโอดีเซลแบบลูกผสม** เป็นการผสมน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ที่กล่าวมา กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด เช่น ปาล์มดีเซล (Palm-diesel) เป็นการผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์รถดำหรือเครื่องจักรกลทางการเกษตร การแปลงให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลทำให้ลดปัญหาเรื่องความหนืดของเครื่องยนต์และการสตาร์ทเครื่องลงไปได้ แต่ก็ยังมีปัญหาในเรื่องของการอุดตันของไส้กรองเครื่องยนต์ที่จะเกิดการอุดตันได้เร็วกว่าปกติ

3. **ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์** เป็นประเภทของไบโอดีเซลที่นานาชาติรู้จักและยอมรับกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด โดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยน ไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในรูปของเอสเทอร์ โดยจะเรียกตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาว่าเป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ ข้อดีของไบโอดีเซลแบบนี้ คือ มีค่าซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้จุดติดไฟได้ง่าย การสันดาปสมบูรณ์เกิดคาร์บอนไดออกไซด์น้อย ไม่มีควันดำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำลายสิ่งแวดล้อม มีค่าความหนืดคงที่ ข้อเสีย คือ มีราคาแพง ต้นทุนสูงกว่าไบโอดีเซลแบบอื่นๆ เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซล มีการสร้างก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เพิ่มขึ้น

2.1.3 **วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล** (บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน), 2550)

1. **เมล็ดเรพ** มีลักษณะเป็นเมล็ดเล็กๆ เหมือนเมล็ดงา เป็นพืชล้มลุกประเภทวัชพืชที่พบอยู่ทั่วไปในทวีปยุโรป ปัจจุบันเมล็ดเรพเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดในยุโรป คือ มีส่วนแบ่งในการผลิตถึงร้อยละ 80 ของวัตถุดิบอื่นๆ ทั้งหมด

2. **ถั่วเหลือง** เป็นพืชน้ำมันที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดในสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีปริมาณการผลิตถั่วเหลืองสูงถึงกว่า 30 ล้านตันต่อปี นอกจากนี้ยังมีประเทศอิตาลีซึ่งนิยมใช้ถั่วเหลืองในการผลิตไบโอดีเซล

3. **ปาล์มน้ำมัน** เป็นพืชน้ำมันที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยขณะนี้ เนื่องจากเป็นพืชที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น คือ มีต้นทุนการผลิตต่ำ ให้ผลตอบแทนกำไรต่อไร่ สูงถึงประมาณ 4,000 บาทต่อปี จึงมีการส่งเสริมให้เกษตรกรมีการปลูกปาล์มพันธุ์ดีทดแทนพืชอื่นๆ ที่มีรายได้ต่ำกว่า

4. **สบู่ดำ** มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* Linn. โดยสบู่ดำเป็นพืชน้ำมันที่เพาะปลูกง่ายไม่ต้องดูแลมาก ทนต่อสภาพแล้งและน้ำท่วมทำให้ปลูกได้ในพื้นที่ทั่วทุกภาค

แม้แต่ในพื้นที่ที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้น้อย น้ำมันที่บีบจากผลสบู่ดำสามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำสำหรับการเกษตรแทนน้ำมันดีเซลได้ทันที โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ แต่มีปัญหาด้านคุณภาพบางประการ อาทิค่าความหนืดที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลถึง 10 เท่า ทำให้ไม่สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูงทั่วไปได้ จำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แปลงเป็นไบโอดีเซลก่อนนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลปกติเพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

5. **น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว** เป็นวัตถุดิบอีกประเภทหนึ่ง ที่ควรส่งเสริมให้นำไปผลิตไบโอดีเซล ซึ่งนอกจากจะเป็นประโยชน์ด้านพลังงานแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข โดยในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ทั่วโลกมีอัตราการเฉลี่ยในการบริโภคน้ำมันพืชเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4 ต่อปี เพราะวิถีการบริโภคที่หันมานิยมอาหารประเภทจานด่วนที่ปรุงด้วยการทอดมากขึ้น ทำให้มีน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวนมากที่ซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีจัดการ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข ซึ่งประเทศที่พัฒนาแล้วนิยมนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งมีการดำเนินการอย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรมในปัจจุบัน

2.1.4 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ (สุจินันท์, 2549)

ด้านสิ่งแวดล้อม

1) การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เนื่องจากองค์ประกอบของไบโอดีเซลไม่มีธาตุกำมะถัน แต่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จึงช่วยการเผาไหม้ได้ดีขึ้นและช่วยลดมลพิษซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และฝุ่นละออง เป็นต้น โดยจากการทดลองพบว่า เมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 145 แรงม้า สามารถลดควันดำได้มากกว่าร้อยละ 40

2) การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ช่วยลดการนำน้ำมันที่ใช้แล้วไปประกอบอาหารซ้ำและยังช่วยป้องกันไม่ให้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วซึ่งมีสารไดออกซินปะปนไปผลิตเป็นอาหารสัตว์

ด้านสมรรถนะเครื่องยนต์

1) การผสมไบโอดีเซลในระดับร้อยละ 1-2 สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซล จากผลการทดลองของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) พบว่าการเติมไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันมะพร้าวในอัตราร้อยละ 0.5 สามารถเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นได้ถึง 2 เท่า

2) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้นเนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น

3) ถึงแม้ว่าค่าความร้อนของไบโอดีเซลจะต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณร้อยละ 10 แต่ไบโอดีเซลทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น จึงทำให้กำลังเครื่องยนต์ไม่ลดลง

ด้านเศรษฐศาสตร์

1) การใช้ไบโอดีเซลช่วยสร้างงานในชนบท อาทิ เช่น การปลูกสบู่ดำเพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลระดับชุมชน จากนั้นจึงนำมาใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตรตามแนวทางเศรษฐกิจพอเพียงที่หมายความว่าพึ่งตนเอง

2) การใช้ไบโอดีเซลช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้บางส่วน ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อนำเข้าน้ำมันดิบกว่า 300,000 ล้านบาท

ด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศ

1) ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันเบนซินมาก โดยตลาดน้ำมันดีเซลมีมูลค่ามากกว่าน้ำมันเบนซินกว่า 2 เท่า และในอนาคตมีแนวโน้มที่โรงกลั่นอาจจะผลิตน้ำมันดีเซลไม่เพียงพอต่อการใช้ภายในประเทศ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลจึงช่วยลดความไม่สมดุลของการผลิตของโรงกลั่นได้

2) การผสมน้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 1-2 สามารถเพิ่มความหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลได้ โดยเฉพาะกรณีที่จะมีการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซล

ด้านความมั่นคง

1) การใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ ถือเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงและเสถียรภาพทางด้านพลังงานของประเทศ

2.1.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยนั้นมีวิธีการผลิตคล้ายกับการผลิตของประเทศอื่นๆ กล่าวคือ ผลิตผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสรูปที่ 2.2 ซึ่งกระบวนการผลิตเริ่มจากการเตรียมน้ำมันวัตถุดิบให้มีความเหมาะสมที่จะทำปฏิกิริยา เช่น การกำจัดยางเหนียวและสีจากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้กรดฟอสฟอริกและแป้งฟอกสี (** (Bleaching earth) หรือการกรองเศษอาหารออกากาน้ำมันพืชใช้แล้ว จากนั้นจึงนำน้ำมันพืชไปทำปฏิกิริยากับสารละลายแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ที่อุณหภูมิประมาณ 60 – 80 องศาเซลเซียส หลังเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์จะได้

2.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีไขมันและน้ำมันปนเปื้อน (เกรียงศักดิ์, 2539)

ไขมันและน้ำมันจะเป็นสารประกอบพวกแอลกอฮอล์หรือพวกกลีเซอรอล โดยเป็นสารอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพและย่อยสลายโดยแบคทีเรียได้ยาก ซึ่งวิธีกำจัดมีอยู่หลายวิธี เช่น

1. **การเติมคลอรีน** โดยจะเติมสารละลายคลอรีนลงในถังตกตะกอนแรกหรือในถังเติมอากาศ ซึ่งทั่วไปจะใส่คลอรีนประมาณ 2-5 มิลลิกรัม/ลิตร ก็อาจเพียงพอที่จะกำจัดไขมันออกจากน้ำเสียได้

2. **การเติมคลอรีนร่วมกับการเป่าอากาศ** เป็นวิธีการที่ดีกว่าการเติมคลอรีนอย่างเดียว เป็นระบบที่ใช้ก๊าซคลอรีนผสมกับอากาศเพื่อเป่าลงในถังเป่าอากาศ โดยทั่วไปใช้คลอรีนประมาณ 2-10 มิลลิกรัม/ลิตร

3. **การทำให้อลอย (Flotation)** นิยมใช้กันมากสำหรับการกำจัดไขมันและน้ำมัน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ กระบวนการนี้มีหลักการ คือ ทำให้พวกน้ำมันหรือไขมันซึ่งมีน้ำหนักเบาให้อลอยขึ้นโดยอาศัยแรงลอยตัวขึ้นของฟองอากาศพองพาวพวกน้ำมันหรือไขมันเหล่านี้ลอยสู่ผิวน้ำ จากนั้นใช้วิธีกวาดพวกน้ำมันหรือไขมันที่อยู่บริเวณผิวน้ำออกจากถัง

การทำให้อลอยยังสามารถใช้ในการแยกสิ่งสกปรกที่ตกตะกอนยาก หรือสิ่งสกปรกที่มีลักษณะครึ่งจมครึ่งลอย ซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลว โดยการใช้ฟองอากาศพองพาส่งสกปรกลอยขึ้นสู่ผิวน้ำเพื่อกวาดตัดออกไป กระบวนการตะกอนลอยที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย จะมีอยู่ 3 วิธี คือ

1. **Dissolved Air Flotation (DAF)** หลักการ คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียภายใต้ความดันสูงทำให้อากาศละลายน้ำจนเกินจุดอิ่มตัว จากนั้นจึงปล่อยความดันให้เข้าสู่สภาวะความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว อากาศส่วนเกินก็จะหนีออกจากน้ำเป็นฟองเล็กๆ พาตะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำ

2. **Air Flotation** หลักการ คือ การเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง ณ ความดันบรรยากาศ ในการเป่าอากาศจะทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 2-3 มิลลิเมตร นำพาตะกอนต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นจะถูกกวาดทิ้งออกไป โดยระบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งและไขมันต่ำกว่าระบบ DAF

3. **Vacuum Flotation** หลักการ คือ พยายามเป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง หรืออีกวิธีคือ ปล่อยให้ฟองอากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำเอง ระบบนี้จะใช้ถังปิดซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว ขณะนี้ภายในถังจะมีสภาพเป็นสุญญากาศ เมื่อถังนี้ได้ถูกเปิดออกโดยใช้ตัวควบคุมแล้ว ฟองอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาจากน้ำในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ แล้วพาตะกอนต่างๆ ในน้ำเสीलอยขึ้นมาบนผิวน้ำใน

ลักษณะฟ้ตะกอน (Scum) ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้ โดยการกวาดหรือการสูบออก อย่างไรก็ตามระบบนี้มีความซับซ้อนมากทำให้ไม่เป็นที่นิยมนัก

4. **การเพิ่มอุณหภูมิ** อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำมัน คือ ถ้าอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำเสียสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันจะลดลง ทำให้น้ำมันต่างๆ ในน้ำเสียลอยขึ้นมาได้ง่ายขึ้น จึงเป็นประโยชน์ต่อการกำจัดน้ำมันในน้ำเสียได้อย่างมาก

5. **การขจัดไขมัน** ไขมันจะเกิดการสะสมและเกาะตามกำแพงบ่อ ซึ่งแก้ไขโดยใช้น้ำฉีดแรงๆ และ/หรือการขจัดบริเวณที่มีไขมันเกาะติดอยู่ และถ้าจำเป็นควรถ่ายน้ำเสียทิ้งออกจากบ่อเปียกอย่างช้าๆ จากนั้นจึงทำการขจัดบริเวณที่มีไขมันเกาะติดอยู่บริเวณพื้นบ่อเปียกออก วัตถุประสงค์ของการขจัดนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ไขมันเหล่านี้ไปอุดตันในเครื่องสูบน้ำ

6. **การเป่าอากาศ** เป็นระบบที่ต้องใช้พลังงานมาก แต่จะทำให้การบำบัดน้ำเสียง่ายขึ้น เพราะไม่เพียงแต่จะสามารถกำจัดไขมันออกได้เท่านั้น ยังสามารถกำจัดพวกตะกอนหนักช่วยลดค่าบีโอดี ช่วยลดปริมาณของแข็งแขวนลอย ช่วยควบคุมกลิ่นในระบบบำบัด ช่วยลดปริมาณตะกอนที่เกาะสะสมอยู่บริเวณกำแพง และบริเวณก้นบ่อเปียก เป็นต้น ระบบเป่าอากาศนี้มีหลักการง่ายๆ คือ เป่าอากาศลงในน้ำพวกฟองอากาศจะนำพาพวกไขมันต่างๆ ลอยขึ้นมา จากนั้นจึงทำการตัดหรือกวาดพวกไขมันเหล่านี้ออกจากถังเป่าอากาศ

7. **ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)** เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในอิเล็กโทรไลต์แล้ว อิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดจะละลายเป็นไอออนสู่น้ำเสีย ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนเบา ขณะที่แคโทดจะเกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการลอยตัวของน้ำมัน ซึ่งเป็นการแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า โดยได้มีการมีพัฒนาให้ระบบมีสองขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่งเป็นการทำให้เกิดตะกอนเบาด้วยไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการรวมตัวของน้ำมัน ขั้นที่สองเป็นการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย การสลายตัวของอิเล็กโทรดไม่ได้ขึ้นกับปริมาณและขนาดของอิเล็กโทรด แต่ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้คือ ควบคุมง่าย ประสิทธิภาพสูงและระบบบำบัดมีขนาดเล็ก

2.3 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

2.3.1 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

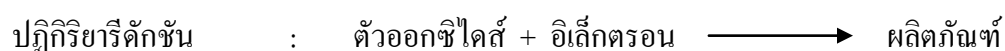
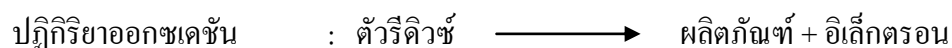
กระบวนการไฟฟ้าเคมีจะใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีซึ่งประกอบด้วย ครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองครึ่ง เซลล์ ครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน และอีกครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน โดยครึ่งเซลล์อันหนึ่งๆจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายของไอออนโลหะนั้น เมื่อ

นำครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองชนิดมาประกอบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้า โดยต่อสารละลายทั้งสองด้วยสะพานเกลือ (Salt bridge) นอกจากนี้เซลล์ไฟฟ้าเคมีอาจไม่ใช่สะพานเกลือได้ โดยให้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มในสารละลายเดียวกัน เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

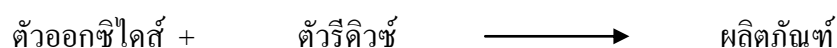
เซลล์กัลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า อันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ตัวอย่างของเซลล์ไฟฟ้ากัลวานิกในทางการค้า คือ แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

เซลล์อิเล็กโทรไลติก เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอ ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลติกในทางการค้า เป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์โลหะอะลูมิเนียม การแยกของโลหะเงินหรือทอง การชุบโลหะ เป็นต้น

ในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจะใช้ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์อิเล็กโทรไลติก ปฏิกิริยาในกระบวนการไฟฟ้าเคมีส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลสารและอิเล็กตรอน โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน จะมีสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเรียกสารนี้ว่าปฏิกิริยารีดิวซ์ (Reducing agent) หากแบ่งปฏิกิริยารีดอกซ์ออกเป็นสองส่วนจะได้ครึ่งปฏิกิริยา (Half reaction) สองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) และ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการจ่ายอิเล็กตรอน) ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้



ถ้ารวมครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองขั้วเข้าด้วยกัน โดยดุลจำนวนอิเล็กตรอนที่ให้และรับเท่ากันจะได้ปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังนี้



เนื่องจากอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจากแหล่งภายนอก ความยากง่ายในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนที่อยู่ในสารละลายนั้น ซึ่งดูได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้า และค่า E^0 ถ้าสารละลายอยู่ในสภาวะ

มาตรฐาน ในกรณีของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดการแข่งขันในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนต่างๆ ในสารละลายและโมเลกุลของน้ำด้วย ในการพิจารณาจะแยกอธิบายการแข่งขันในการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทดและแอโนดออกจากกันดังนี้

ปฏิกิริยาที่แคโทด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดได้ 2 กรณี

- ไอออนบวกถูกรีดิวซ์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น ไอออนโลหะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะ
- โมเลกุลของน้ำอาจถูกรีดิวซ์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์

ไอออน

ปฏิกิริยาที่แอโนด ในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาที่แคโทด ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดขึ้นในสารละลายจากโมเลกุลของน้ำหรือไอออนลบ

- ไอออนลบถูกออกซิไดส์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น คลอไรด์ไอออนเป็นแก๊สคลอรีน
- โมเลกุลของน้ำอาจถูกออกซิไดส์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของออกซิเจน และไฮโดรเจน

ไอออน

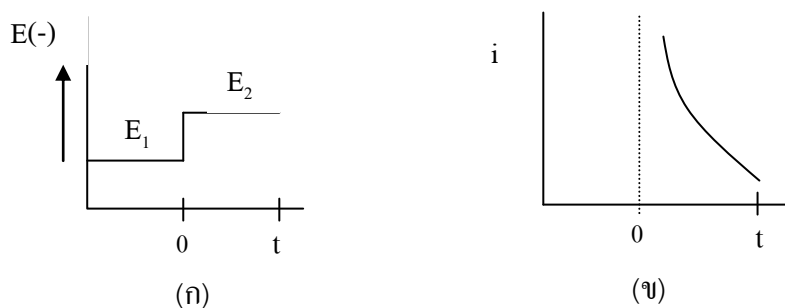
ในการทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์อิเล็กโทรไลต์นั้น อาจแยกพิจารณาเป็นปฏิกิริยาที่แอโนดและที่แคโทดหรือพิจารณาปฏิกิริยารวมของทั้งสองครึ่งปฏิกิริยานั้นว่า คู่ใดที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยที่สุดปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นก่อนซึ่งการพิจารณาทั้งสองแบบนี้ มีความจำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยาและหากทราบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวและจะทำให้การทำนายมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

- ชนิดของขั้วไฟฟ้า
- ลักษณะรูปร่างและสภาวะพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า
- ลักษณะการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ไปยังขั้วไฟฟ้า
- ความเข้มข้นของไอออนที่ผิว
- ชนิดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สารอื่นๆ ที่ปนอยู่ในสารละลาย เช่น ตัวทำละลาย
- ค่าการนำไฟฟ้า
- ความเร็วจำกัดของไอออนในสารละลาย (Mobility)
- ค่าศักย์ไฟฟ้า
- กระแสไฟฟ้า
- อุณหภูมิ
- ความดัน
- เวลา

2.3.2 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1.) การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode) เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

E_1 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดส์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้กระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังรูป 2.3(ข) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($I = kC$)

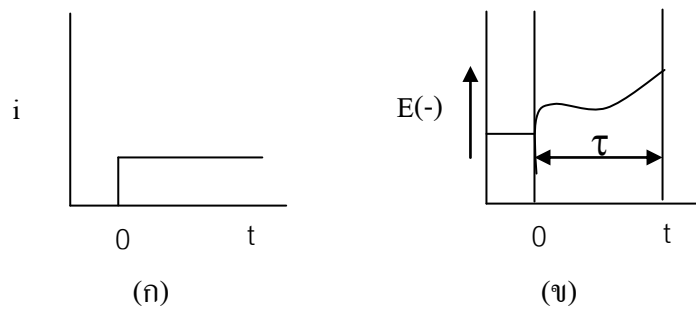


รูปที่ 2.3 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(Friedrich, 1962)

2.) การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode) รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดส์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดอกซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกันตามสมการของเนินสต์ ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (Friedrich , 1962)

ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์สามารถแสดงได้ตามสมการของเนินสต์ (Nernst's equation)

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[red]} \quad (2-8)$$

เมื่อ

- E = ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ณ สภาวะใดๆ (โวลต์)
- E^0 = ค่าความต่างศักย์มาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและสารละลาย (โวลต์)
- R = ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูล/โมล/เคลวิน)
- T = อุณหภูมิ (เคลวิน)
- n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา (ประจุ/โมล)
- F = ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 (แอมแปร์.วินาที/ประจุ)
- [Ox],[red] = ความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์และตัวรีดอกซ์ตามลำดับ(โมล/ลิตร)

เพื่อให้ได้อัตราในการกำจัดสูงสุด การรีดักชันของไอออนโลหะควรเป็นการควบคุมแบบถ่ายโอนมวลสาร (mass transport control) สมการแสดงอัตราในการนำกลับโลหะออกจากสารละลาย เขียนได้ดังนี้

$$\frac{-V_{dc}}{dt} = \frac{-I_L}{nF} = k_m A_c \quad (2-9)$$

เมื่อ

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

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2-10 เทียบกับเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\frac{C_{(t)}}{C_{(0)}} = \exp\left(\frac{-k_m A_c t}{V}\right) \quad (2-10)$$

เมื่อ

C (0)	=	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
C (t)	=	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเวลาเปลี่ยนไป (โมล/ลิตร)

จากสมการกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนโลหะ ขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญ คือ

- การถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายสู่ผิวหน้าของ ขั้วไฟฟ้า ขึ้นกับสมบัติของ อิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า การกวนจะช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร
- พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

2.3.3 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดียวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด ในทางปฏิบัติไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดียวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของ อิเล็กโทรด มาตรฐานขึ้น คือ

กำหนดให้ อิเล็กโทรด ไฮโดรเจนเมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของ อิเล็กโทรดอื่น เช่น $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจน ที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับศูนย์ และวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของ อิเล็กโทรด ที่ต้องการทราบ แต่ถ้า อิเล็กโทรด นั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0_{cell}) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของ อิเล็กโทรด เดี่ยว (E^0_{cell}) ที่มาจับคู่กับ อิเล็กโทรด ไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำให้ เช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ

ศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้ว อิเล็กโทรด ที่จะรับอิเล็กตรอนว่า มีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่า เป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์ (หรือตัวรีดิวซ์) เช่น MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า 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 จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$E^0_{\text{cell}} = E^0(\text{ขั้วบวก}) - E^0(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-11)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใดๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (2-12) คือ

$$E_{\text{cell}} = E(\text{ขั้วบวก}) - E(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-12)$$

2.3.4 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ ของประจุที่ผ่านเข้าวงจร จะชะอะ อะลูมิเนียมออกมาจากขั้วไฟฟ้า 9 กรัม ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีอะลูมิเนียมหรือเหล็กหลุดออกมาจากอิเล็กโทรดเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น จากกฎของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้ จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้า และความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-13)

$$V = I \times R \quad (2-13)$$

โดยที่

V	=	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
I	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
R	=	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

และมีความสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-14)

$$\text{งานไฟฟ้าสุทธิ (W}_{\text{elect}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} = nE \times 96,487 \quad (2-14)$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามสมการที่ (2-15)

$$R = l / (C \times A) \quad (2-15)$$

เมื่อ

R	=	เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์ม
l	=	เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในหน่วยเซนติเมตร
C	=	เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์มหรือซีเมน
A	=	เป็นพื้นที่หน้าตัดของ อิเล็กโทรด ที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยตารางเซนติเมตร

2.3.5 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งของการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งวัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Ampere) จำนวนกระแสที่ผ่านไปหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current intensity, I) การวัดของกระแสซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุ เรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ในโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎโอห์ม ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E) มีหน่วยเป็น โวลต์/เซนติเมตร ได้ คือ

$$I = \sigma \cdot E_f \quad (2-16)$$

$$E_f = I/\sigma = V/R\sigma \quad (2-17)$$

โดย

σ	=	เป็นค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โหมห์/เซนติเมตร
V	=	เป็นความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น โวลต์
R	=	เป็นความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น โอห์ม
I	=	เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น แอมแปร์

2.3.6 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติก เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชัน หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$\begin{aligned} 1 \text{ F (Faraday)} &= eN = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C})(6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 96,487 \text{ C mol}^{-1} \quad (\text{C} = \text{coulomb}) \end{aligned}$$

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

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือ ไฟฟ้าฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 1 โมล เท่ากัน เช่น

$$\begin{aligned} \text{-ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน } \text{Al}^{+3} \text{ จะได้ } \text{Al}_{(s)} \text{ 1 โมล} &= \text{น.น.กรัมโมล/ประจุ} \\ &= 26.98/3 = 9 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{-ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน } \text{Fe}^{+3} \text{ จะได้ } \text{Fe}_{(s)} \text{ 1 โมล} &= \text{น.น.กรัมโมล/ประจุ} \\ &= 55.85/2 = 27.9 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

$$W = I.t.M/Z.F \quad (2-18)$$

โดยที่

W	=	เป็นปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)
I	=	เป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง
M	=	เป็นน้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด
t	=	เป็นเวลาที่ใช้ (นาที)
Z	=	เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
F	=	เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตาม ทฤษฎีหมายความว่า กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ ไอออนโลหะทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกใช้ในการ เกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยา รีดักชันของน้ำเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นแก๊ส ออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากความต้านทานต่างๆเนื่องจากมีตัวออกซิไดส์หลายชนิด ละลายอยู่รวมกันในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2-19)$$

2.4 การประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

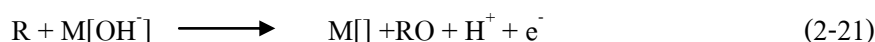
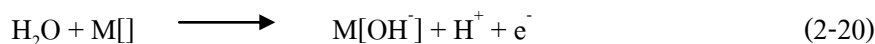
กระบวนการไฟฟ้าเคมีได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็น กระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี หลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมีคือการถ่ายโอน อิเล็กตรอนระหว่างสารละลายกับผิวของขั้วไฟฟ้าแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ภายนอก

2.4.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation: EO)

(Israilides และคณะ, 1997)

กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์ และ สารมลพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุพันธ์ของ OH°

(Hydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น ตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) เรียกกระบวนการนี้ว่า Direct anodic process โดยสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์โดยอนุพันธ์ของ OH° (Hydroxyl radicals) ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยา (2-20) และ (2-21) และศักยภาพของตัวออกซิไดส์แสดงตามตาราง 2.4

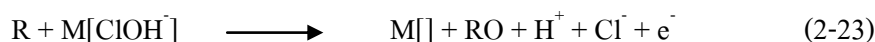


เมื่อ $\text{M}[\]$ คือ พื้นที่ผิวของขั้วแอโนดที่เกิดปฏิกิริยา
 $\text{M}[\text{OH}^\cdot]$ คือ OH° ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด
 R คือ สารอินทรีย์
 RO คือ ผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์

ถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ผสมอยู่คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับโลหะของขั้วไฟฟ้าเกิด ClOH° (Chlorohydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Indirect oxidation ดังปฏิกิริยา (2-22)



เมื่อ $\text{M}[\text{ClOH}^\cdot]$ คือ ClOH° ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด ซึ่งสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ ตามปฏิกิริยา (2-23)

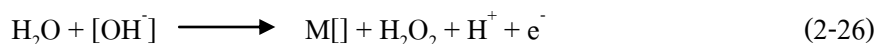
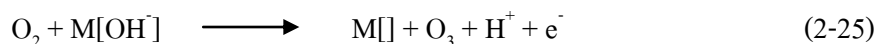


และ ClOH° สามารถทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดแก๊สคลอรีน (Cl_2) ตามปฏิกิริยา (2-24) ซึ่งช่วยลดปริมาณของเชื้อโรคในน้ำเสียได้



นอกจากนี้อนุพันธ์ของ OH° จะสลายตัวเป็นโอโซน (O_3) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ได้เช่นกัน ตามปฏิกิริยา (2-25) และ (2-26)

ประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์จะขึ้นกับชนิดของขั้วแอโนดและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบศักยภาพของตัวออกซิไดส์ตามสารตั้งต้น จะเห็นค่าอนุพันธ์ของ OH° จะมีศักยภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวออกซิไดส์อื่นๆ และสามารถเตรียมได้โดยใช้น้ำเป็นสารตั้งต้น

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพของตัวออกซิไดส์ตามสารตั้งต้น (Chen, 2004)

Oxidants	Formation potential
$\text{H}_2\text{O}/\bullet\text{OH}$ (hydroxyl radical)	2.80
O_2/O_3 (ozone)	2.07
$\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (peroxodisulfate)	2.01
$\text{MnO}_2/\text{MnO}_4^{2-}$ (permanganate ion)	1.77
$\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$ (hydrogen peroxide)	1.77
$\text{Cl}^-/\text{ClO}_2^-$ (chlorine dioxide)	1.57
$\text{Ag}^+/\text{Ag}^{2+}$ (silver(II) ion)	1.5
Cl^-/Cl_2 (chlorine)	1.36
$\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (dichromate)	1.23
$\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ (oxygen)	1.23

2.4.2 ระบบรวมตัวตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation: EC)

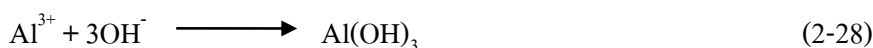
การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าหรือ EC ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอยู่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพสูงในการลดสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการ EC สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไขมัน น้ำมัน สีขุ่น สารแขวนลอย สารอินทรีย์และโลหะหนัก เป็นต้น โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับการตกตะกอนด้วยสารเคมี คือ การทำงานให้อนุภาคของคอลลอยด์หรือสารมลพิษในน้ำเสียที่มีอนุภาคเล็กๆมารวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นจนหนักพอที่จะตกตะกอนตกลงมาโดยอาศัยสารสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนสำหรับการตกตะกอนด้วยสารเคมีนิยมใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม

($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) หรือเฟอริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) แต่สำหรับกระบวนการ EC จะใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดที่กัดกร่อนได้ (Sacrificial electrode) เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียมในการสร้างสารตกตะกอน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า โลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนละลายอยู่ในน้ำเสียดังปฏิกิริยา (2-27) และ (2-28) โลหะไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear metal hydroxyl complexes ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารสร้างตะกอน

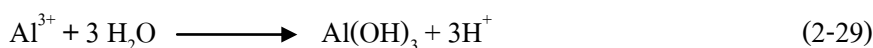
กรณีของอะลูมิเนียมเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดอะลูมิเนียมจะแตกตัวให้ Al^{3+} ไอออนในสารละลาย (2-27) และ Al^{3+} ไอออนรวมตัวกับ OH^- หรือ H_2O ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของระบบ และตกตะกอนออกมาในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ดังปฏิกิริยา (2-28) และ (2-29) (Kobyta และคณะ, 2003)



ภาวะสารละลายเป็นเบส



ภาวะสารละลายเป็นกรด

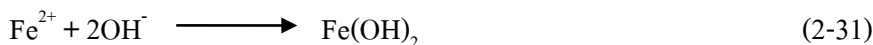


นอกจากนี้ Al^{3+} ไอออนในสารละลายรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes ซึ่งอาจเป็น Monomeric และ Polymeric แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ Al^{3+} ไอออนจะตกตะกอนในรูปของ Monomeric ได้แก่ $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ เป็นต้น ส่วนตัวอย่างของ Polymeric ได้แก่ $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ และ $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ (Mollah และคณะ, 2004)

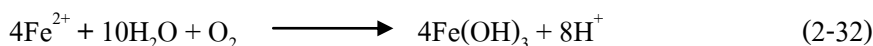
สำหรับกรณีของเหล็กเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดจะแตกตัวให้ Fe^{2+} ในสารละลาย (2-30) และตกตะกอนออกมาในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_n$ เมื่อ $n = 2$ หรือ 3 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดแสดงสมการที่ (2-31) และ (2-32) (Laure และคณะ, 2003)



ภาวะสารละลายเป็นเบส



ภาวะสารละลายเป็นกรด



Fe^{3+} ในสารละลายสามารถรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl iron (III) complexes ซึ่งอาจเป็น Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบส แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ Fe^{3+} จะตกตะกอนในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ สำหรับตัวอย่างของ Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ได้แก่ $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$ เป็นต้น (Murugunathan และคณะ, 2004)

2.4.3 การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

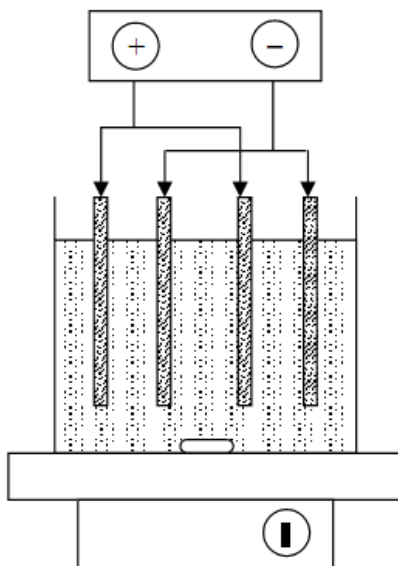
การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มี 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง (Mollah และคณะ, 2004)

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ซึ่งการวางแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามากทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆขึ้น ในกรณีที่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้ามากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ

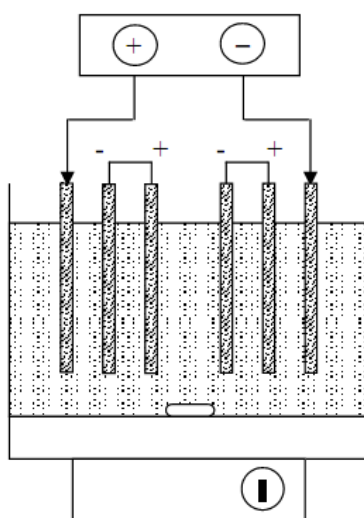
1.) โมนโพลาร์ (Monopolar electrode) มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งวางสลับกันขั้วละแผ่น โดยที่ผิวหน้าทั้งของด้านของขั้วไฟฟ้าแผ่นเดียวกันจะมีขั้วเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบ คือ

- แบบขนาน (Parallel connections) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งให้แต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของเซลล์นั้นๆ โดยที่ค่าความต่างศักย์ของระบบจะเท่ากันดังรูปที่ 2.5

- แบบอนุกรม (Series connections) มีการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าคล้าย เซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 2.6



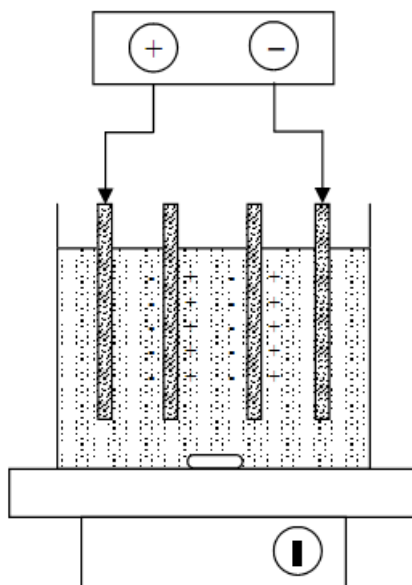
รูปที่ 2.5 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)

2.) **ไบโพลาร์ (bipolar electrode)** มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้นเฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุดดังรูปที่ 2. 7 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง

เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะที่การใช้งาน



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์ (Chen, 2004)

2.4.4 ชนิดขั้วไฟฟ้า (Electrodes)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า โดยวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น

1.) **อะลูมิเนียม (Aluminum)** มีลักษณะสีขาวเหมือนเงิน เนื้อเป็นมันเงาไม่หมอง มีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ไม่สึกกร่อนได้ง่าย ทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น และแข็งแรงมากไม่ค่อยมีรอยแตกร้าวสามารถทำให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ โดยอะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโควาเลนต์ การใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยา อิเล็กโทรลิซิสขึ้นทำให้อะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายในสารละลาย ซึ่งไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมจะไม่ละลายน้ำ ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก

2.) **เหล็กกล้า (Steels)** เป็นโลหะหนัก มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้าง แต่ไม่เสถียรและ

เป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่เรียกว่า สนิมเหล็ก เหล็กทำปฏิกิริยารวมกับอโลหะทั้งหลายได้เกือบทั้งหมด เมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ Fe^{2+} ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอกไซด์ $(Fe(H_2O)_6)^{2+}$ สารละลาย Fe^{2+} นี้ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศกลายเป็น Fe^{3+} ได้ Fe^{3+} อยู่ในสารละลายของน้ำเป็น hydratedion เนื่องจาก Fe^{3+} มีขนาดเล็กและมีประจุมากจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้ง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้

การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสขึ้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูป Fe^{2+} ที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่า pH ของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น $Fe(OH)_2$ ได้ ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้วแคโทดและค่า pH ของน้ำเสีย ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่ง โดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อง่ายและราคาถูกยิ่งไปกว่านั้นมันมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดี จึงเป็นที่นิยม

3.) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่นำมาผสมกับธาตุ โดยธาตุผสมที่สำคัญ คือ โครเมียมซึ่งจะมีตั้งแต่ร้อยละ 11 ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ฟิล์มอันนี้มีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิม ให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาแวววาว

4.) ไทเทเนียม (Titanium) มีลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง และเหนียว สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน +2, +3 และจะเสถียรที่ +4 ไทเทเนียมขาวถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์เซลล์และไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส ยิ่งไปกว่านั้นที่ขั้วลบพบว่าจะมีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายใสไม่มีตะกอน อีกทั้งยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเพราะจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับ แต่ข้อเสียคือ ไทเทเนียมมีราคาสูงและหาซื้อได้ยาก

5.) แพลตินัม (Platinum) เป็นธาตุที่มีสีขาวและอ่อน มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 มีความแข็งแรงของพันธะโลหะและไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลตินัมมักไม่ค่อยเสถียร โดยเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ แพลตินัมหายากและมีราคาแพง สามารถนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก มีความเฉื่อยต่อ

ปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กโทรด เบาทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

6.) **แกรไฟต์ (Graphite)** เป็นอัญรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอนซึ่งเกิดตามธรรมชาติ มีชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่นบาง ๆ ทึบแสงและเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้มากในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย อะตอมของแกรไฟต์ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ มีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม ซึ่งสั้นพอที่จะทำให้เชื่อว่าอะตอมคาร์บอน น่าจะยึดกับอะตอมข้างเคียงด้วยพหุพันธู์ แกรไฟต์มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ใส่งานไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ก ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

2.5 การควบคุม สมรรถภาพ การทำงานของระบบ รวมตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation: EC)

2.5.1 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมฆ, 2545)

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

- 1) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
- 2) การเคลื่อนที่ของประจุไอออน ความสามารถของไอออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุบนไอออนและขนาดไอออน
- 3) อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
- 4) พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
- 5) ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าจำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างน้อยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น

- 6) จำนวนประจุของไอออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น
- 7) ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าได้ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น

2.5.2 หลักการในการออกแบบระบบรวมตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (วรชวรณ, 2546)

เครื่องตกตะกอนด้วยไฟฟ้า มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะประยุกต์ใช้งาน โดยมีหลักการที่สำคัญในการออกแบบ คือ

- 1) ควรออกแบบให้ง่ายที่สุด ค่าใช้จ่ายต่ำสุด ถ้าเป็นไปได้ควรมีการหลีกเลี่ยงการออกแบบของงานที่มีการกววน หรือการไหลของสารละลาย
- 2) ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่สมบูรณ์ ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนอื่นในกรณีที่มีกระบวนการอื่น นอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ควรทำการแยกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 3) เมื่อจำเป็นต้องมีการกววนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกววนผสมอาจต้องใช้แผ่นกั้นหรือใบพัดที่ไม่นำไฟฟ้า
- 4) ออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ให้สม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด
- 5) ควรออกแบบให้มีระยะระหว่างอิเล็กโทรดน้อย เพราะระยะห่างยิ่งมากจะทำให้ต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น
- 6) การเลือกวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกริยานั้น ต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยสามารถทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน
- 7) การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้น ต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัดและปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้

2.5.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบรวมตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Yousef และ Schennach, 2000)

ข้อดีของระบบรวมตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

- 1) การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นระบบที่ใช้งานง่าย
- 2) สามารถบำบัด สี กลิ่น รส สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ได้

3) ตะกอนที่ได้ มีลักษณะคล้ายตะกอนจากระบบเคมีแต่มีขนาดใหญ่กว่า และกรองง่ายกว่าตะกอนจากระบบเคมี ตกตะกอนและรีดน้ำออกง่ายเพราะส่วนใหญ่เป็นออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะและอัตราการเกิดตะกอนต่ำ

4) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบวนการตกตะกอน ด้วยไฟฟ้าเคมีจะให้ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) น้อยกว่าจากระบบเคมี

5) สามารถกำจัดอนุภาค (คอลลอยด์) ขนาดเล็กได้เพราะการใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่เร็วขึ้น จึงง่ายต่อการตกตะกอน

6) ไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ ลงไป จึงไม่มีปัญหามลพิษที่ตามมาจากการใส่สารเคมี

7) ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบสามารถค้นตัวและยกมลสารให้ลอยขึ้นเหนือน้ำทำให้ง่ายต่อการกำจัดออก

8) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการการบำรุงรักษาน้อย

ข้อเสียของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

1) ขั้วอิเล็กโทรดสามารถสึกกร่อนได้ อันเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและละลายลงไปในน้ำได้ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรดมาทดแทน

2) ไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีค่าไฟฟ้าราคาสูง

3) สารบางชนิดอาจมาเกาะที่อิเล็กโทรดได้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง

4) ต้องการค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสีย ระบบจึงสามารถทำงานได้ดี

2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลและน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน

Saatci และคณะ (2001) ศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำมันของโรงงานน้ำมันพืชโดยใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยใช้ปูนขาว สารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ ในการตกตะกอนรวมทั้งการใช้กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ พบว่าเมื่อใช้ปูนขาวทำการตกตะกอนน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันพืชจะสามารถลดซีโอดี ไนมันและน้ำมันได้ร้อยละ 63.19-80.66 และ 76.95-83.38 ตามลำดับ สารส้มสามารถลดซีโอดี ไนมันและน้ำมันได้ร้อยละ 88.14-92.99 และ 69.89-92.11 ตามลำดับ เฟอร์ริกคลอไรด์สามารถลดซีโอดี ไนมันและน้ำมันได้ร้อยละ 94.66-96.25 และ 93.81-96.16 ตามลำดับ และการใช้กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายสามารถลดซีโอดี และไนมันและน้ำมันได้ร้อยละ 17.65-69.12 และ 93.8-96.16 ตามลำดับ

Al-Shamrania และคณะ (2002) ศึกษาการกำจัดน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริกซัลเฟตเป็นตัวทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน พีเอช ระยะเวลาและความเร็วของการกวนเร็วและกวนช้า จากการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำมันมีค่าซีตาโพเทนเชียลเป็นลบและไม่ขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำ และสารสร้างตะกอนทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการลดลงของค่าซีตาโพเทนเชียลของหยดน้ำมัน โดยอะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริกซัลเฟตมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงถึงร้อยละ 99.3 ที่พีเอช 8 และร้อยละ 99.94 ที่พีเอช 7 ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการกวนเร็วที่เหมาะสมสำหรับการแยกน้ำมันด้วยระบบลอยตัวด้วยอากาศละลาย คือ 120 วินาที และเวลาในระบบรวมตะกอนอยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 นาที

Suehara และคณะ (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลโดยใช้สารต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยน้ำเสียดิบมีค่าพีเอชและมีปริมาณน้ำมันสูง แต่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ ซึ่งการบำบัดทางชีวภาพของน้ำเสียไบโอดีเซลสามารถทำได้ยากเพราะน้ำเสียอยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้ยีสต์ *Rhodotorula mucilaginosa* เพื่อมาทำการย่อยสลายน้ำมัน โดยควบคุมพีเอชเริ่มต้นที่ 6.8 และเติมสารอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน yeast extract KH_2PO_4 และ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ โดยความเข้มข้นของ yeast extract ที่เหมาะสมคือ 1 กรัมต่อลิตร และมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 17-68 เมื่อใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบว่าหากมีปริมาณของแข็งในชั้นน้ำที่ได้จากการสกัดแยกน้ำมันออกด้วยเฮกเซนเกิน 2.14 กรัมต่อลิตร จะทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ ซึ่งเมื่อนำน้ำเสียดิบมาทำการเจือจางด้วยน้ำในปริมาณเท่ากันก่อนการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมข้างต้นพบว่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันสูงขึ้น

ปัทมภัทร (2549) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ การบำบัดทางเคมีโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสีย ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ และสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ การปรับ พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 4 ร่วมกับการใช้โพลีเมอร์ประจุบวก 20 มิลลิกรัม/ลิตร หรือร่วมกับการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 62.5 มิลลิกรัม/ลิตร และโพลีเมอร์ประจุบวก 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถกำจัดไขมันและน้ำมัน กำจัดซีโอดี บีโอดี กลีเซอรอล และเมทานอล เท่ากับร้อยละ 98 38-41 29-41 16-23 และ 25-33 ตามลำดับ

การบำบัดทางชีวภาพของน้ำเสียจากระบบทางเคมี โดยแบ่งการทดลองออกเป็นแบบใช้ออกซิเจน และแบบไร้ออกซิเจน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้

ออกซิเจน คือ ที่ซีโอดีเริ่มต้น 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร เวลาในการบำบัดซีโอดีได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง 4 วัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซีโอดีกรอง และเมทานอลร้อยละ 93 96 และ 99 ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนมีค่าซีโอดีเริ่มต้นน้อยกว่า 5,200 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้เวลาในการบำบัดซีโอดีได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งเท่ากับ 13 วัน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซีโอดีกรอง และเมทานอลสูงถึงร้อยละ 98 99 และ 98 ตามลำดับ

2.6.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนไขมันและน้ำมันโดยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

Canizares และคณะ(2007) ได้เปรียบเทียบการกำจัดน้ำมันด้วยกระบวนการตกตะกอนเคมีกับระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันของทั้ง 2 กระบวนการขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และผลรวมของค่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียม และจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้นถ้ามีคลอไรด์ไอออนอยู่ในน้ำ

Fouad และคณะ(2008) ศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียน้ำมันด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการวางขั้วอิเล็กโทรด (Electrodes) แบบแนวนอน และแบบแนวตั้ง ทำการทดลองแบบทีละเท ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์ ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าการวางขั้วแบบแนวนอนมีประสิทธิภาพสูงกว่าการวางขั้วแบบแนวตั้ง ซึ่งการบำบัด ที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแส อุณหภูมิ ความเข้มข้นของ NaCl และพีเอช

Tezcan และคณะ(2007) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันพืชด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับการเติม poly aluminum chloride(PAC) และ Na_2SO_4 ทำการทดลองแบบทีละเท ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่พีเอช เท่ากับ 7 ความหนาแน่นกระแส 35 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร เวลา 90 นาที และ PAC 0.5 กรัม/ลิตร สามารถกำจัดซีโอดีร้อยละ 98.9

Tir และMostefa (2008) ศึกษาการแยกน้ำมันด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch) ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ แบบขนาน ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า โดยใช้วิธีพื้นที่การตอบสนอง (Response surface method,RSM) ในการสรุปผลพบว่า ที่ความหนาแน่นกระแส 25 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร พีเอชน้ำเสียที่เข้า

การทดลอง เท่ากับ 7 และที่เวลา 22 นาที มีประสิทธิภาพ ในการกำจัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 99 และลดค่าความขุ่นมากกว่าร้อยละ 89

อัญชลี (2551) ศึกษาการกำจัดน้ำมันและซีโอดีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิต น้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ด้วยระบบรวม ตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองแบบที่ละเท ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล คือ การใช้ขั้วไฟฟ้าแบบ AI-C ระยะห่าง ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร น้ำเสียมีค่า พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน 25 นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ของแข็ง แววนลอย และไขมันและน้ำมันเท่ากับร้อยละ 55.43, 96.88 และ 97.76 ตามลำดับ น้ำหนักขั้วที่ สลายไปเท่ากับ 0.1475 กรัม สามารถผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 390 มิลลิลิตร ใช้ค่า พลังงานเท่ากับ 6.92 kW/m^3 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดทั้งหมด 13.8 บาท และ พีเอช น้ำที่ผ่านการบำบัด แล้วเท่ากับ 7.24 นอกจากนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอล และกลีเซอรอลได้ร้อยละ 16.85 และ 3.49 ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนเท่ากับ 75 มิลลิลิตร

2.6.3 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

Kannan และคณะ(2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุราระบบรวม ตะกอนด้วยไฟฟ้าทำการทดลองแบบที่ละเท ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์ ใช้ อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและเหล็กเป็นขั้วแคโทด พบว่าที่ความหนาแน่นกระแส 182 แอมแปร์/ ตารางเมตร เวลาที่ทำปฏิกิริยา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 75.52 ความขุ่น ร้อยละ 99.37 ซัลเฟต 90.27 ของแข็งละลายน้ำร้อยละ 55.8

ศรายุทธ (2549) ศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการ ไฟฟ้าเคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย ศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างขั้ว พื้นที่ผิว อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อ ขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ แบบขนาน ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด โครเมียมสูงสุดมากกว่าร้อยละ 99 ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ระยะระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตรา การไหลน้ำเสียเข้าถัง 21.11 มิลลิลิตร/นาที คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

Raghu และ Basha (2007) ศึกษาการกำจัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียโรงงานสิ่งทอด้วย ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าทำการทดลองแบบที่ละเท ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้า

โมนิโพลาร์ ใช้อะลูมิเนียมและเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าที่สภาวะเดียวกันที่ดีที่สุดขั้วเหล็กมี ประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 97.06 และซีไอร้อยละ 100 ใช้ค่าพลังงานเท่ากับ 78.5 kWh/kg of COD สูงกว่าใช้ขั้วอะลูมิเนียมที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 94.27 และซีไอร้อยละ 80 ใช้ค่าพลังงานเท่ากับ 130.095 kWh/kg of COD

Emamjomeh และ Sivakumar (2008) ศึกษาการ กำจัดฟลูออไรด์ ด้วยระบบรวม ตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมนิโพลาร์ หลายเซลล์ ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าจะมีประสิทธิภาพ การกำจัด ฟลูออไรด์ร้อยละ 99 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแส 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พีเอช เท่ากับ 6 อัตราการไหล 150 มิลลิลิตร/นาที่ ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ขาเข้าเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

Abdelwahab และคณะ(2009) ศึกษาการกำจัดฟีนอลจากน้ำเสียของโรงกลั่นน้ำมัน ด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบแนวนอน น ทำการทดลองแบบ ทีละเท ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมนิโพลาร์ ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าค่า พีเอชเริ่มต้นของน้ำเข้าระบบ เท่ากับ 8 เติม NaCl 2 กรัม/ลิตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 19.3 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ใช้เวลาทำ ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพ ในการกำจัด ฟีนอลได้มากกว่าร้อยละ 97

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลขั้นต้นด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบโมนโพลาร์หลายเซลล์ โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

3.1.1 ศึกษา ลักษณะ สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียไบโอดีเซล จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ กระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ที่พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ค่าพีเอช ไชมันและน้ำมัน ซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย เมทานอล กลีเซอรอล น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ลดลง และองค์ประกอบของตะกอนที่เกิดจากการบำบัด

3.1.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ไชมันและน้ำมันจากน้ำเสียไบโอดีเซล โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

- การทดลองที่ 1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์
- การทดลองที่ 2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์

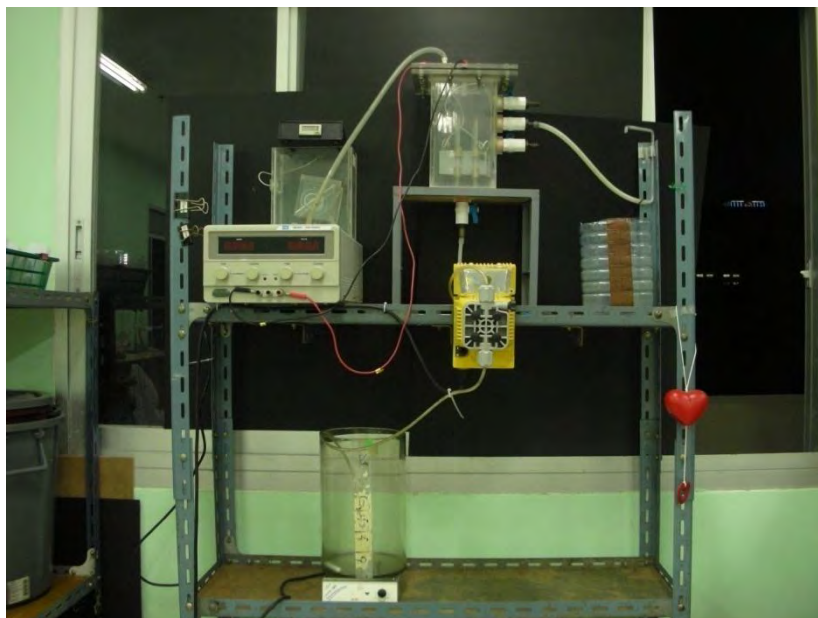
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการทดลองบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

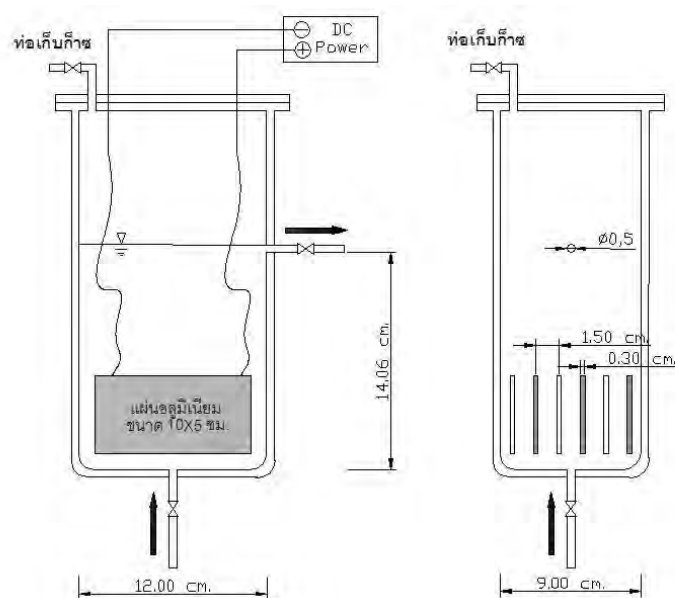
- 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) เป็นเครื่องเรียงกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งให้ค่าความต่างศักย์สูงสุด 60 โวลต์
- 2) บั๊มน้ำที่ปรับอัตราการไหลของน้ำได้ ตั้งแต่ 0 ถึง 10 ลิตร/ชั่วโมง
- 3) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากอะลูมิเนียม และแกรไฟต์
- 4) ถังปฏิกิริยาขนาด 2 ลิตร
- 5) สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

3.2.1 ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นระบบทดลองระดับห้องปฏิบัติการขนาด 2 ลิตร ทำจากอะครีลิก ดังรูปที่ 3.1



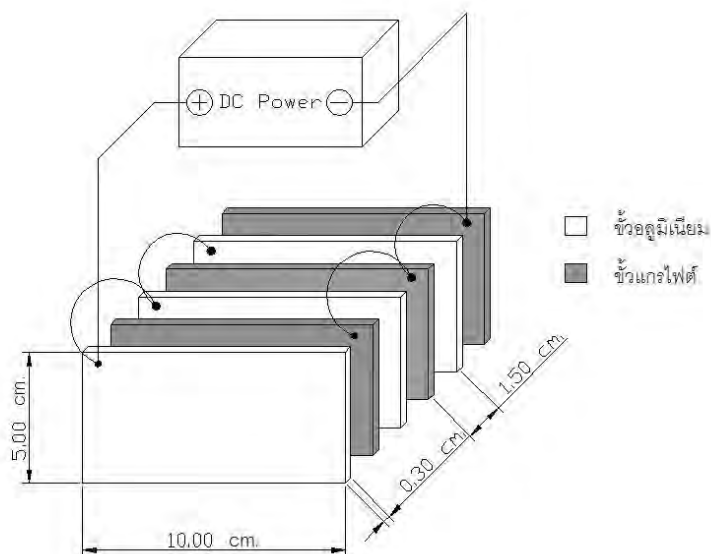
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์และถังปฏิบัติการ



รูปที่ 3.2 ขนาดและองค์ประกอบของถังปฏิบัติการ

3.2.2 ขั้วไฟฟ้า

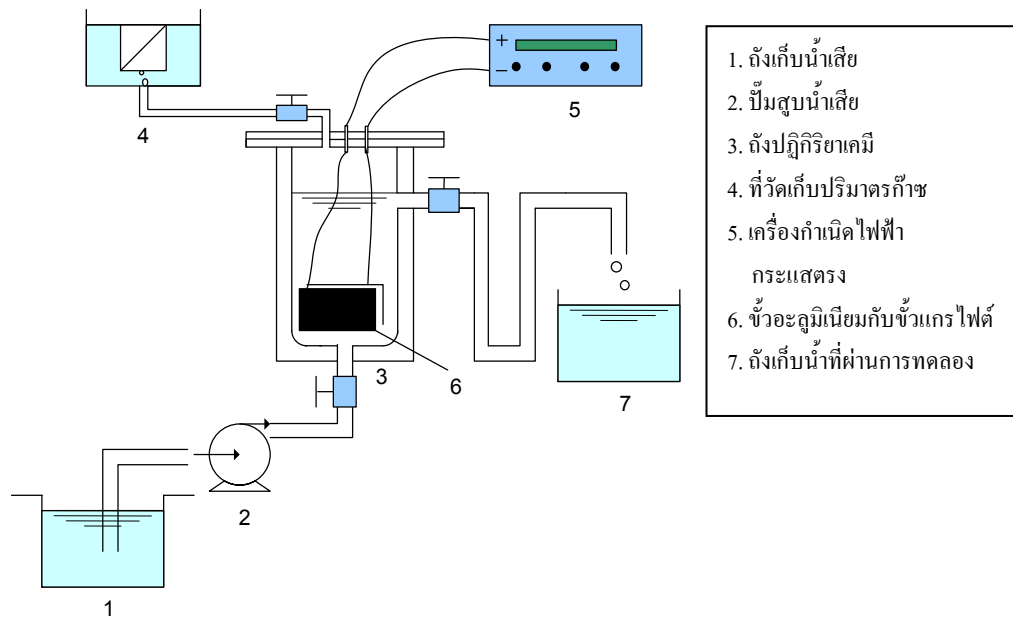
ขั้วแอโนดใช้แผ่นอะลูมิเนียม เท่ากับ $5 \times 10 \times 0.3$ เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ขั้วแคโทดใช้แผ่นแกรไฟต์ เท่ากับ $5 \times 10 \times 0.3$ เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น มีการต่อขั้วแบบ โมโน โพลาร์หลายเซลล์เรียงขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง โดยมีพื้นที่ทำปฏิกิริยาทั้งหมด เท่ากับ 250 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การจัดเรียงขั้วแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์ต่อขนานที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3 การป้อนน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยา

การป้อนน้ำเสียเข้าระบบโดยใช้ปั๊มที่สามารถควบคุมอัตราการไหลน้ำเสียได้ โดยระดับน้ำสูง เท่ากับปลายด้านบนของท่อปล่อยน้ำออก จะทำให้ มีปริมาณน้ำในถัง เท่ากับ 1500 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำที่ไหลออกจากถังจะถูกควบคุมอัตราการไหลให้เท่ากับน้ำที่ไหลเข้าระบบ โดยน้ำที่ออกจะไหลลงถึงเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการป้อนน้ำเสียเข้าระบบ

3.3 การดำเนินการทดลอง

เป็นการทดลองแบบต่อเนื่อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดที่สภาวะต่างๆ โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังนี้

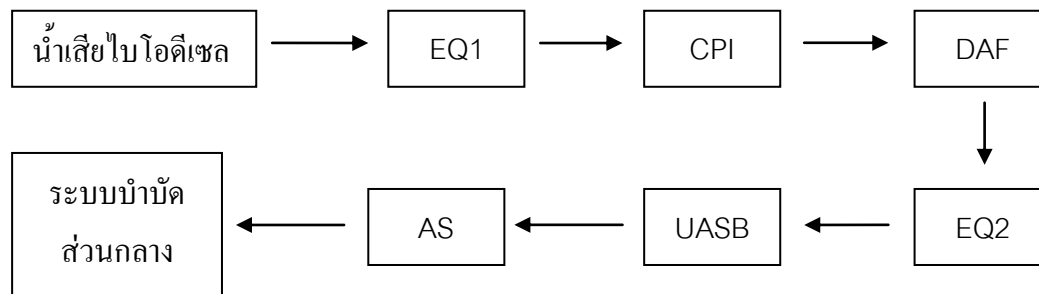
3.3.1 น้ำเสีย

น้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลองได้เก็บตัวอย่างจากโรงงานผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแห่งหนึ่ง มีปริมาณน้ำเสียเข้าระบบประมาณ 200 ลบ.ม./วัน โดยเป็นน้ำเสียที่มาจากกระบวนการผลิตไอน้ำควบแน่นและสำนักงาน

1) ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

ในโรงงานนี้จะใช้ระบบบำบัดไขมันและระบบบำบัดทางชีวภาพ ดังรูปที่ 3.5 น้ำเสียจะถูกรวบรวมไว้ที่บ่อปรับสมดุล 1 (EQ1) แล้วส่งเข้าสู่หน่วยกำจัดไขมันโดยใช้ Corrugated Plate Interception (CPI) เพื่อทำการแยกน้ำมันออกขั้นต้น จากนั้นต้องส่งไปบำบัดต่อที่ Dissolved Air Flotation (DAF) ทำการบำบัดน้ำมันขั้นที่ 2 เพื่อทำการแยกน้ำมันที่เหลือออกน้ำเสียหลังจากที่

ทำการแยกไขมันออกแล้ว จะถูกรวบรวมไว้ที่บ่อปรับสมดุล 2 (EQ 2) แล้วเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพที่ใช้คือ ระบบ UASB แล้วส่งต่อไประบบบำบัดส่วนกลางต่อไป



รูปที่ 3.5 แผนผังการบำบัดน้ำเสีย

2) จุดเก็บน้ำเสียในการทดลอง

ในการทดลองนี้จะใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตน้ำมันไบโอดีเซล คือ น้ำเสียที่มีไขมันเหลือจากกระบวนการแยกไขมันขั้นต้น จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนที่จะเข้าระบบ Dissolved Air Flotation (DAF)

3) ลักษณะน้ำเสียจริงก่อนการทดลอง

น้ำเสียหลังจากเก็บตัวอย่างมาทำการ วิเคราะห์ ลักษณะน้ำเสีย เบื้องต้นก่อนการทดลองและพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คือ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ไขมันและน้ำมัน ซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย เมทานอล และกลีเซอรอล ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะน้ำเสียของกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

พารามิเตอร์	น้ำเสียดิบ	
	29/04/52	28/06/52
ซีไอดี (mg/L)	32,724	28,764
ไขมันและน้ำมัน (mg/L)	610	100
กลีเซอรอล (mg/L)	936	-
เมทานอล (mg/L)	14,432	-
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	430	405
พีเอช	5.5	5.7

3.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้
ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์

เป็นการทดลองแบบ ไหลต่อเนื่อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย
ไบโอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด คือ

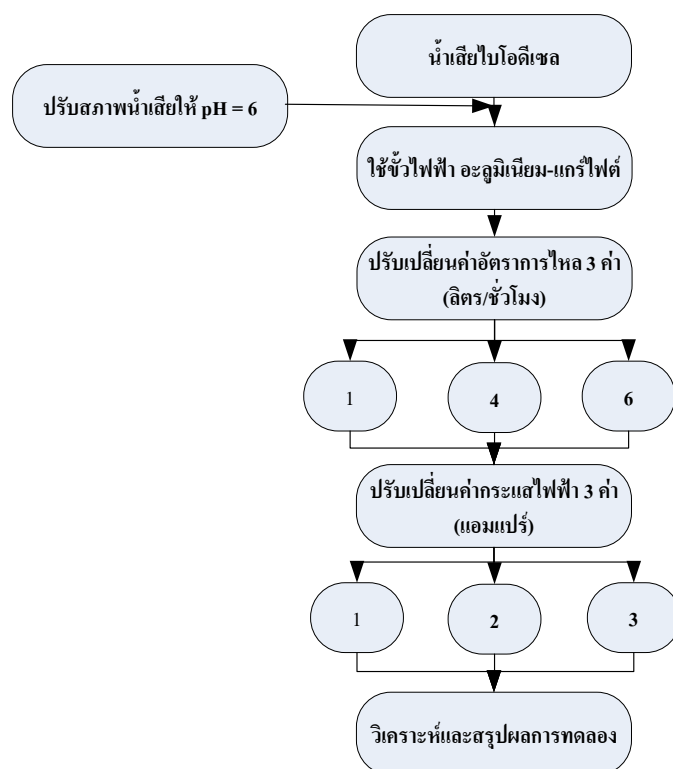
- กระแสที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 1 2 และ 3 แอมแปร์
- อัตราเร็วในการไหล 3 ค่า ได้แก่ 1 4 และ 6 ลิตร/ชั่วโมง

รายละเอียดแผนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.6

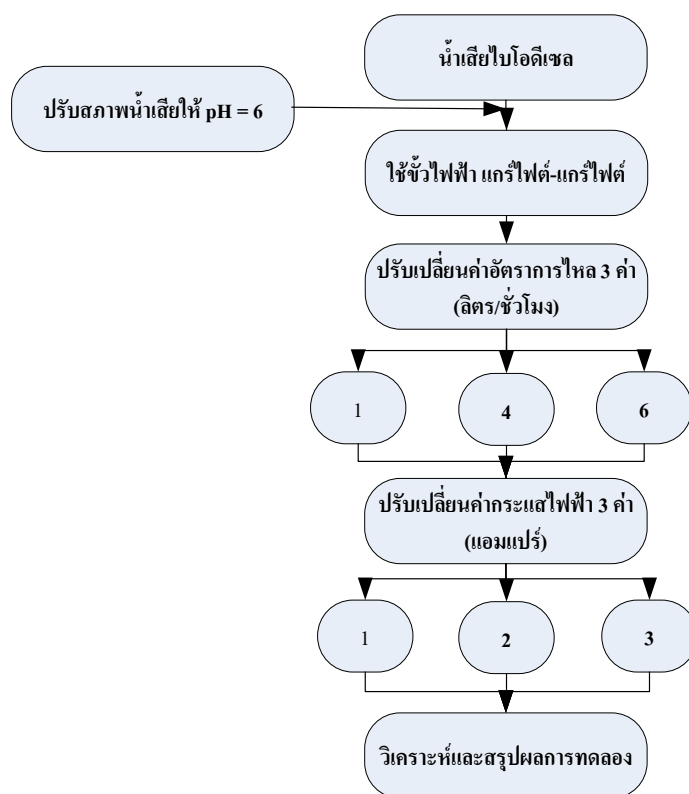
การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้
ขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์

- กระแสที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 1 2 และ 3 แอมแปร์
- อัตราเร็วในการไหล 3 ค่า ได้แก่ 1 4 และ 6 ลิตร/ชั่วโมง

รายละเอียดแผนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ผังการทดลองที่ใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์



รูปที่ 3.7 ผังการทดลองที่ใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้า แกร์ไฟต์-แกร์ไฟต์

3.3.3 ตัวแปรศึกษา

ศึกษาปัจจัยต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไป โอดีเซลด้วยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าดังตารางที่ 3.2

- ตัวแปรควบคุม
 - น้ำเสียจากกระบวนการล้างไป โอดีเซล
 - ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย คือ 6
- ตัวแปรอิสระ
 - ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 2 ชุด ได้แก่ อะลูมิเนียม-แกร์ไฟต์ และแกร์ไฟต์ -แกร์ไฟต์
 - กระแสที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 1 2 และ 3 แอมแปร์
 - อัตราการไหล 3 ค่า ได้แก่ 1 4 และ 6 ลิตร/ชั่วโมง

- ตัวแปรตาม

- ค่าพีเอช อุณหภูมิ ไขมันและน้ำมัน ซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย เมทานอล กลีเซอรอล น้ำหนักขี้ไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และองค์ประกอบของตะกอนที่เกิดจากการบำบัด

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลอง

การทดลองที่	ชุดการทดลองที่	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
1 ขี้ AI-C	1.1	อัตราการไหลน้ำเสีย 1 ลิตร/ชม. 4 ลิตร/ชม. 6 ลิตร/ชม.	1. กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ 2. ค่าพีเอช เท่ากับ 6 3. ระยะห่างระหว่างขี้ คือ 1.5 ซม. 4. ขี้ไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์	1. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2. ซีไอดี 3. สารแขวนลอย 4. น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ลดลง 5. อุณหภูมิ 6. ปริมาณตะกอน 7. พีเอช
	1.2	อัตราการไหลน้ำเสีย 1 ลิตร/ชม. 4 ลิตร/ชม. 6 ลิตร/ชม.	1. กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ 2. ค่าพีเอช เท่ากับ 6 3. ระยะห่างระหว่างขี้ คือ 1.5 ซม. 4. ขี้ไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์	1. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2. ซีไอดี 3. สารแขวนลอย 4. น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ลดลง 5. อุณหภูมิ 6. ปริมาณตะกอน 7. พีเอช
	1.3	อัตราการไหลน้ำเสีย 1 ลิตร/ชม. 4 ลิตร/ชม. 6 ลิตร/ชม.	1. กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ 2. ค่าพีเอช เท่ากับ 6 3. ระยะห่างระหว่างขี้ คือ 1.5 ซม. 4. ขี้ไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์	1. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2. ซีไอดี 3. สารแขวนลอย 4. น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ลดลง 5. อุณหภูมิ 6. ปริมาณตะกอน 7. พีเอช
2 ขี้ C-C	2.1	อัตราการไหลน้ำเสีย 1 ลิตร/ชม. 4 ลิตร/ชม. 6 ลิตร/ชม.	1. กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ 2. ค่าพีเอช เท่ากับ 6 3. ระยะห่างระหว่างขี้ คือ 1.5 ซม. 4. ขี้ไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์	1. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2. ซีไอดี 3. สารแขวนลอย 4. น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ลดลง 5. อุณหภูมิ 6. ปริมาณตะกอน 7. พีเอช
	2.2	อัตราการไหลน้ำเสีย 1 ลิตร/ชม. 4 ลิตร/ชม. 6 ลิตร/ชม.	1. กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ 2. ค่าพีเอช เท่ากับ 6 3. ระยะห่างระหว่างขี้ คือ 1.5 ซม. 4. ขี้ไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์	1. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2. ซีไอดี 3. สารแขวนลอย 4. น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ลดลง 5. อุณหภูมิ

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลอง (ต่อ)

การทดลองที่	ชุดการทดลองที่	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
				6. ปริมาณตะกอน 7. ฟิเอช
	2.3	อัตราการไหลน้ำเสีย 1 ลิตร/ชม. 4 ลิตร/ชม. 6 ลิตร/ชม.	1. กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ 2. ค่าฟิเอช เท่ากับ 6 3. ระหว่างระหว่างขั้ว คือ 1.5 ซม. 4. ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์	1. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2. ซีไอดี 3. สารแขวนลอย 4. น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ลดลง 5. อุณหภูมิ 6. ปริมาณตะกอน 7. ฟิเอช

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์

3.4.1.1 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหล

- 1) นำน้ำเสียมาปรับค่าฟิเอชของเท่ากับ 6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 2) เปิดปั้มน้ำให้น้ำเสียไหลเข้าถังปฏิกิริยาแล้วปรับอัตราการไหลของปั้มให้มีค่าเท่ากับ 1 ลิตร/ชั่วโมง
- 3) เมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำได้แล้ว จึงเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแล้วปรับค่ากระแสไปที่ 1 แอมแปร์ ที่มีขั้วแอโนดเป็นอะลูมิเนียม และขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์ โดยต่อวงจรแบบขนานจำนวน 3 แผ่น โดยวางห่างกัน 1.5 เซนติเมตร และอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น
- 4) เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบครั้งละ 100 มิลลิลิตร ที่เวลา 5 10 30 60 และ 90 นาที ให้ จากนั้นทำการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าฟิเอช อุณหภูมิ ไขมันและน้ำมัน ซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย เมทานอล และกลีเซอรอล
- 5) วัดปริมาตรก๊าซโดยใช้เครื่องเก็บก๊าซขนาด 120 มิลลิลิตร
- 6) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเสียเป็น 4 และ 6 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์
- 7) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อนำไปใช้ในการทดลองผลของปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ต่อไป

3.4.1.2 การทดลองปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลโดยทำการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็น 2 และ 3 แอมแปร์ ตามลำดับ ใน ทุกๆอัตราการไหล 1-6 ลิตร/ชั่วโมง

3.4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ ขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์

ทำการทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลและปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า โดยทำการทดลองทั้งหมดเหมือนการทดลองที่ 1 แต่เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วแอโนดเป็นแกรไฟต์ และขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์ โดยต่อวงจรแบบขนานจำนวน 3 แผ่น โดยวางห่างกัน 1.5 เซนติเมตร

3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย ตะกอนและก๊าซที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสียและตะกอน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	น้ำเสีย ก่อน ทดลอง	หลังการทดลอง	
			ทุกครั้ง	ชุดที่ เหมาะสม
1. พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	/	/	
2. ซีโอดี	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด	/	/	
3. ไนโตรเจนและน้ำมัน	วิธีการสกัดด้วยกรวยแยก	/	/	
4. สารแขวนลอย	Suspended Solids Dried at 103-105 °ซ	/	/	
5. อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์	/	/	
6. เมทานอล	เครื่อง GC (Gas Chromatography)	/		/
7. ก๊าซเซอร์คอล	เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chomatography)	/		/
8. น้ำหนักขั้วไฟฟ้า	เครื่องชั่งแบบหยาบ	/	/	
9. ความต่างศักย์ไฟฟ้า	เครื่อง DC Power Supply	/	/	
10. ปริมาณก๊าซ	การแทนที่น้ำ		/	
11. องค์ประกอบของก๊าซ	เครื่อง GC (Gas Chromatography)			/
12. ของแข็งแขวนลอยใน ตะกอน	Total Suspended Solids Dried at 103-105 °ซ			/
13. ปริมาณธาตุ Al	เครื่อง ICP atomic emission spectrometry			/

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลองได้เก็บตัวอย่างจากโรงงานผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแห่งหนึ่ง มีปริมาณน้ำเสียเข้าระบบประมาณ 200 ลบ.ม./วัน โดยเป็นน้ำเสียที่มาจากกระบวนการผลิตไอน้ำควบแน่นและสำนักงาน เพื่อเป็นตัวแทนของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจริงที่เป็นตัวแทนของน้ำเสียไบโอดีเซลอุตสาหกรรม โดยน้ำเสียที่นำมาทดลองได้ผ่านระบบบ่อดักไขมันมาก่อนและมีลักษณะน้ำเสีย ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

พารามิเตอร์	น้ำเสียดิบ	
	29/04/52	28/06/52
ซีโอดี (mg/L)	32,724	28,764
ไขมันและน้ำมัน (mg/L)	610	100
กลีเซอรอล (mg/L)	936	-
เมทานอล (mg/L)	14,432	-
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	430	405
พีเอช	5.5	5.7

4.2 การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียไบโอดีเซลผ่านระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแล้วเดินระบบอย่างต่อเนื่อง โดยการปรับเปลี่ยน อัตราการไหล 3 ค่า ได้แก่ 1 4 และ 6 ลิตร/ชั่วโมง และปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 1 2 และ 3 แอมแปร์ เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อ

วิเคราะห์เป็นระยะแล้วนำมาหาประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย ผลการทดลองสรุปดังตารางที่ 4.2 และมีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียโดยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความเข้มข้นน้ำออก (มก./ล.)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		
		pH	G&O	COD*	SS*	G&O	COD*	SS*
1	1	8.62	55	29,130	187.38	91.12	7.22	55.91
	2	8.62	55	28,825	195.00	91.12	15.66	54.11
	3	8.56	50	23,336	320.00	91.93	31.72	24.70
4	1	6.98	30	25,677	120.00	95.16	16.03	71.76
	2	6.88	15	25,046	119.16	97.58	18.91	81.74
	3	8.62	40	22,658	205.87	93.54	26.64	77.99
6	1	6.46	55	29,935	252.54	91.12	3.08	65.64
	2	7.06	40	30,889	225.00	93.54	3.46	47.67
	3	7.18	30	27,798	236.67	95.16	13.12	44.96

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการเก็บตัวอย่างที่ออกจากระบบ 1 ชั่วโมง

4.2.1 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัด

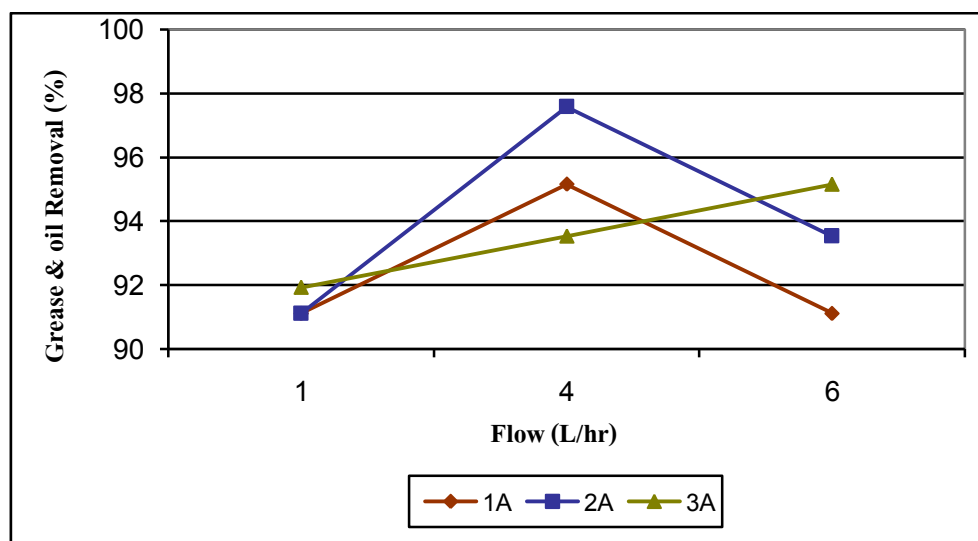
กระแสไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาใน ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะ เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นปริมาณอิเล็กตรอน ที่เข้าทำปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ทำให้อะลูมิเนียมที่ขั้วแอโนดหลุดออกมาเป็น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์แล้วทำปฏิกิริยากับน้ำได้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ซึ่งเป็นสารช่วยตกตะกอนให้มีปริมาณมากขึ้น

4.2.1.1 การกำจัดไขมันและน้ำมัน

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่าปริมาณขั้วโลหะที่ละลายในสารละลายนำไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่ามากจะส่งผลให้มีขั้วโลหะละลายสู่น้ำตัวอย่างมากทำให้มีสารก่อการจับตัวมากขึ้น โอกาสในการพบกันของไขมันและน้ำมันกับตัว

ตกตะกอนจึงเพิ่มขึ้น ที่กระแสไฟฟ้าสูงจะให้ค่าร้อยละการกำจัดของไขมันและน้ำมันสูงกว่าที่กระแสไฟฟ้าต่ำ และกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนจะทำให้ น้ำแตกตัวเกิดเป็นก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ฟองก๊าซมากขึ้นจะทำให้โอกาสในการที่จะสัมผัสกันของสารรวมตะกอนกับไขมันและน้ำมันก็จะสูงขึ้นด้วยทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.1

แต่ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง มีแนวโน้มการกำจัดลดลง อาจจะมีสาเหตุมาจากพีเอชของน้ำเสียมีแนวโน้มสูงเท่ากับ 8.62 ทำให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เช่น $Al(OH)_4^-$ ซึ่งไม่อยู่ในรูปของ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ที่เป็นสารช่วย ตกตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง

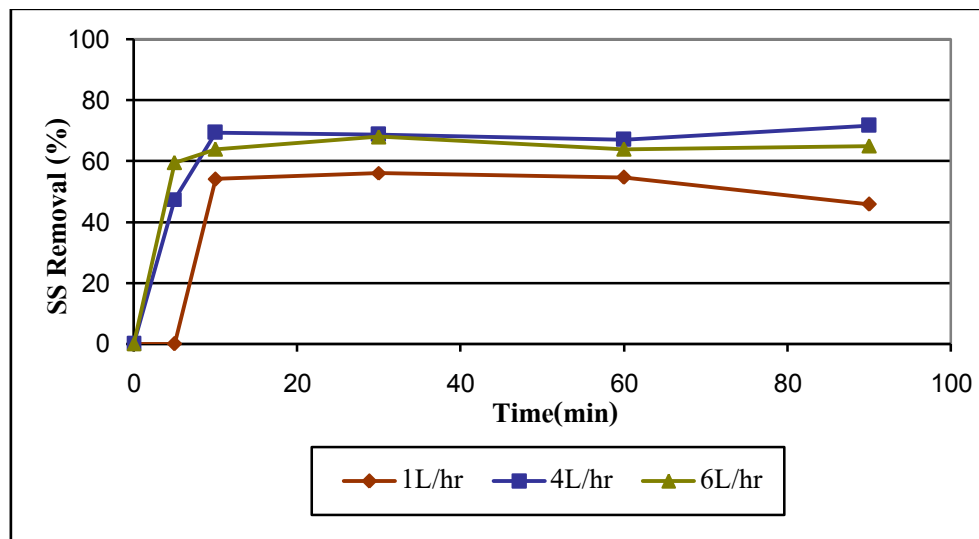


รูปที่ 4.1 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

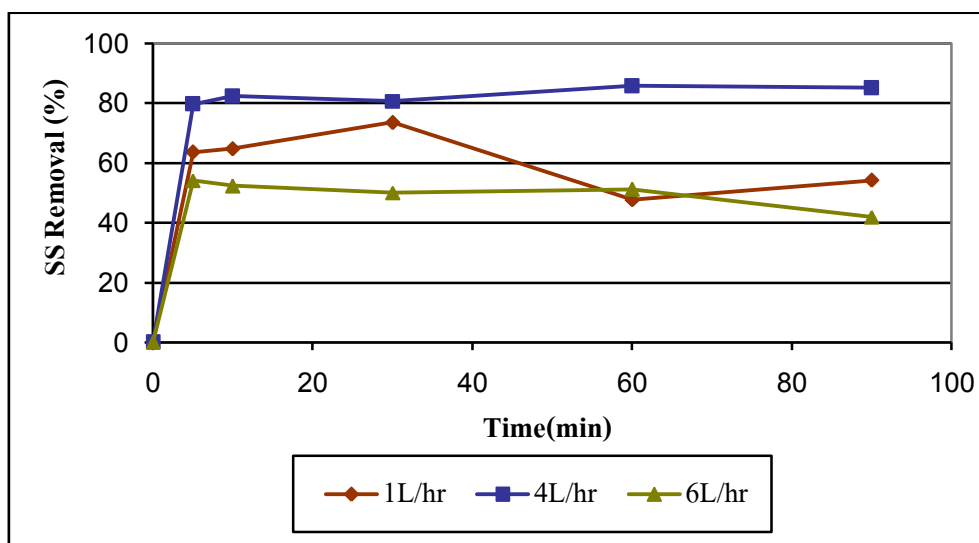
4.2.1.2 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัด ของแข็งแขวนลอย มีแนวโน้มรูปแบบการกำจัดทิศทางที่ไม่แน่นอนที่จะบ่งบอกว่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น โดยน่าจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อัตราการไหลที่ต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้ตะกอนหลุดออกมามาก กระแสไฟฟ้าก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัย เนื่องจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทำให้เพิ่มโอกาสที่มลพิษกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) แต่จะมีผลเสียเมื่อระบบสร้างก๊าซมากเกินไป จะไปทำให้ชั้นตะกอนที่อยู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาแตกออกเป็นตะกอนขนาดเล็กแล้วหลุดออกมากับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

กระแสไฟฟ้ามีผลต่อการทำงานของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จากผลการทดลองกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแต่ละกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าคงที่ทุกอัตราการไหล คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 55.91 ถึง 77.76 และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ 2 แอมแปร์ พบว่าที่อัตราการไหล 4-6 ลิตร/ชั่วโมง ยังคงมีค่าคงที่ แต่ที่ 1 ลิตร/ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดมีความแปรปรวนและที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทุกอัตราการไหลมีค่าแปรปรวนมากขึ้น ทั้งนี้ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดเพราะระบบอยู่ในสภาพสมดุลย์ที่เกิดการปั่นป่วนน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4.2

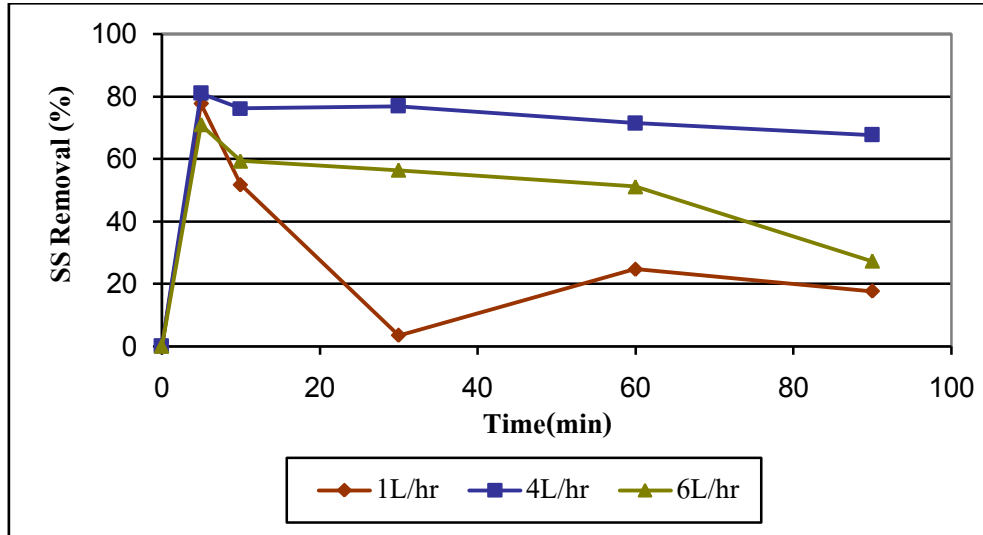


(ก) 1 แอมแปร์



(ข) 2 แอมแปร์

รูปที่ 4.2 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

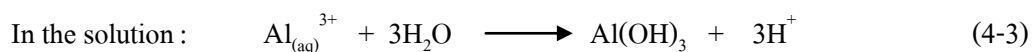
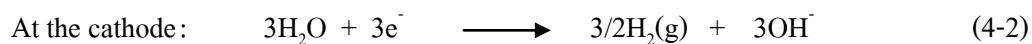
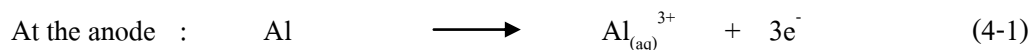


(ค) 3 แอมแปร์

รูปที่ 4.2 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอย
ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์ (ต่อ)

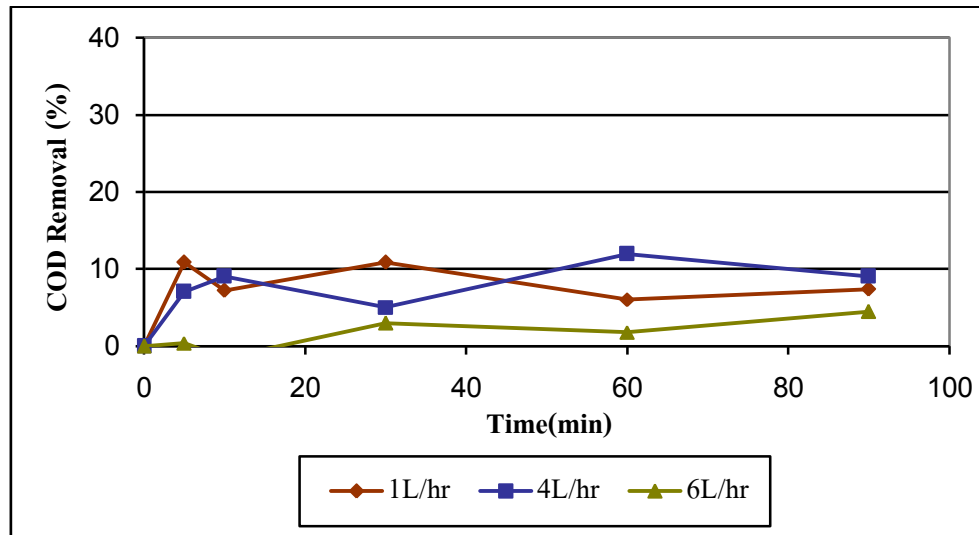
4.2.1.3 การกำจัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มมากขึ้น โดยพวกรสารแขวนลอยต่างๆในน้ำเสียจะถูกจับโดย Al(OH)_3 ซึ่งการที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ปริมาณของ Al(OH)_3 สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เพิ่มมากขึ้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนสุดท้ายก็จะสูงขึ้นตามดังสมการที่ 4-1 ถึง 4-3 (Daneshvar และคณะ 2006)

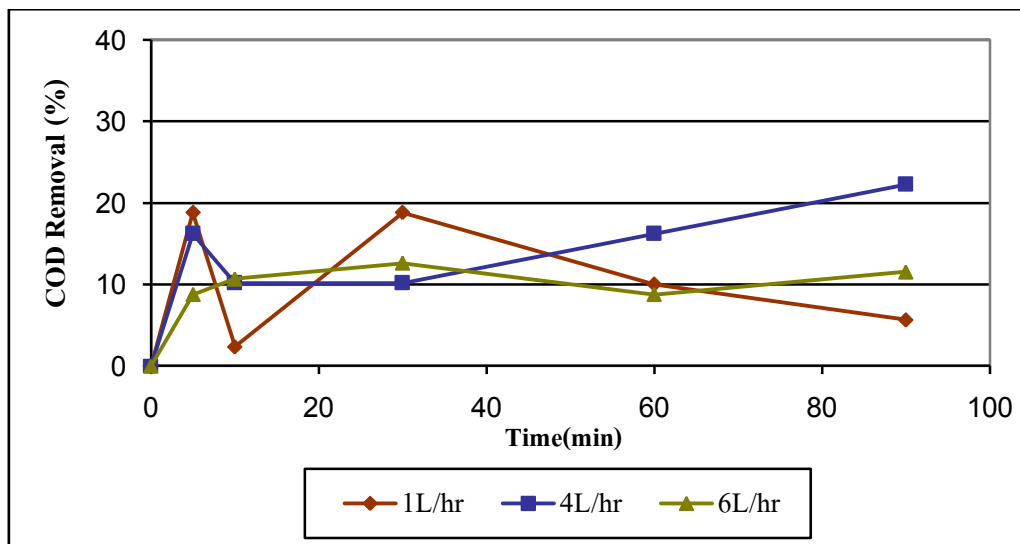


ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่าปริมาณขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่ามากจะส่งผลให้มีขั้วโลหะละลายสู่น้ำตัวอย่างมาก ทำให้มีสารก่อการจับตัวมากขึ้น โอกาสในการพบกันของสารมลพิษกับตัวตกตะกอนจึงเพิ่มขึ้น ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงจะให้ค่าร้อยละการขจัดของสารมลพิษสูงกว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ

จากการทดลองเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้ามีผลเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเพียงเล็กน้อย โดยพบว่ามีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 3.08 - 16.03 3.46 - 18.91 และ 13.12 - 31.72 ที่กระแสไฟฟ้า 1 2 และ 3 แอมแปร์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4. 3 และที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ อัตราการไหล 1 ลิตร/ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากการใช้ระดับกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง เท่ากับร้อยละ 12.81 เท่านั้น

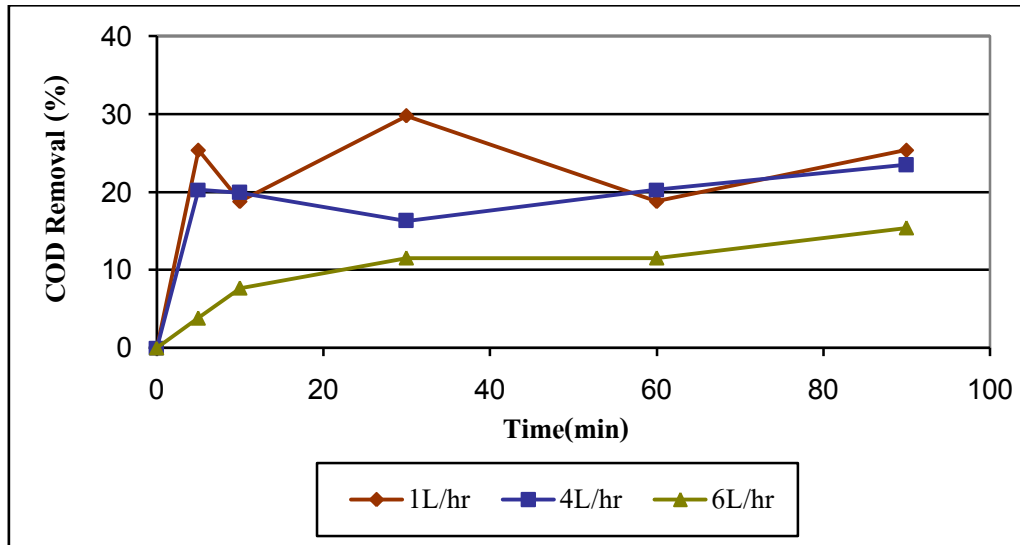


(ก) 1 แอมแปร์



(ข) 2 แอมแปร์

รูปที่ 4.3 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอดีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์



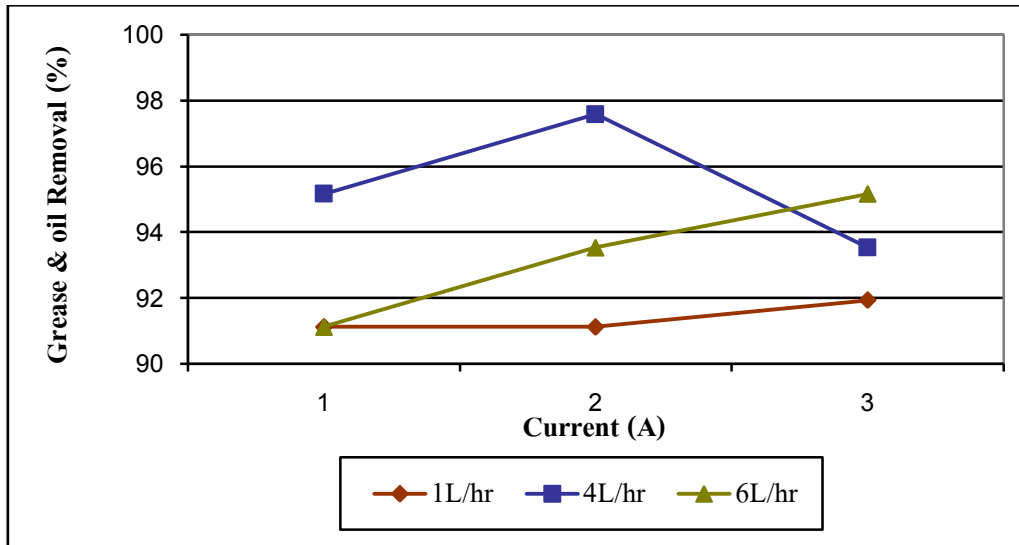
(ค) 3 แอมแปร์

รูปที่ 4.3 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอไซด์ที่ใช้ขี้ไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์ (ต่อ)

4.2.2 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

4.2.2.1 การกำจัดไขมันและน้ำมัน

การเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเพิ่มปริมาณไขมันและน้ำมันเข้ามาในระบบและยังเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนทำให้มลพิษเพิ่มโอกาสที่จะไปจับกับสารช่วยตกตะกอนแยกออกมาจากน้ำเสียได้ดีขึ้น แต่ในทางกลับกันหากอัตราการไหลสูงเกินไปอาจมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันลดลงได้จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 1 เป็น 4 ลิตร/ชั่วโมง ที่กระแสไฟฟ้าใดๆ ก็ตามมีผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดไขมันและน้ำมันเพิ่มขึ้น คือ จากร้อยละ 91.12-91.93 เป็น 93.54-97.58 เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเสียเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น โอกาสในการพบกันของสารมลพิษกับสารช่วยตกตะกอนจึงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.4 แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่ 6 ลิตร/ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1 และ 2 แอมแปร์กลับลดลง คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 91.12 - 93.54 สาเหตุน่าจะมาจากการเพิ่มอัตราการไหลสูงมีผลให้ปริมาณไขมันและน้ำมันที่เข้าระบบสูงขึ้น ที่กระแสไฟฟ้าต่ำจึงไม่สามารถผลิตอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) เพื่อมากำจัดไขมันและน้ำมันที่เข้ามาได้หมด แต่ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ สามารถผลิต อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) มากพอทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้นเท่ากับ 95.16



รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

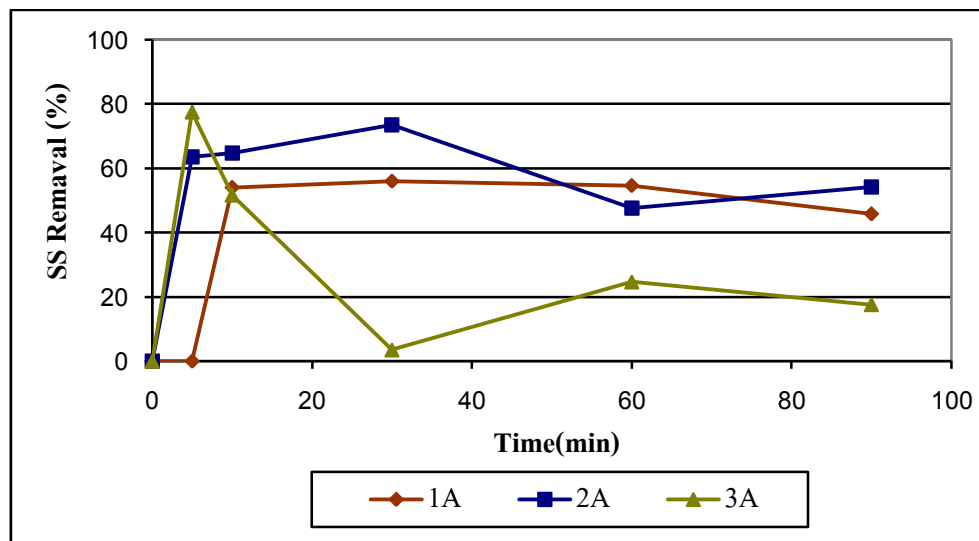
4.2.1.2 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

การเดินระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง โดยควบคุมอัตราการไหลน้ำเสียคงที่เท่ากับ 1 ลิตร/ชั่วโมง แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบตามเวลาดังแต่เริ่มป้อนน้ำเสีย พบว่าเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1 และ 2 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองเดินระบบ โดยมีร้อยละการกำจัดอยู่ระหว่าง 45.88 – 56.07 และ 47.64 - 73.52 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 3 แอมแปร์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแปรปรวนและมีแนวโน้มต่ำไม่คงที่ เนื่องจากเกิดฟองก๊าซมากทำให้น้ำเสียในระบบมีความปั่นป่วนสูงและมีตะกอนออกจากระบบสูง ดังรูปที่ 4.5

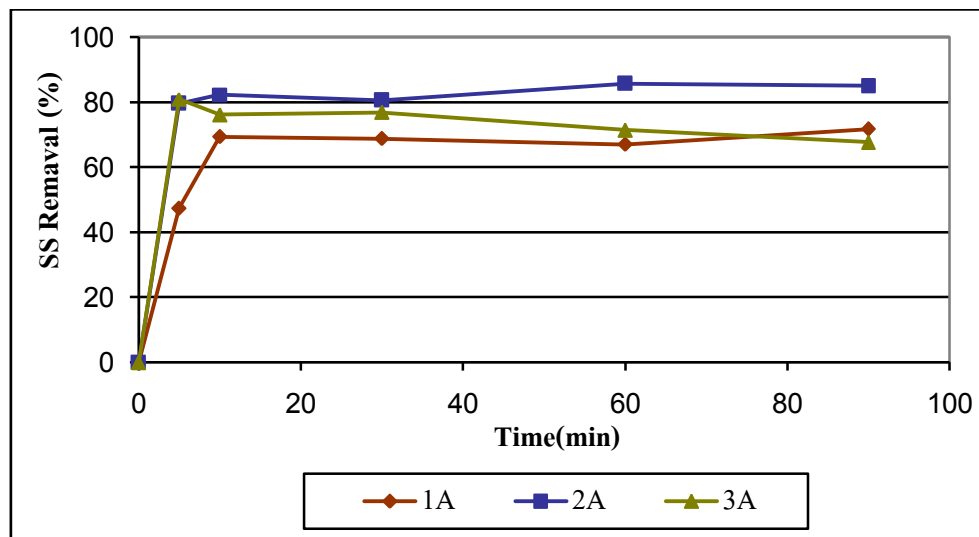
รูปที่ 4.5 (ข) แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย เมื่อเดินระบบที่อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงในทุกๆกระแสไฟฟ้า (1-3 แอมแปร์) โดยมีร้อยละการกำจัดอยู่ระหว่าง 67.05 ถึง 85.71 นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหล 6 ลิตร/ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าที่อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง ในทุกกระแสไฟฟ้า โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 27.32 ถึง 68.02 ดังรูปที่ 6.5 (ค)

สรุปอาจกล่าวได้ว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดของแข็งแขวนลอย คือ 4 ลิตร/ชั่วโมง คาดว่าเพราะเป็นอัตราเร็วพอเหมาะที่ไม่ทำให้ตะกอนที่รวมตัวอยู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาเกิดแตกออกมาเป็นตะกอนขนาดเล็กและปนกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและจากการทดลองถึงปฏิกิริยา ที่ใช้ในการทดลอง ไม่มีระบบกวาดตะกอนที่เกิดจากระบบรวมตะกอนด้วย

ไฟฟ้าและตะกอนถูกทำให้ลอยขึ้นสู่อากาศโดยฟองก๊าซที่เกิดขึ้น ซึ่งตะกอนจะไปรวมตัวใกล้อยู่กับทางน้ำออกทำให้ผลการทดลองการกำจัดของแข็งแขวนลอยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ 1) อัตราไหลที่น้อยมากจะทำให้มีสัดส่วนของตะกอนที่หลุดในปริมาณสูง เช่น อัตราการไหลที่ 1 ลิตร/ชั่วโมง 2) อัตราไหลที่สูงเป็นสาเหตุให้ระบบมีความปั่นป่วนสูงแล้วทำให้ระบบไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำเสียดกับตะกอนและมีตะกอน ขนาดเล็ก หลุดออกมากับน้ำเสียดที่ผ่านกา รบ้ำบัด เช่น อัตราการไหลที่ 6 ลิตร/ชั่วโมง

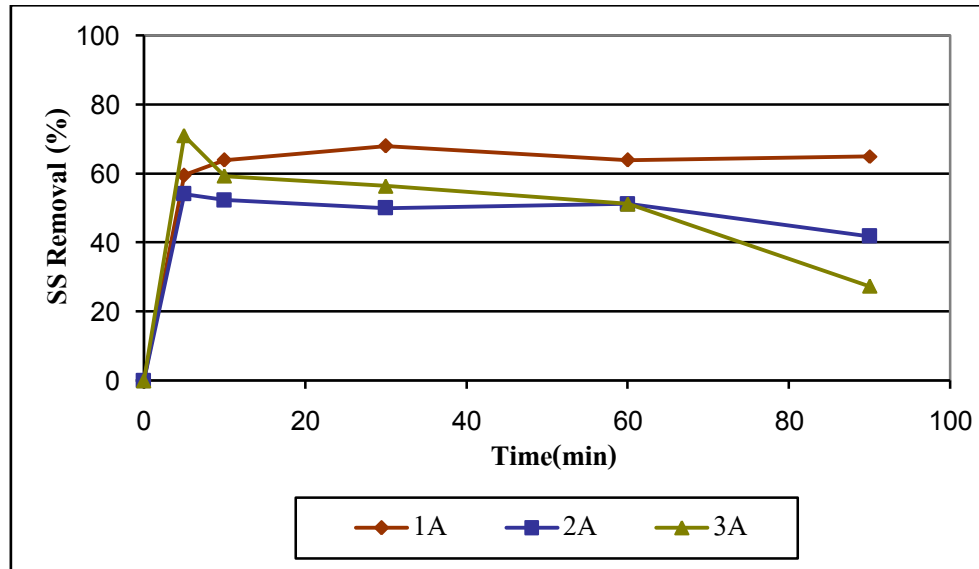


(ก) 1 ลิตร/ชั่วโมง



(ข) 4 ลิตร/ชั่วโมง

รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์



(ค) 6 ลิตร/ชั่วโมง

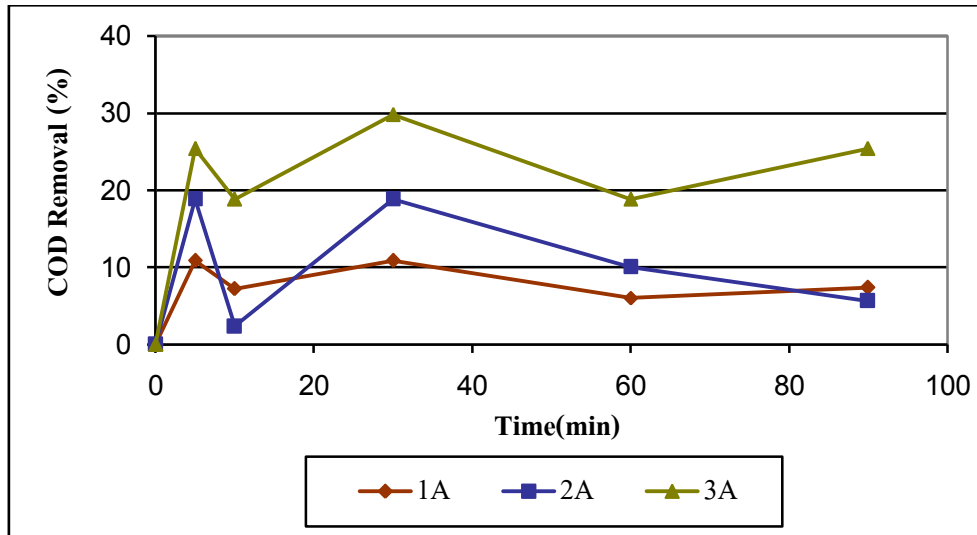
รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอย
ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์ (ต่อ)

4.2.1.3 การกำจัดซีโอดี

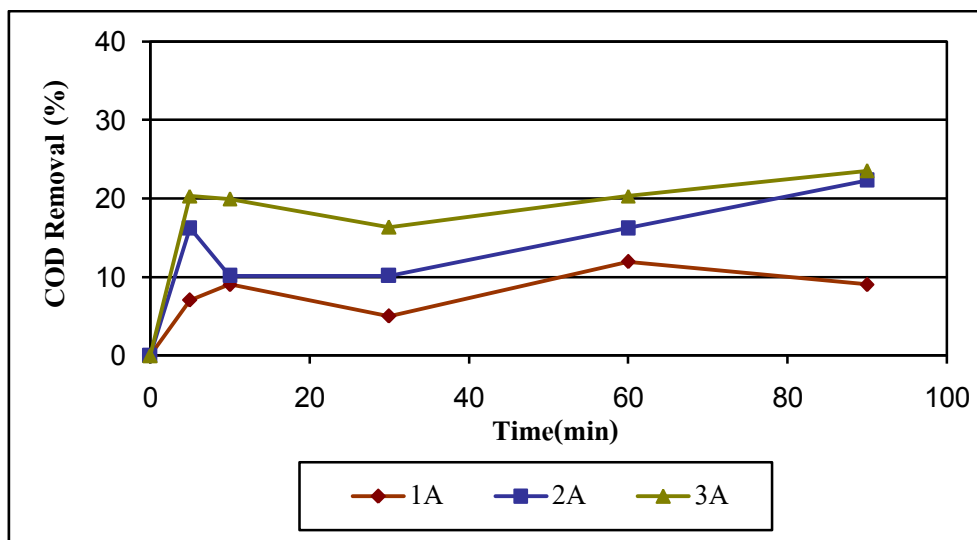
อัตราการไหลของน้ำเสียจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลของการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียต่อการกำจัด ซีโอดี มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.6

จากผลการทดลอง พบว่าที่อัตราการไหล 1 ลิตร/ชั่วโมงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุด คืออยู่ในช่วงร้อยละ 7.22 – 31.72 และที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะลดระยะเวลาทำปฏิกิริยาของน้ำเสียในระบบมีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยารวมตะกอนลดลง

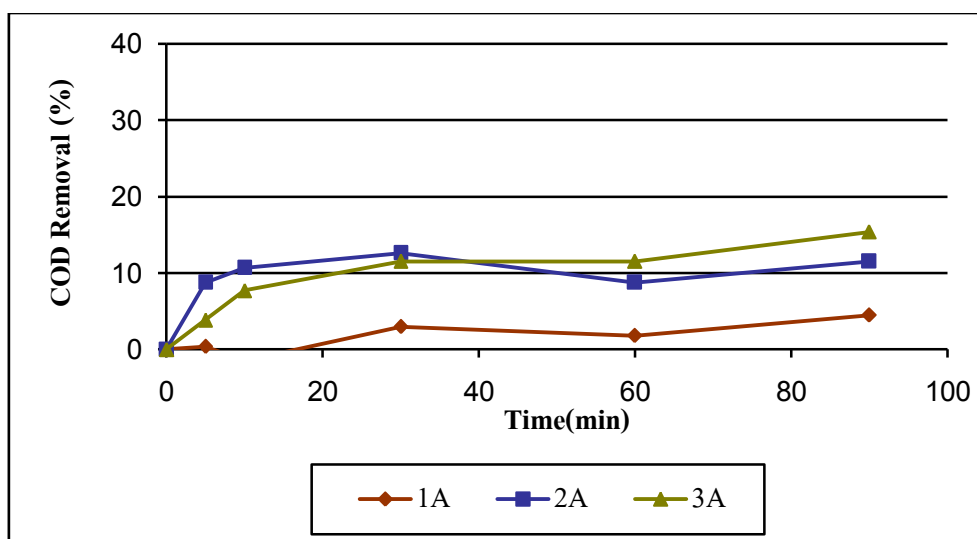
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เปรียบเทียบกับการกำจัดไขมันและน้ำมัน และการกำจัดของแข็งแขวนลอย พบว่าแนวโน้มการกำจัดซีโอดีแตกต่างจากการกำจัดไขมันและน้ำมัน และการกำจัดของแข็งแขวนลอย ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบหลักของน้ำเสียเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ ซึ่งไม่สามารถแยกจากน้ำเสียโดยระบบรวมตะกอนทางเคมีประกอบกับไขมันและน้ำมันที่สามารถแยกได้จากน้ำเสียโดยระบบรวมตะกอนทางเคมีมีปริมาณน้อยมาก (610 มก./ล.) เมื่อเทียบกับค่าซีโอดี (32,724 มก./ล.) จึงได้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกัน



(ก) 1 ลิตร/ชั่วโมง



(ข) 4 ลิตร/ชั่วโมง



(ค) 6 ลิตร/ชั่วโมง

รูปที่ 4.6 ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดซีโอดีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

4.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซ

ระบบ รวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่ขั้วแคโทด ซึ่งจะพาให้ตะกอนลอยขึ้นด้านบนและแยกออก ในการทดลองได้วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองแสดงอัตราการเกิดก๊าซในระบบ

พารามิเตอร์	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
		1	2	3
	1	7.39	16.16	24.59
อัตราการเกิดก๊าซ (มล./นาท)	4	7.33	17.71	27.26
	6	6.60	16.59	25.48

อัตราการเกิดก๊าซ สามารถอธิบายตามผลการศึกษาของ C.Y. HU และคณะ (2005) และที่หาความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจากกฎของก๊าซ (Ideal gas law) และกฎของฟาราเดย์ ได้ดังสมการ

$$V_{H_2} = \frac{V \times R \times T \times Q_e}{Z \times F \times P} \quad (4.4)$$

โดยที่

Q_e เป็นปริมาณไฟฟ้าหาได้จาก $\frac{nIt}{V}$

n เป็นจำนวนแผ่นขั้วไฟฟ้า

I เป็นกระแสไฟฟ้า

t เป็นเวลา

V_{H_2} เป็นปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน

V เป็นปริมาตรของน้ำเสียที่ทำปฏิกิริยา

R เป็นค่าคงที่ก๊าซ = 8.14 JK⁻¹mol⁻¹

T เป็นอุณหภูมิ (องศาเคลวิน, K)

P เป็นความดันบรรยากาศ (นิวตันต่อตารางเมตร, N/m²)

- Z เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
F เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

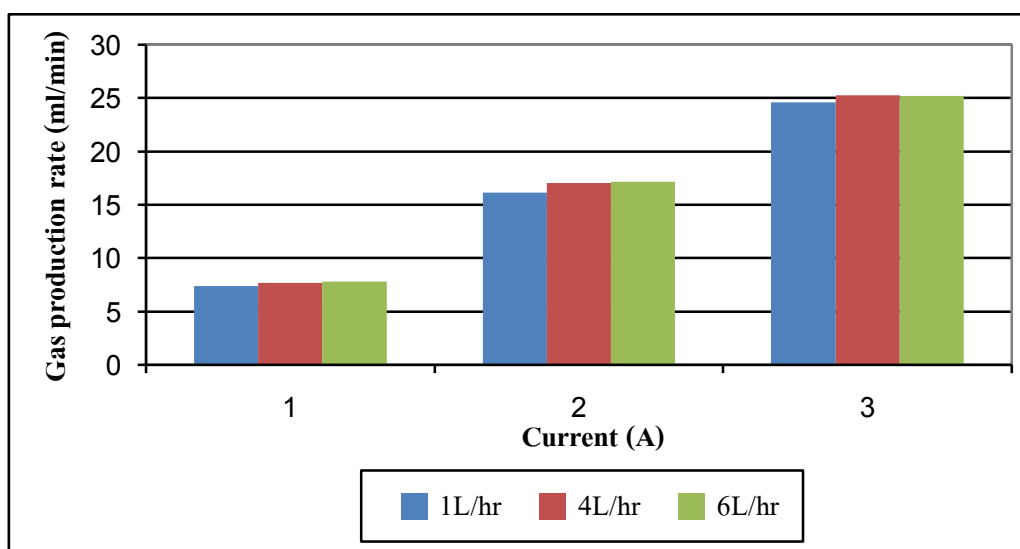
จะได้

$$V_{H_2} = \frac{R \times T \times I \times t}{Z \times F \times P} \quad (4.5)$$

ผลของกระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลที่มีผลต่อการเกิดก๊าซสรุปได้ดังนี้

4.2.3.1 กระแสไฟฟ้า

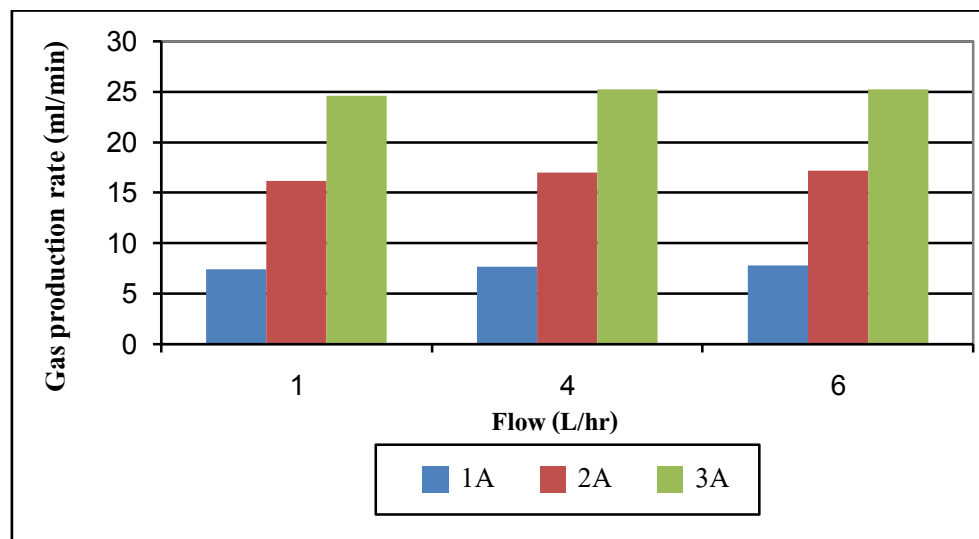
กระแสไฟฟ้าจะมีผลต่ออิเล็กตรอน เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนจะทำให้น้ำแตกตัวเกิดเป็นก๊าซเพิ่มขึ้น ดังสมการ 4.5 จาก ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า 1 เป็น 3 แอมแปร์ จะเกิดปริมาณก๊าซในระบบเพิ่มมากขึ้น อยู่ในช่วงเท่ากับ 6.60 – 7.39 16.16 - 17.71 และ 24.59 - 27.26 มล./นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4. 7 โดยจากการทดลอง เมื่อกระแสไฟฟ้าเป็น 3 แอมแปร์ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมากเกินไปเป็นสาเหตุให้ระบบมีความปั่นป่วนสูงแล้วทำให้ระบบไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำเสียกับตะกอนและมีตะกอนหลุดออกมา กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน และของแข็งแขวนลอยลดลง



รูปที่ 4.7 ผลของกระแสต่อการเกิดก๊าซที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

4.2.3.2 อัตราการไหล

จากผลการทดลอง อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนค่อนข้างคงที่ คือที่ 1 - 3 แอมแปร์ อยู่ในช่วง 6.60 – 7.39 16.16 - 17.71 และ 24.59 - 27.26 มล./นาที่ ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าผลของอัตราการไหลไม่มีส่วนสัมพันธ์กับอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากอิเล็กตรอนจะทำให้ น้ำแตกตัวเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน การเพิ่มอัตราการไหลหรือระยะเวลาทำปฏิกิริยาไม่ได้เป็นการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนจึงทำให้อัตราการเกิดก๊าซค่อนข้างคงที่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม ดังรูปที่ 4.8



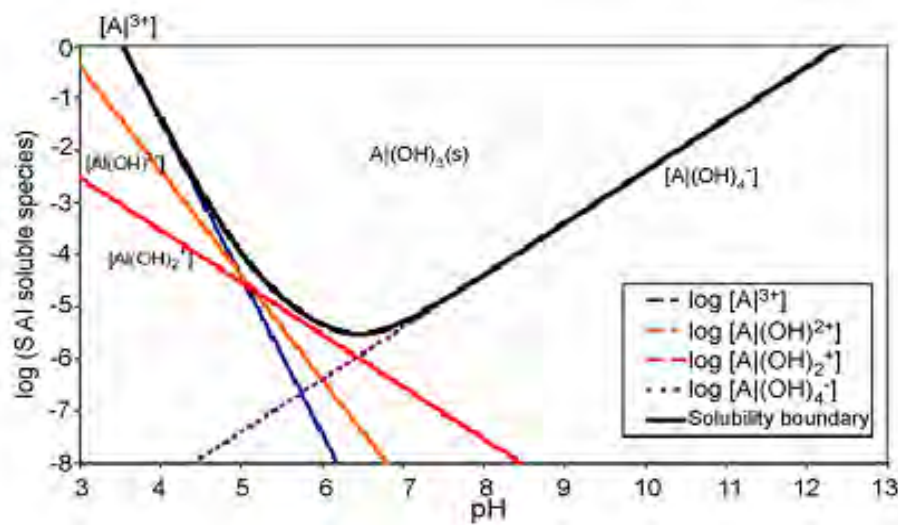
รูปที่ 4.8 ผลของอัตราการไหลต่อการเกิดก๊าซที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

จากสมการ ที่ 4.5 พบว่าอัตราการไหลของน้ำเสียไม่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยอาจมาจากปัจจัยอื่นๆ เช่นอุณหภูมิของระบบที่ทำการทดลองในอุณหภูมิห้อง ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ จึงส่งผลต่อปริมาตรก๊าซที่ได้สูงขึ้น

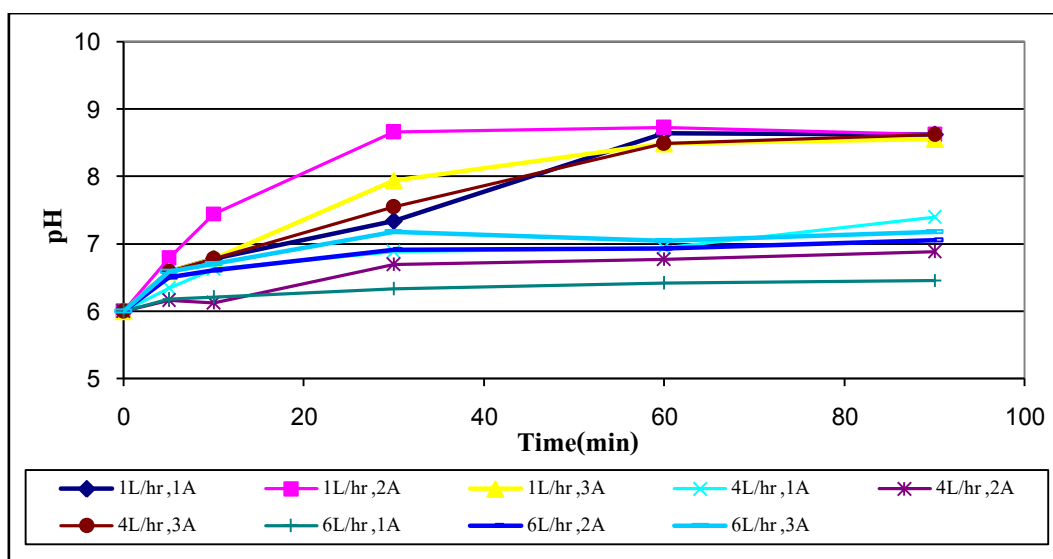
4.2.4 พิเศษของน้ำที่ออกจากระบบ

ค่าพีเอชของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เนื่องจากค่าพีเอชจะเป็นปัจจัยกำหนดชนิดของ ไอออนอะลูมิเนียมที่ผลิตจากขั้วไฟฟ้า โดยช่วงของพีเอชที่จะทำให้เกิดอนุภาคตะกอนของ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ที่สามารถจับไขมันและน้ำมัน

คอลลอยด์ และของแข็งแขวนลอยได้คืออยู่ในช่วงระหว่างพีเอช 6 ถึง 8 ดังรูปที่ 4.9 โดยจากการทดลองพบว่าเมื่อเริ่มต้นพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6 น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 6.18 ถึง 8.73 ดังรูปที่ 4.10 ในช่วงแรกของการเริ่มต้นทดลอง พีเอชของน้ำตัวอย่าง สูงขึ้นตามเวลา เมื่อเวลา 30 นาที ระดับของพีเอชจะสูงขึ้นในอัตราที่ลดลงและจะคงที่ ซึ่งแสดงว่าระบบเริ่มเข้าสู่สมดุล จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าที่พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบสูงขึ้นตามเวลาสาเหตุมาจากที่ขั้วแคโทดจะเกิดไฮดรอกไซด์ไอออนที่มีสภาวะเป็นด่างและก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งจะทำให้พีเอชในระบบสูงขึ้นแต่เมื่อระบบมีน้ำเข้า - ออกตลอดเวลาน้ำที่เข้าระบบมีพีเอชต่ำ จึงทำให้สะท้อนกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นในระบบทำให้ระบบเกิดสมดุล



รูปที่ 4.9 กราฟการตกตะกอนของอะลูมิเนียมที่พีเอชต่างๆ (Bensadok และคณะ 2007)



รูปที่ 4.10 ระดับพีเอชกับช่วงเวลาเก็บน้ำที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

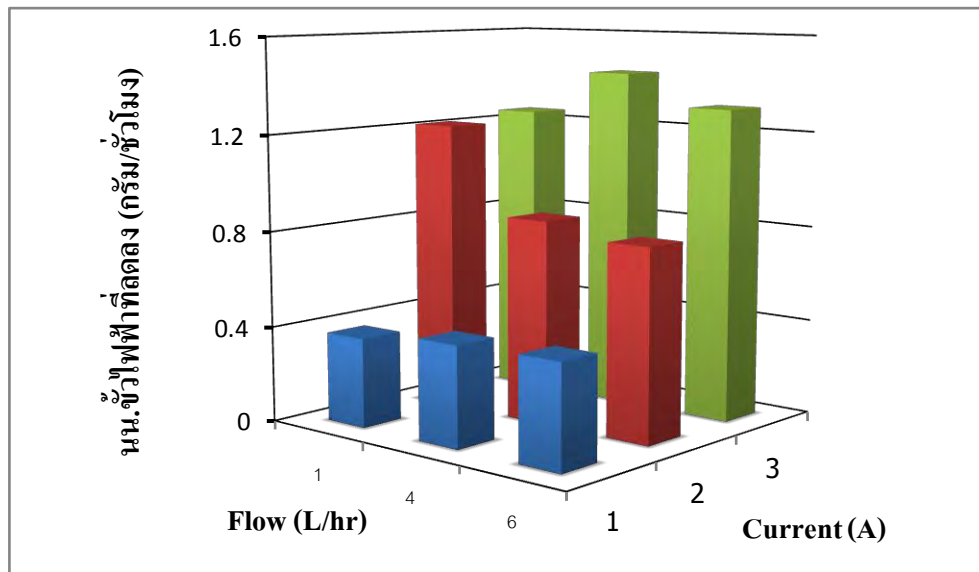
4.2.5 น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่สลายตัวไปหลังการทดลอง

น้ำหนักของขี้ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้มีการหลุดของโลหะ ไอออน โดยเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ปริมาณของขี้ไฟฟ้าที่สลายออกมามีปริมาณมากขึ้น ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.11 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 1 เป็น 3 แอมแปร์ ขี้ไฟฟ้าที่ขี้แอนโคมมีน้ำหนักลดลงจาก 0.373 เป็น 1.4312 กรัม/ชั่วโมงโดยตรงตามกฎข้อที่ 1 ของฟาราเดย์ที่ว่า ปริมาณสารโคสสารหนึ่งซึ่งแยกสลายออกมาจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลงไป ถ้าผ่านน้อยสารที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วยเช่นกัน (วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์ , 2546) แต่เมื่อคือน้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ลดลงในหน่วย กรัม/ ลูกบาศก์เมตร การเพิ่มอัตราการไหลเป็นการลดระยะเวลาทำปฏิกิริยาทำให้น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ไหลลดลง ดังนั้นในการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ดีที่สุดคือ ระดับกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 4 ลิตร/ชั่วโมง ใช้ น้ำหนักขี้ไฟฟ้า 0.8508 กรัม/ชั่วโมง หรือคิดเป็นค่าขี้ไฟฟ้า 21.27 บาท/ลูกบาศก์เมตร (กรณีที่ใช้อะลูมิเนียมแผ่น) ดังรูปที่ 4.12 แต่ถ้าใช้อะลูมิเนียมรีไซเคิล เช่นฝากระป๋องน้ำอัดลม (ราคาขาย 52 บาท/กิโลกรัม) จะสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านขี้ไฟฟ้าได้

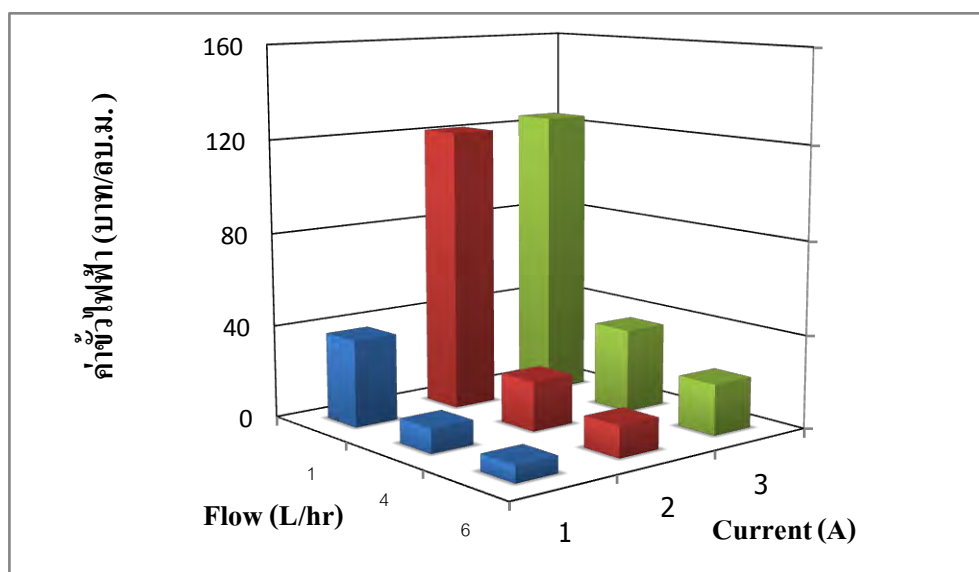
ตารางที่ 4.4 น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่สลายตัวและค่าขี้ไฟฟ้า

อัตราการไหล (ลิตร/ ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	G&O ที่ถูก กำจัด (มก./ล.)	น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ ใช้ (กรัม/ชั่วโมง)	น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ ใช้ (กรัม/ลบ.ม.)	ค่าขี้ไฟฟ้า (บาท/ลบ. ม.)	ค่าขี้ไฟฟ้า (บาท/กิโลกรัม ไขมัน และน้ำมัน)
1	1	555	0.373	373.00	37.30	67.20
	2	555	1.2112	1211.20	121.12	218.23
	3	560	1.2426	1242.60	124.26	221.89
4	1	580	0.4186	104.65	10.46	18.03
	2	595	0.8508	212.70	21.27	35.74
	3	570	1.4312	357.80	35.78	62.77
6	1	555	0.4296	71.60	7.16	12.90
	2	570	0.7979	132.98	13.29	23.31
	3	580	1.3026	217.10	21.71	37.43

หมายเหตุ ราคาแผ่นอะลูมิเนียม 100 บาท/กิโลกรัม
ที่มา : โดยการสอบถามจากผู้ประกอบการร้านขายอะลูมิเนียม

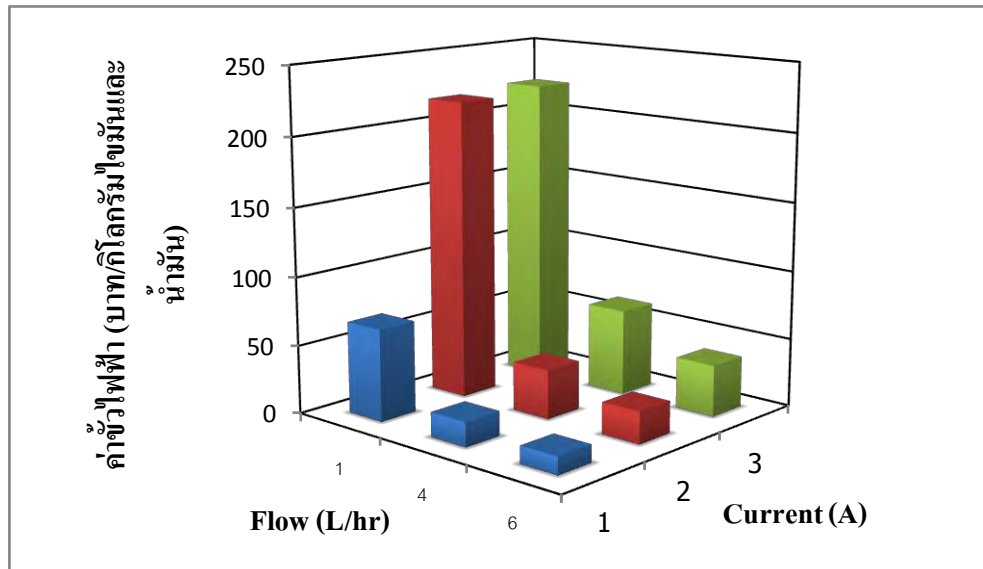


รูปที่ 4.11 ผลของชั่วโมงไฟฟ้าที่ลดลงที่ใช้ชั่วโมงไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์



รูปที่ 4.12 ผลของค่าชั่วโมงไฟฟ้าที่ใช้ชั่วโมงไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

แต่เมื่อคิดผลของค่าชั่วโมงไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันมีหน่วย บาท/กิโลกรัมไขมันและน้ำมันที่กำจัด พบว่า ที่อัตราการไหล 6 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ใช้ค่าไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 12.90 บาท/กิโลกรัมไขมันและน้ำมันที่กำจัด เนื่องจาก ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันไม่ต่างกันมาก ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ค่าชั่วโมงไฟฟ้าต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ชั่วโมงไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

4.2.6 พลังงานที่ใช้ในการทดลอง

การใช้พลังงานในระบบในการบำบัดน้ำเสียหาได้จากสมการ ดังนี้

$$W = U_v \times I \quad (4.3)$$

โดยที่ W เป็นงานทางไฟฟ้า (วัตต์)
 I เป็นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 U_v เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

พลังงานที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจะหาได้จากงานทางไฟฟ้า (W) คูณกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Contact time) ในการทดลองควบคุมอัตราการไหล 1 4 และ 6 ลิตร/ชั่วโมง หรือเท่ากับ 15 22.50 และ 90 นาที ตามลำดับ ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการทดลองหาได้จากสมการที่ (4.3) คูณด้วยเวลาทำปฏิกิริยาหรือหารด้วยอัตราการไหล ดังสมการที่ (4.4)

$$W_e = \frac{U_v \times I}{Q} \quad (4.4)$$

โดยที่ W_e เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีหน่วยเป็น (กิโลวัตต์-ชั่วโมง / ลูกบาศก์เมตรของ
ถึงปฏิกิริยา)
 Q เป็นอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าถึงปฏิกิริยา (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)

พลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาควบคุมกระแสไฟฟ้า 1 2 และ 3 แอมแปร์ เวลาทำปฏิกิริยา 15 22.5 และ 90 นาที ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด ไชมันและน้ำมัน มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร โดยหาได้จากสมการ (4.4) ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการใช้พลังงานก็จะน้อยลง เนื่องจากอัตราการไหลจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นในการกำจัด ไชมันและน้ำมันที่ดีที่สุด คือ ระดับกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 4 ลิตร/ชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 2.25 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 4.50 บาท/ลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 4.14

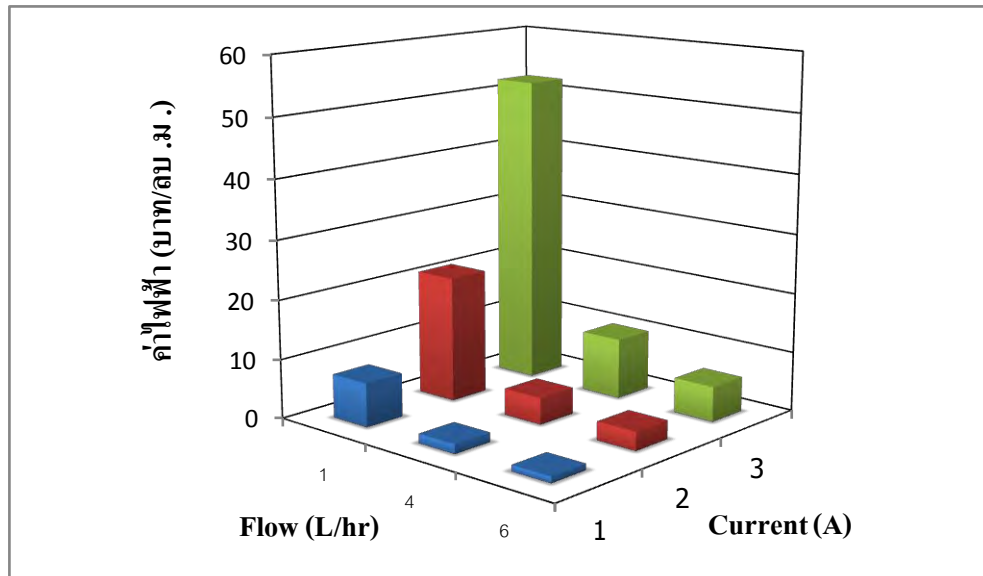
ตารางที่ 4.5 ผลของค่าพลังงานและค่าไฟฟ้า

อัตราการไหล (ลิตร/ ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	G&O ที่ถูก กำจัด (มก./ล.)	ค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ค่า พลังงาน (kW- hr/m ³)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)	ค่าไฟฟ้า (บาท/กิโลกรัมไขมัน และน้ำมัน)
1	1	555	3.7	3.70	7.40	13.33
	2	555	5.3	10.60	21.20	38.19
	3	560	8.7	26.10	52.20	93.21
4	1	580	3.2	0.80	1.60	2.75
	2	595	4.5	2.25	4.50	7.56
	3	570	6.8	5.10	10.20	17.89
6	1	555	3.2	0.53	1.06	1.90
	2	570	4.7	1.57	3.14	5.50
	3	580	6.8	2.95	5.90	10.17

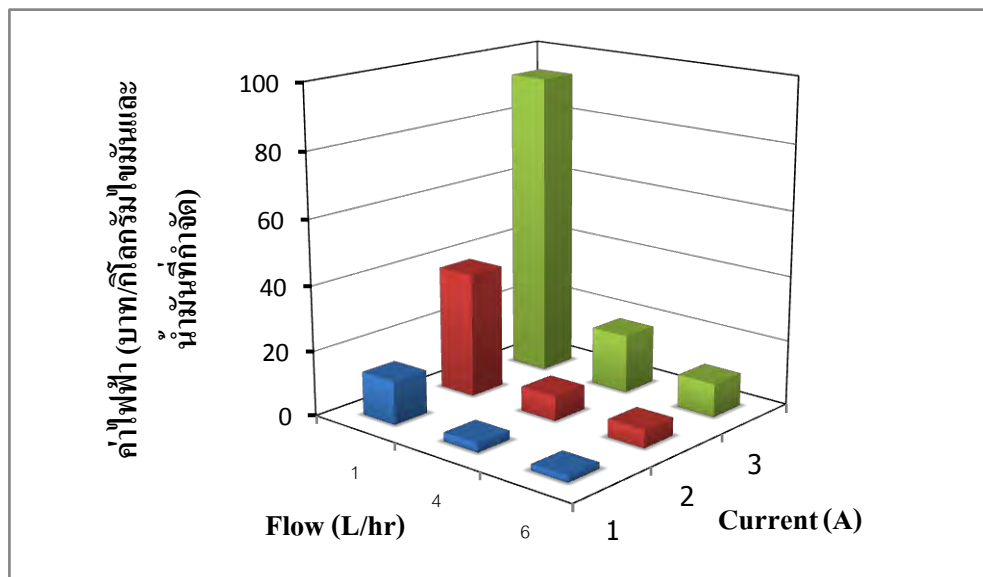
หมายเหตุ ค่าไฟฟ้า = 2 บาท/หน่วย

แต่เมื่อคิดผลของค่าใช้จ่ายต่อประสิทธิภาพการกำจัด ไชมันและน้ำมันมีหน่วย บาท/
กิโลกรัมไขมันและน้ำมันที่กำจัด พบว่า ที่อัตราการไหล 6 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ใช้

ค่าไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 1.90 บาท/กิโลกรัมไขมันและน้ำมันที่กำจัด เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันไม่ต่างกันมาก ดังรูปที่ 4.15



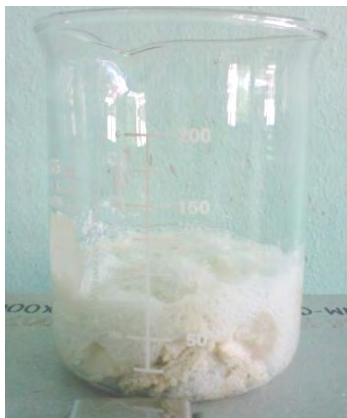
รูปที่ 4.14 ค่าไฟฟ้าที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์



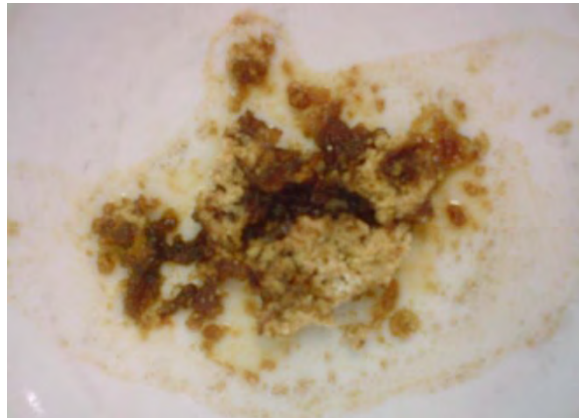
รูปที่ 4.15 ค่าไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

4.2.7 สรุปผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ ข้าวไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

การทดลองการไหลต่อเนื่องเพื่อหาผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรหลายๆตัวแปร เช่น กระแสไฟฟ้า พีเอชที่ออก ปริมาณก๊าซ และอัตราการไหล เพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการกำจัดไขมันและน้ำมันโดยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง คือ การป้อนน้ำเสียด้วยอัตราการไหล 4 ลิตร / ชั่วโมง และใช้กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันของแข็งแขวนลอยสูงเท่ากับร้อยละ 97.58 และ 81.74 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 17.17 มล./นาที่ โดยใช้พลังงานเท่ากับ 2.25 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร และ พีเอช น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเท่ากับ 6.88 นอกจากนี้มีสภาพในการกำจัดเมทานอลและกลีเซอรอลได้ร้อยละ 15.39 และ 6.07 ซึ่งในการเกิด ปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนเท่ากับ 915 มิลลิกรัม/ลิตร และมีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในตะกอนทั้งหมด 0.1515 กรัม/กรัมตะกอน ดังรูปที่ 4.16 (ก) โดยลักษณะตะกอนที่อบแห้งดังรูปที่ 4.16 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา

((ก) คือ ตะกอนที่ยังไม่ได้อบแห้ง (ข) คือ ตะกอนที่อบแห้งแล้วที่อุณหภูมิ 100-103 °C)



รูปที่ 4.17 น้ำเสียก่อน-หลังทำปฏิกิริยา
(อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ พีเอชเข้า 6.00)

จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าซีโอดียังมีค่าสูงอยู่ เนื่องจากในน้ำเสียไบโอดีเซลจะประกอบด้วยกลีเซอรอลและเมทานอลเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีทางเคมีได้

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

พารามิเตอร์	น้ำเสียดิบ	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
ไขมันและน้ำมัน (มก/ล)	610	15	97.58
ซีโอดี (มก/ล)	30,887	25,046	18.91
กลีเซอรอล (มก/ล)	936	879	-
เมทานอล (มก/ล)	14,432	12,210	-
ของแข็งแขวนลอย (มก/ล)	735	120	81.74
พีเอช	5.5	6.88	-
ค่าขั้วไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)		21.27	
ค่าพลังงาน (kW/m ³)		2.25	
ค่าไฟฟ้าในการบำบัด (บาท/ลบ.ม.)		4.50	
ค่าใช้จ่ายในการบำบัดทั้งหมด (บาท/ลบ.ม.)		25.77	

หมายเหตุ อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

4.3 การทดลองที่ 2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียไปโอดีเซลผ่านระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแล้วเดินระบบอย่างต่อเนื่อง โดยการปรับเปลี่ยน อัตราการไหล 3 ค่า ได้แก่ 1 4 และ 6 ลิตร/ชั่วโมง และปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 1 2 และ 3 แอมแปร์ เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์เป็นระยะแล้วนำมาหาประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย ผลการทดลองสรุปดังตารางที่ 4.7 และมีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียโดยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

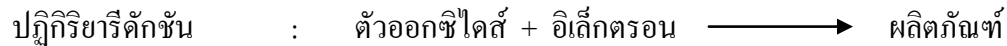
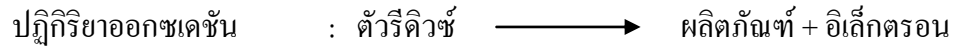
อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความเข้มข้นน้ำออก (มก./ล.)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		
		pH	G&O	COD*	SS*	G&O	COD*	SS*
1	1	6.28	45	25,505	290.55	55.00	11.32	23.53
	2	6.46	35	25,129	283.33	65.00	12.63	27.35
	3	6.35	30	24,514	293.33	70.00	11.85	27.57
4	1	6.06	60	25,585	327.66	40.00	8.00	21.98
	2	6.02	60	31,188	288.00	40.00	8.93	28.88
	3	6.05	30	24,478	349.33	70.00	11.98	13.74
6	1	6.04	75	32,976	150.83	25.00	2.51	52.11
	2	6.03	60	33,828	153.33	40.00	0	48.02
	3	6.01	40	34,946	140.00	60.00	0	48.46

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการเก็บตัวอย่างที่ออกจากระบบ 1 ชั่วโมง

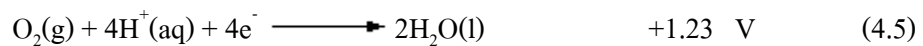
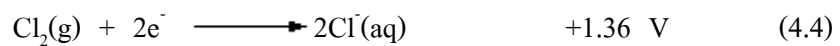
4.3.1 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัด

ในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจะใช้ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์อิเล็กโทรไลติก ปฏิกิริยาในกระบวนการไฟฟ้าเคมีส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลสารและอิเล็กตรอน โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยารีดอกซ์หรือปฏิกิริยาออกซเดชัน-รีดักชัน จะมีสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเรียกสารนี้ว่าเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) หากแบ่งปฏิกิริยารีดอกซ์ออกเป็นสองส่วน จะได้ครึ่งปฏิกิริยา (Half

reaction)สองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการจ่ายอิเล็กตรอน) ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้



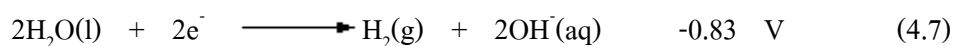
โดยที่ขั้วแอโนดมีไอออนและสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้คือ Cl^- และ H_2O โดยมีปฏิกิริยาครึ่งเซลล์รีดักชันและค่า E° เป็นดังนี้



สารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ดี (ตัวรีดิวซ์ที่ดี) คือสารที่มีค่า E° ต่ำ ปฏิกิริยา (4.4) มีค่า E° ต่ำกว่า H_2O จึงควรให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าแต่ในทางปฏิบัติแล้ว Cl^- ให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าและเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดแก๊สคลอรีนที่ขั้วแอโนดและมี Cl_2 เกิดขึ้นด้วย ดังสมการ

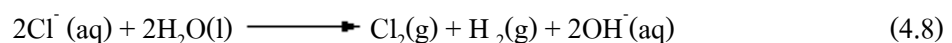


ที่ขั้วแคโทดมีไอออนและสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้คือ H_2O โดยมีปฏิกิริยาครึ่งเซลล์รีดักชันและค่า E° เป็นดังนี้



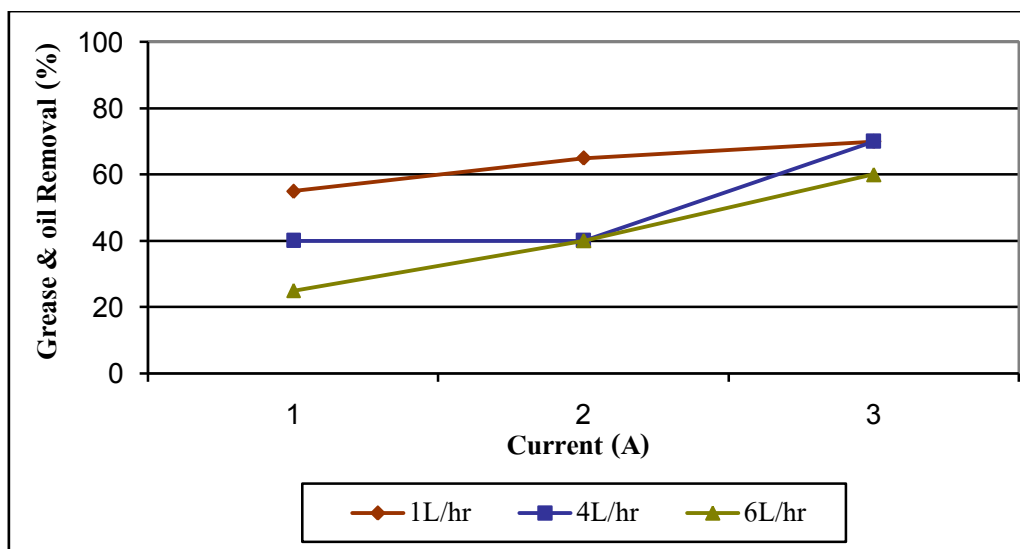
สารที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ดี (ตัวออกซิไดส์ที่ดี) คือสารที่มีค่า E° สูง ปฏิกิริยา (4.7) มีค่า E° สูงที่สุด H_2O จึงสามารถรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด ดังสมการ (4.7)

ปฏิกิริยารวม (สมการ 4.6 + 4.7) คือ



4.3.1.1 การกำจัดไขมันและน้ำมัน

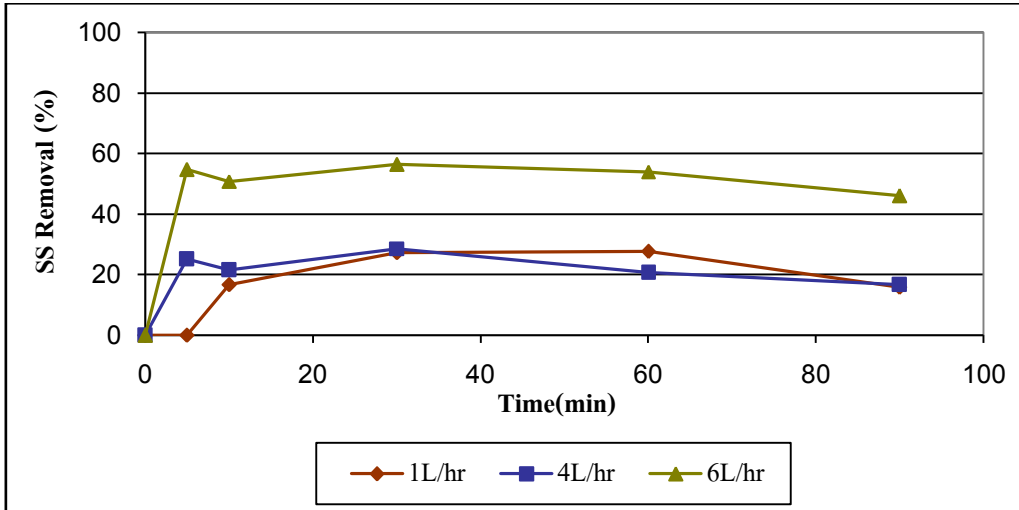
จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.18 เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 1 เป็น 3 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 25 - 55 40 - 65 และ 60 - 80 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นปริมาณ อิเล็กตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซออกซิเจน หรือก๊าซคลอรีน ซึ่ง เป็นการช่วยให้ไขมันและน้ำมันเพิ่มโอกาสการสัมผัสกันรวมกันเป็นเม็ดน้ำมันขนาดใหญ่ลอยสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาและแยกออกจากน้ำเสีย



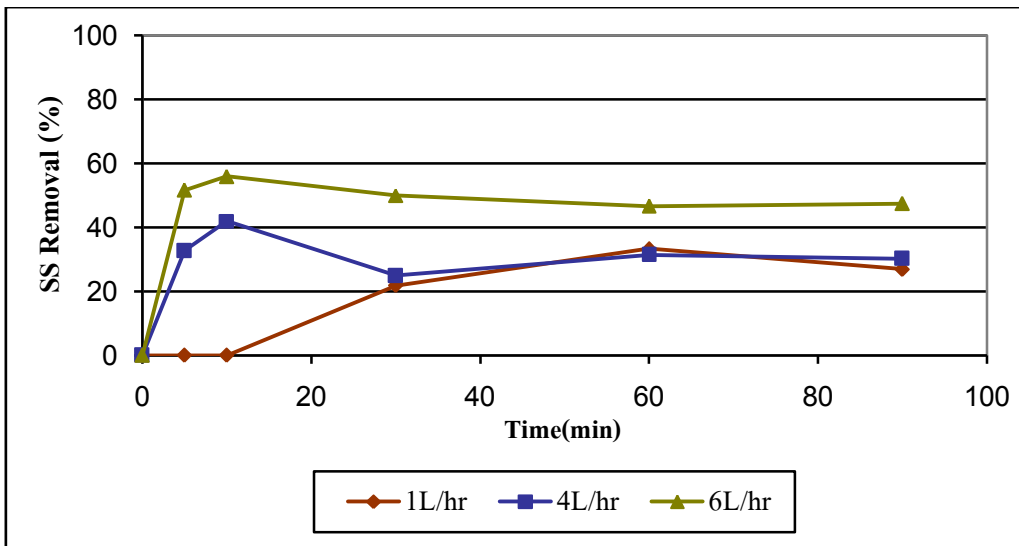
รูปที่ 4.18 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

4.2.1.2 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

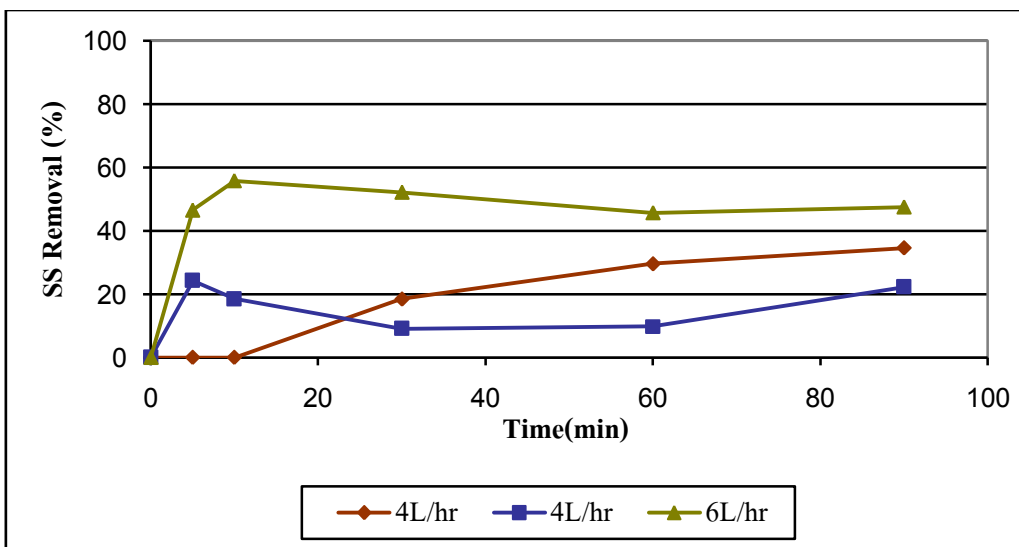
ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัด ของแข็งแขวนลอย มีแนวโน้มรูปแบบการกำจัดทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าใกล้เคียงกันในทุกระดับกระแสไฟฟ้า แต่พบว่าที่อัตราการไหล 6 ลิตร/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดในทุกกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบไม่มีการสร้างสารช่วยตกตะกอนที่ช่วยจับคอลลอยในน้ำเสียให้มีขนาดใหญ่แล้วแยกออกจากน้ำเสียด้านบนของถังปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.19



(ก) 1 แอมแปร์



(ข) 2 แอมแปร์

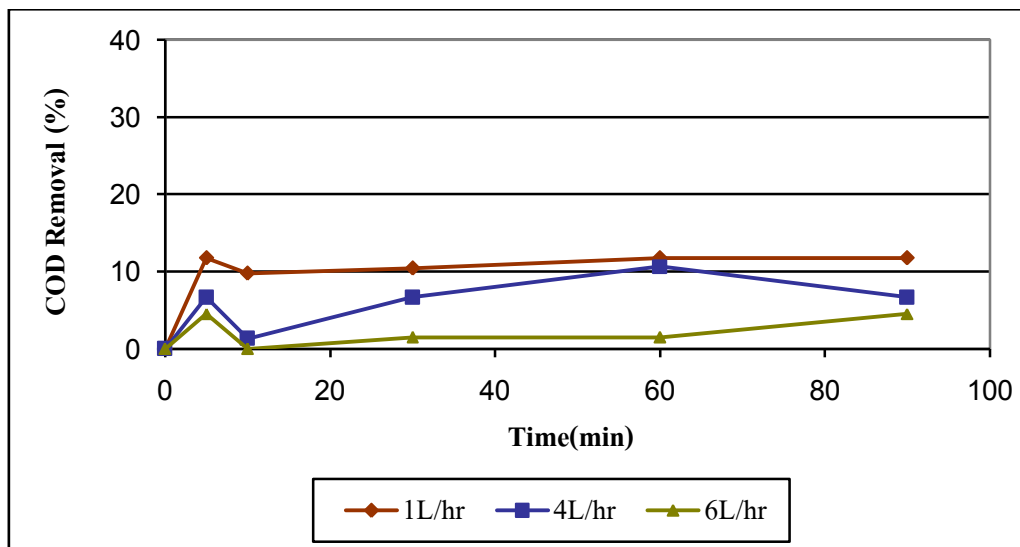


(ค) 3 แอมแปร์

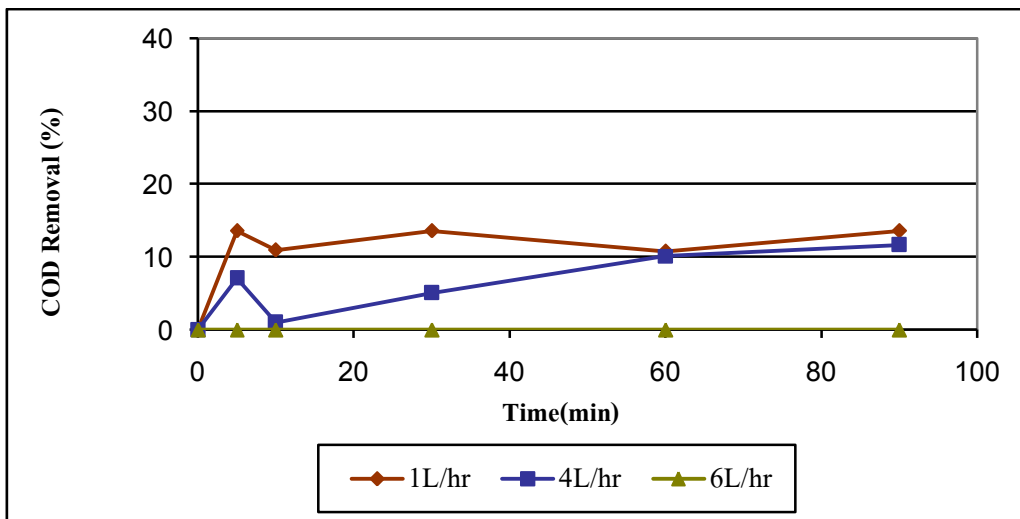
รูปที่ 4.19 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

4.3.1.3 การกำจัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอยู่ระหว่างร้อยละ 6.66 - 15.55 จาก 1 เป็น 3 แอมแปร์ และพบว่าที่อัตราการไหลน้ำเสีย 1 - 4 ลิตร/ชั่วโมง ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกันในทุกกระแสไฟฟ้า ส่วนที่อัตราการไหลน้ำเสีย 6 ลิตร/ชั่วโมง ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำมากที่สุดอาจเนื่องจากน้ำเสียมีระยะเวลาที่เก็บในระบบต่ำ

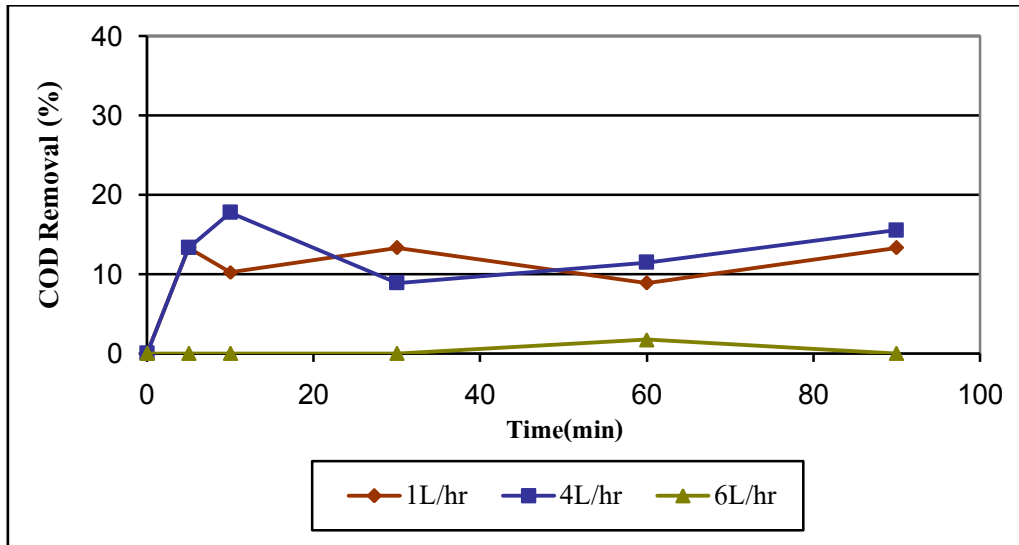


(ก) 1 แอมแปร์



(ข) 2 แอมแปร์

รูปที่ 4.20 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอดีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์



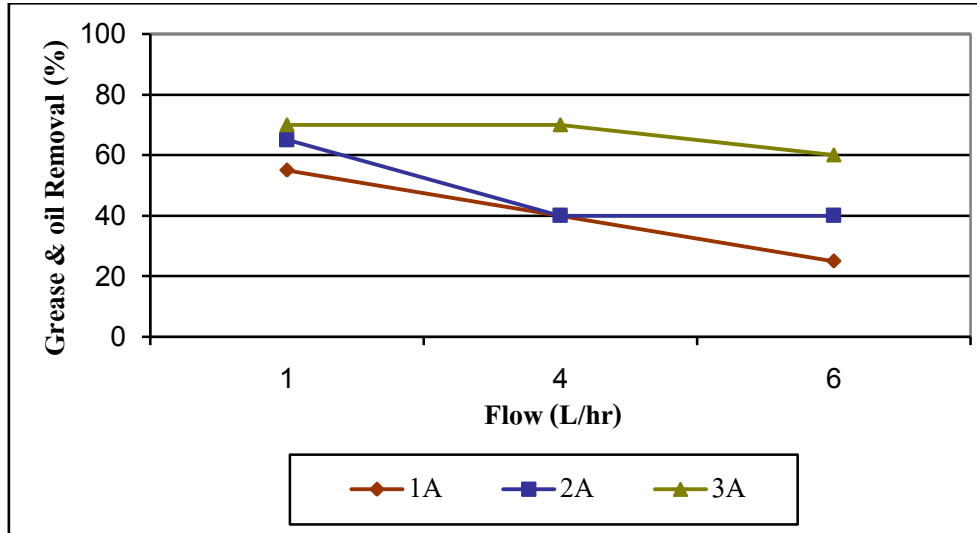
(ค) 3 แอมแปร์

รูปที่ 4.20 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอดีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์(ต่อ)

4.2.2 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

4.2.2.1 การกำจัดไขมันและน้ำมัน

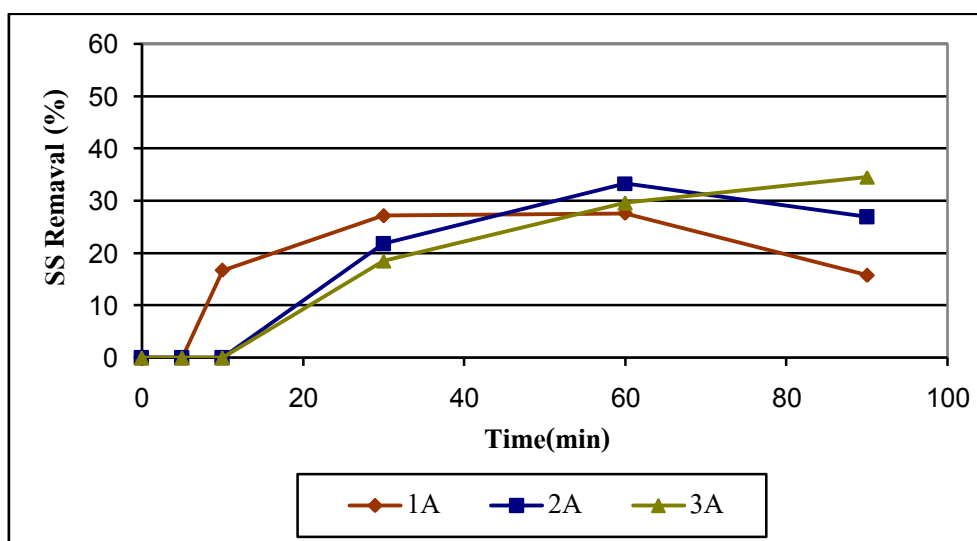
การเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเพิ่มปริมาณไขมันและน้ำมันเข้ามาในระบบและยังเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนทำให้มลพิษเพิ่มโอกาสที่ไขมันและน้ำมันที่เป็นอิมัลชันมีโอกาสชนกันและรวมกลายเป็นเม็ดน้ำมันขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในทางกลับกันหากอัตราการไหลสูงเกินไปอาจมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันลดลงได้ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 1 เป็น 6 ลิตร/ชั่วโมง ที่กระแสไฟฟ้าใดๆมีผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดไขมันและน้ำมันลดลง คือจากร้อยละ 55 - 70 เป็น 25 - 60 ตามลำดับ เนื่องจากไม่มีสารช่วยรวมตะกอนทำให้ต้องใช้เวลามากขึ้นในการทำให้โมเลกุลของไขมันและน้ำมันเกิดการเคลื่อนที่มาสัมผัสกันและรวมกลายเป็นเม็ดน้ำมันขนาดใหญ่ขึ้นแยกชั้นออกจากน้ำเสีย ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลเป็นการลดระยะเวลาทำปฏิกิริยาในถังและการเพิ่มอัตราการไหลยังเป็นการเพิ่มปริมาณไขมันและน้ำมันเข้ามามากขึ้น ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดไขมันและน้ำมัน

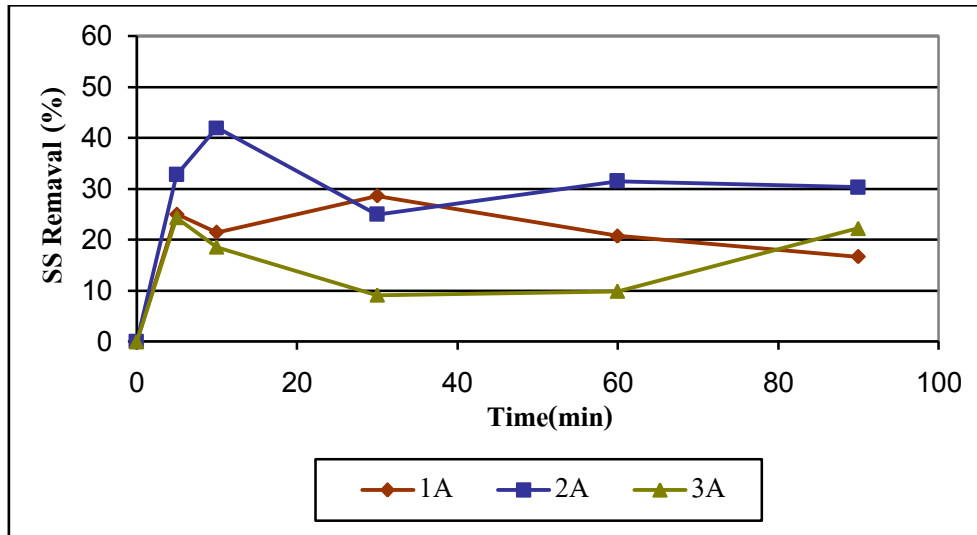
4.3.1.2 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

ผลของการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดไม่แน่นอน จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 1 และ 4 ลิตร/ชั่วโมงมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยไม่คงที่ทุกกระแสไฟฟ้า โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9.13 ถึง 31.48 ดังรูปที่ 6.22 (ก) และ 6.22 (ข) แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 6 ลิตร/ชั่วโมงกลับมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่สูงที่สุดและคงที่ทุกกระแสไฟฟ้า โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 46.03 ถึง 56.34 ดังรูปที่ 6.22 (ค)

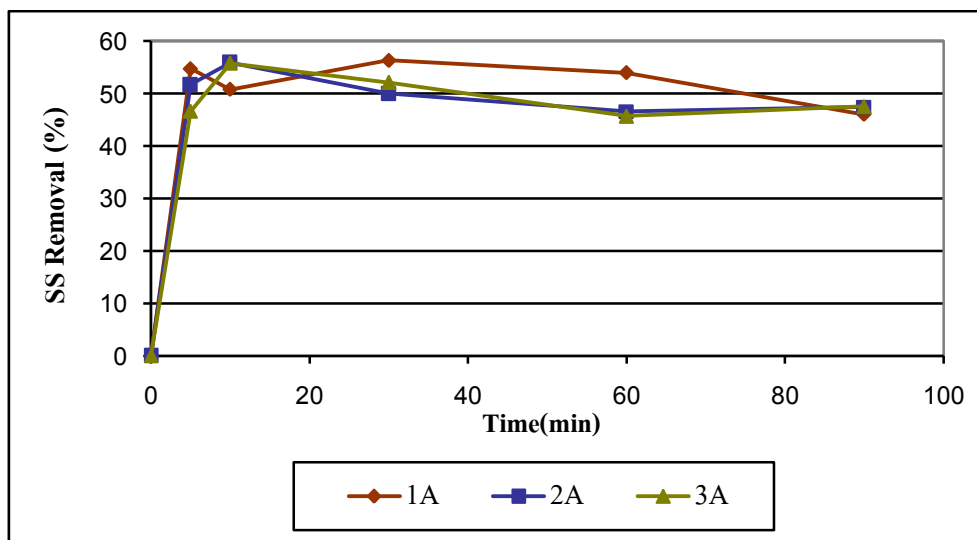


(ก) 1 ลิตร/ชั่วโมง

รูปที่ 4.22 ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์



(ข) 4 ลิตร/ชั่วโมง



(ค) 6 ลิตร/ชั่วโมง

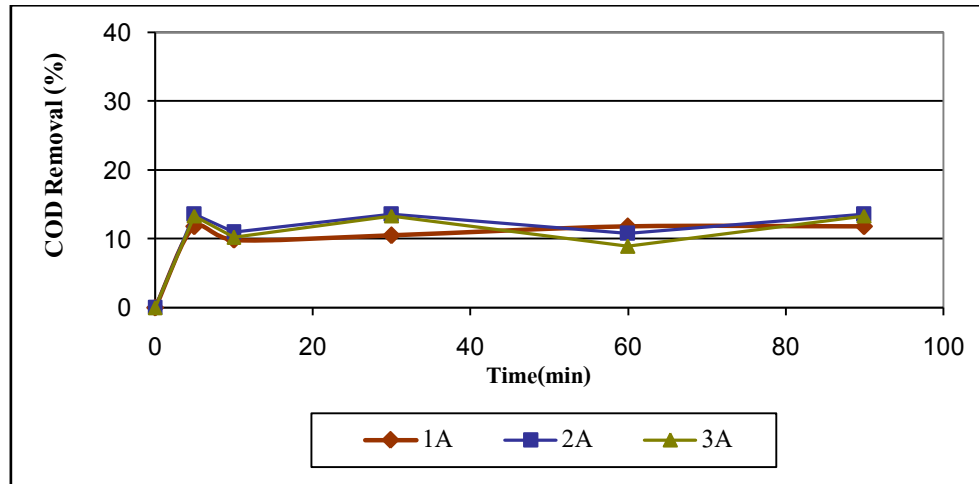
รูปที่ 4.22 ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอย
ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์(ต่อ)

4.3.1.3 การกำจัดซีโอดี

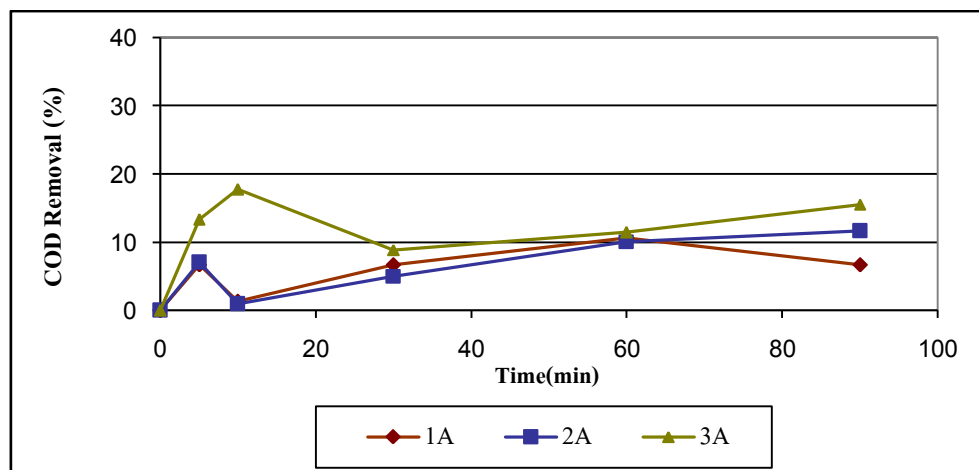
อัตราการไหลของน้ำเสียจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลของ การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียต่อการกำจัด ซีโอดี มีแนวโน้ม ของประสิทธิภาพการกำจัดลดลง เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.23

จากผลการทดลอง พบว่าที่อัตราการไหล 1 ลิตร/ชั่วโมงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุด คืออยู่ในช่วงร้อยละ 8.88 – 13.56 และที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มลดลง โดยที่อัตราการไหล 6 ลิตร/ชั่วโมง ไม่มี

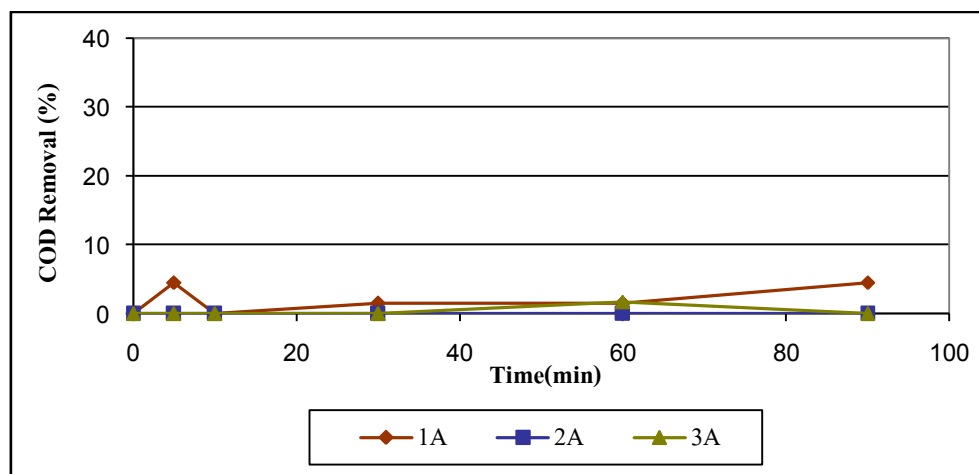
ประสิทธิภาพการกำจัดทุกกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะลดระยะเวลาทำปฏิกิริยาของน้ำเสียในระบบ ทำให้ระบบไม่สามารถผลิตก๊าซคลอรีนได้มากพอที่จะสลายสารอินทรีย์ได้ทัน



(ก) 1 ลิตร/ชั่วโมง



(ข) 4 ลิตร/ชั่วโมง



(ค) 6 ลิตร/ชั่วโมง

รูปที่ 4.23 ผลของอัตราการไหลต่อการกำจัดซีโอดีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

4.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซ

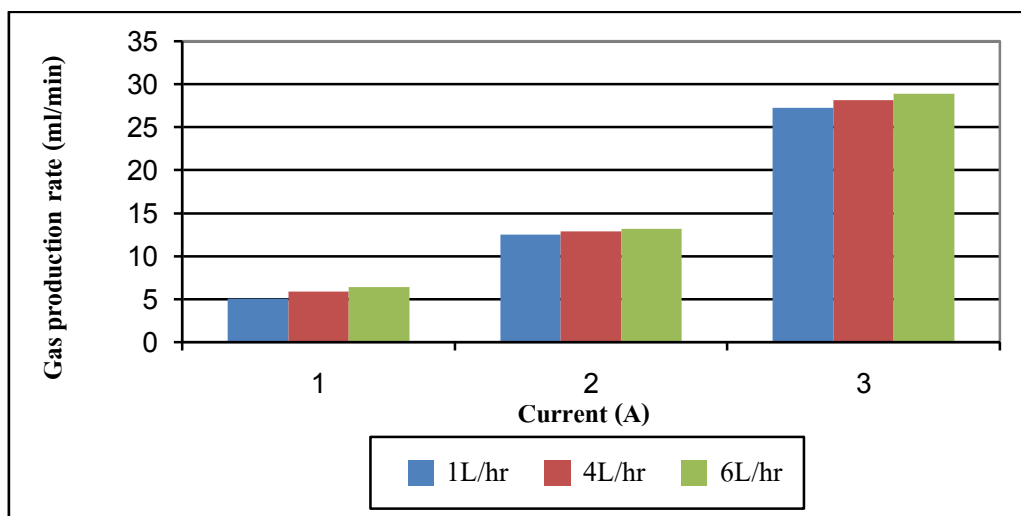
กระบวนการไฟฟ้าเคมีจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่ขั้ว แคโทด และก๊าซออกซิเจนกับก๊าซคลอรีนที่แอโนด ซึ่งจะพาให้คอลลอยซ์ ไนมันและน้ำมันลอยขึ้นด้านบนและแยกออกจากน้ำเสีย โดยการทดลองได้วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8 ดังนี้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองแสดงอัตราการเกิดก๊าซในระบบ

พารามิเตอร์	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
		1	2	3
	1	5.09	12.52	27.27
อัตราการเกิดก๊าซ (มล./นาที)	4	5.86	12.87	28.16
	6	6.41	13.20	28.98

4.3.3.1 กระแสไฟฟ้า

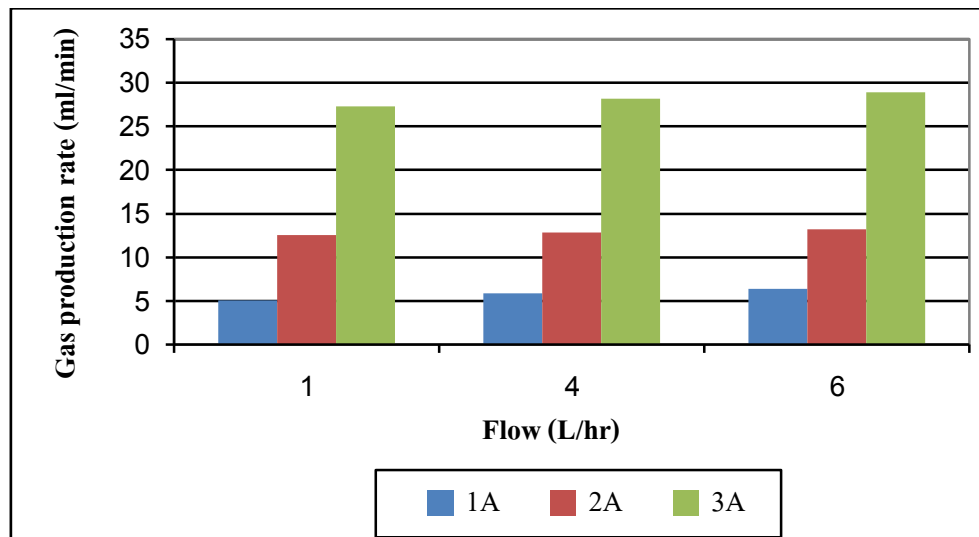
กระแสไฟฟ้าจะมีผลต่ออิเล็กตรอน เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนจะให้น้ำแตกตัวเกิดเป็นก๊าซเพิ่มขึ้น ดังสมการ 4.5 จาก ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า 1 เป็น 3 แอมแปร์ จะเกิดปริมาณก๊าซในระบบเพิ่มมากขึ้น อยู่ในช่วงเท่ากับ 5.09 – 6.41 12.52 – 13.20 และ 27.27 – 28.98 มล./นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ผลของกระแสต่อการเกิดก๊าซที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

4.3.3.2 อัตราการไหล

จากผลการทดลอง อัตราการไหลของน้ำเสียในระบบเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนค่อนข้างคงที่ คือที่ 1 - 3 แอมแปร์ อยู่ในช่วง 5.09 – 6.41 12.52 – 13.20 และ 27.27 – 28.98 มล./นาที่ ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าผลของอัตราการไหลไม่มีส่วนสัมพันธ์กับอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากอิเล็กตรอนจะทำให้ น้ำแตกตัวเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่ขั้วแคโทด และก๊าซออกซิเจนกับก๊าซคลอรีนที่แอโนด การเพิ่มอัตราการไหลหรือระยะเวลาทำปฏิกิริยาไม่ได้เป็นการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนจึงทำให้อัตราการเกิดก๊าซค่อนข้างคงที่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม ดังรูปที่ 4.25



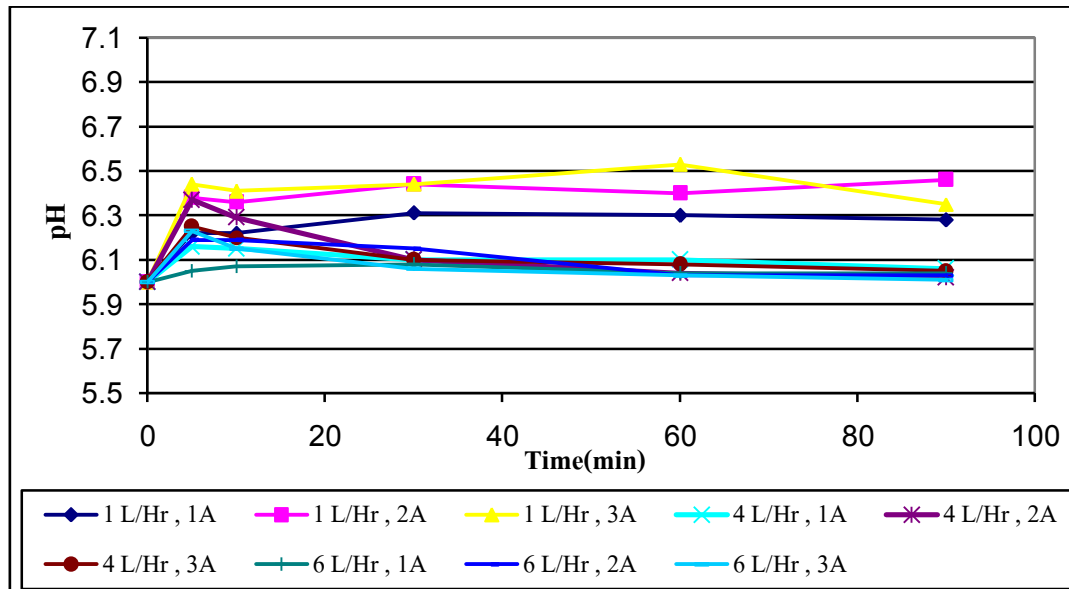
รูปที่ 4.25 ผลของอัตราการไหลต่อการเกิดก๊าซที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

จากสมการ ที่ 4.5 พบว่าอัตราการไหลของน้ำเสียไม่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจมาจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิของระบบที่ทำการทดลองในอุณหภูมิห้อง ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ จึงส่งผลต่อปริมาตรก๊าซที่ได้สูงขึ้น

4.3.4 พิเศษของน้ำที่ออกจากระบบ

ระดับพิเศษของการทดลองค่อนข้างคงที่เนื่องจากที่ จากการทดลองพบว่าเมื่อเริ่มต้น พิเศษน้ำเสียเท่ากับ 6 น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 6.01 ถึง 6.46 ดังรูปที่ 4.26 จะเห็นได้

ว่าระดับพีเอชของการทดลองค่อนข้างคงที่เนื่องจากที่แคโทดน้ำจะ รั่วอิเล็กตรอนทำให้เกิด ก๊าซไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน แต่ที่ขั้วแอโนดน้ำจะจ่าย อิเล็กตรอนทำให้เกิด ก๊าซออกซิเจน และไฮโดรเจนไอออน ซึ่งไฮโดรเจนไอออนจะไปทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน กลายเป็นน้ำ ทำให้ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของพีเอช



รูปที่ 4.26 ระดับพีเอชกับช่วงเวลาเก็บน้ำที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

4.3.5 น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สลายตัวไปหลังการทดลอง

จากทฤษฎีของกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเฉื่อย (แกรไฟต์) ขั้วจะไม่ละลายลงสู่น้ำเสีย แต่จากผลการทดลองที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด (ใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นแกรไฟต์) พบว่ามีการลดลงของขั้วไฟฟ้าเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.9 เมื่อคือน้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ลดลงในหน่วย กรัม/ลูกบาศก์เมตร การเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเป็นการลดระยะเวลาทำปฏิกิริยาทำให้น้ำหนักขั้วที่ใช้ลดลง ที่การกำจัดไขมันและน้ำมัน และประหยัดขั้วไฟฟ้าที่ดีที่สุด คือ อัตราการไหลที่ 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ใช้ขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 48.25 กรัม/ ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าขั้วไฟฟ้า 0.579 บาท/ลบ.ม. ดังรูปที่ 4.27

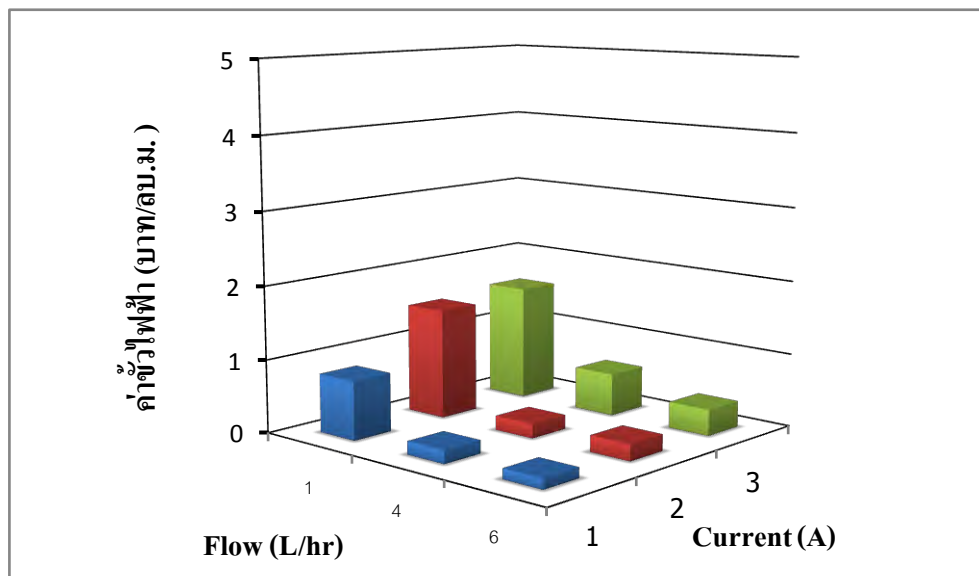
ตารางที่ 4.9 น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สลายตัวและค่าขั้วไฟฟ้า

อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	G&O ที่ถูกกำจัด (มก./ล.)	น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ใช้ (กรัม/ชั่วโมง)	น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่เหลือ (กรัม/ลบ.ม.)	ค่าขั้วไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)	ค่าขั้วไฟฟ้า (บาท/กิโลกรัม ไขมัน และน้ำมัน)
1	1	55.00	0.067	67	0.804	14.61
	2	65.00	0.125	125	1.500	23.07
	3	70.00	0.131	131	1.574	22.40
4	1	40.00	0.062	15.5	0.180	4.50
	2	40.00	0.065	16.25	0.195	4.87
	3	70.00	0.193	48.25	0.579	8.27
6	1	25.00	0.071	11.8	0.141	5.64
	2	40.00	0.113	18.83	0.225	5.62
	3	60.00	0.178	29.67	0.356	5.93

หมายเหตุ ราคาแท่งแกรไฟต์ 12

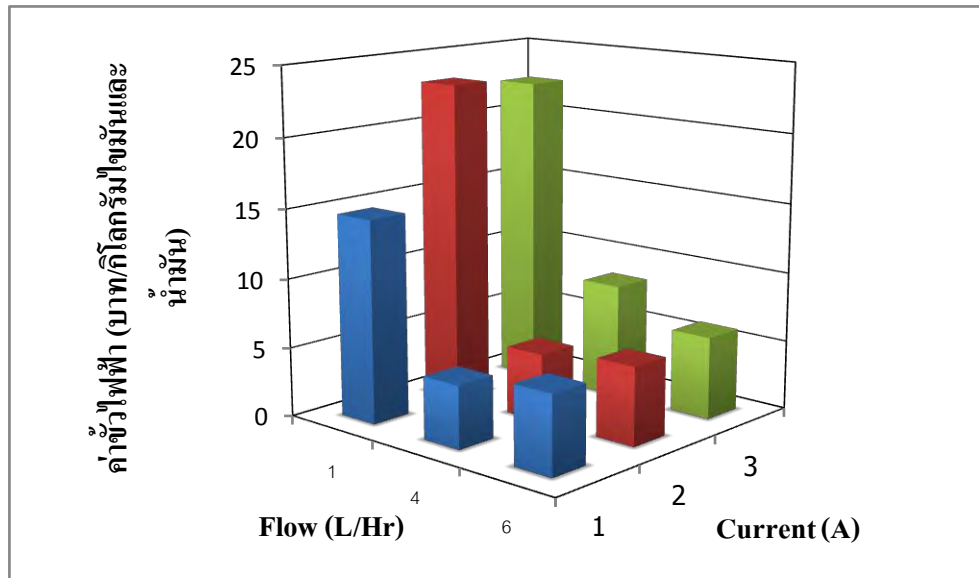
บาท/กิโลกรัม

ที่มา : โดยการสอบถามจาก บ. สุทธิ ยูไนเต็ด คาร์บอน



รูปที่ 4.27 ค่าขั้วไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

แต่เมื่อคิดผลของค่าขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันมีหน่วยบาท/กิโลกรัมไขมันและน้ำมันที่กำลังกำจัด พบว่า ที่อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ใช้ค่าไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 4.50 บาท/กิโลกรัมไขมันและน้ำมันที่กำลังกำจัด เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันไม่ต่างกันมาก ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ค่าไฟฟ้าต่อการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ใช้ไฟฟ้าแอมป์-แอมป์

4.3.6 พลังงานที่ใช้ในการทดลอง

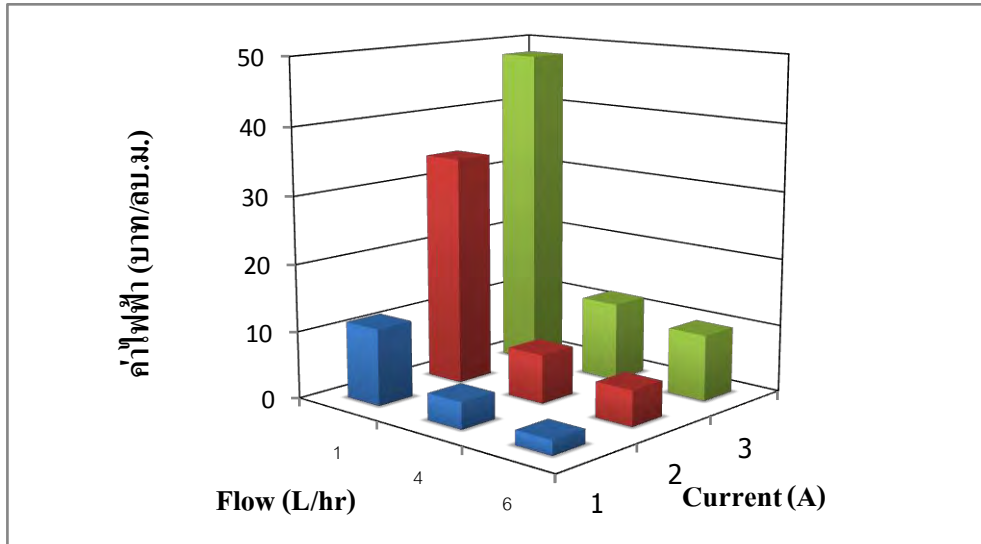
ตารางที่ 4.10 ผลของค่าพลังงานและค่าไฟฟ้า

อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้า (แอมป์)	G&O ที่ถูกกำจัด (มก./ล.)	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ค่าพลังงาน (kW-hr/m ³)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)	ค่าไฟฟ้า (บาท/กิโลกรัมไขมันและน้ำมัน)
1	1	55.00	5.7	5.7	11.40	207.27
	2	65.00	8.5	17	34.00	523.07
	3	70.00	8.0	24	48.00	685.71
4	1	40.00	7.9	1.97	3.94	98.5
	2	40.00	7.2	3.6	7.20	180.00
	3	70.00	7.8	5.85	11.70	167.12
6	1	25.00	6.5	1.08	2.16	86.40
	2	40.00	7.9	2.63	5.26	131.50
	3	60.00	9.8	4.9	9.80	163.33

หมายเหตุ ค่าไฟฟ้า = 2 บาท/หน่วย

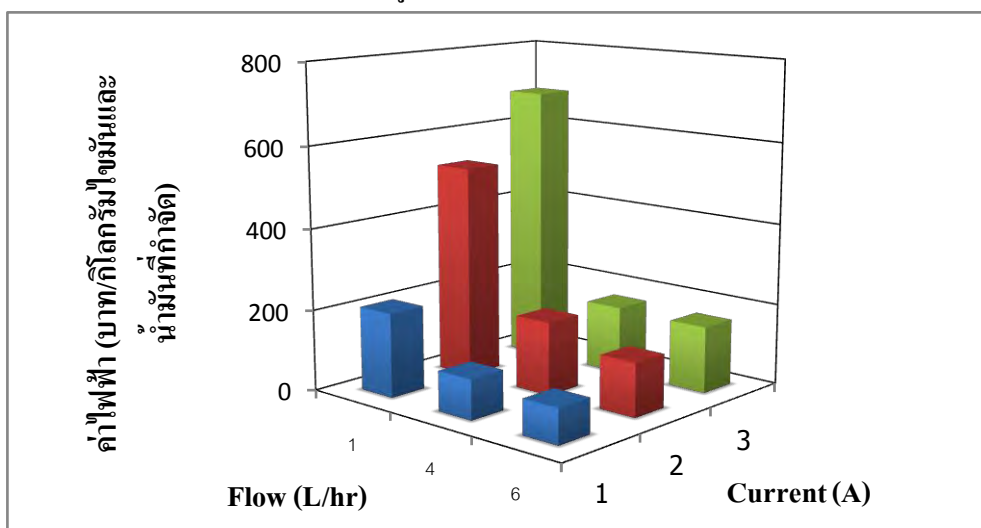
พลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาควบคุมกระแสไฟฟ้า 1 2 และ 3 แอมป์ เวลาทำปฏิกิริยา 15 22.5 และ 90 นาที ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด ไขมันและน้ำมัน มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร โดยหาได้จากสมการ (4.4) ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.10 เมื่อ

อัตราการไหลเพิ่มขึ้นการใช้พลังงานก็จะน้อยลง เนื่องจากอัตราการไหลจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นในการกำจัด ไชมันและน้ำมันที่ดีที่สุดและค่าไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ อัตราการไหลที่ 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 5.85 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 11.70 บาท/ลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ค่าไฟฟ้าที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

แต่เมื่อคิดผลของค่าใช้จ่ายต่อประสิทธิภาพการกำจัด ไชมันและน้ำมันมีหน่วย บาท/กิโลกรัม ไชมันและน้ำมันที่กำจัด พบว่า ที่อัตราการไหล 6 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ใช้ค่าไฟฟ้าน้อยที่สุด เท่ากับ 86.40 บาท/กิโลกรัม ไชมันและน้ำมันที่กำจัด เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัด ไชมันและน้ำมันไม่ต่างกันมาก ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ค่าไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัด ไชมันและน้ำมันที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

4.3.7 สรุปผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

การทดลองการไหลต่อเนื่องเพื่อหาผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรหลายๆตัวแปร เช่น กระแสไฟฟ้า พีเอชที่ออก ปริมาณก๊าซ และอัตราการไหล เพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการกำจัดไขมันและน้ำมันโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้า พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของแข็งแขวนลอยได้เล็กน้อยและไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี สภาวะที่ดีที่สุดของการทดลอง คือ การป้อนน้ำเสียด้วยอัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง และให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมัน สูงเท่ากับร้อยละ 70 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดี ต่ำเท่ากับร้อยละ 13.74 และ 11.98 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 28.16 มิลลิลิตร/นาท โดยใช้เวลาเท่ากับ 5.85 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร และ pH น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเท่ากับ 6.06 ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สรุปผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์

พารามิเตอร์	น้ำเสียดิบ	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
ไขมันและน้ำมัน (มก/ล)	100	30	70
ซีโอดี (มก/ล)	27,810	24,478	11.98
กลีเซอรอล (มก/ล)	-	-	-
เมทานอล (มก/ล)	-	-	-
ของแข็งแขวนลอย (มก/ล)	405	350	13.74
พีเอช	5.8	6.06	-
ค่าขั้วไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)	0.57		
ค่าพลังงาน (kW/m ³)	5.85		
ค่าไฟฟ้าในการบำบัด (บาท/ลบ.ม.)	11.70		
ค่าใช้จ่ายในการบำบัดทั้งหมด (บาท/ลบ.ม.)	12.28		

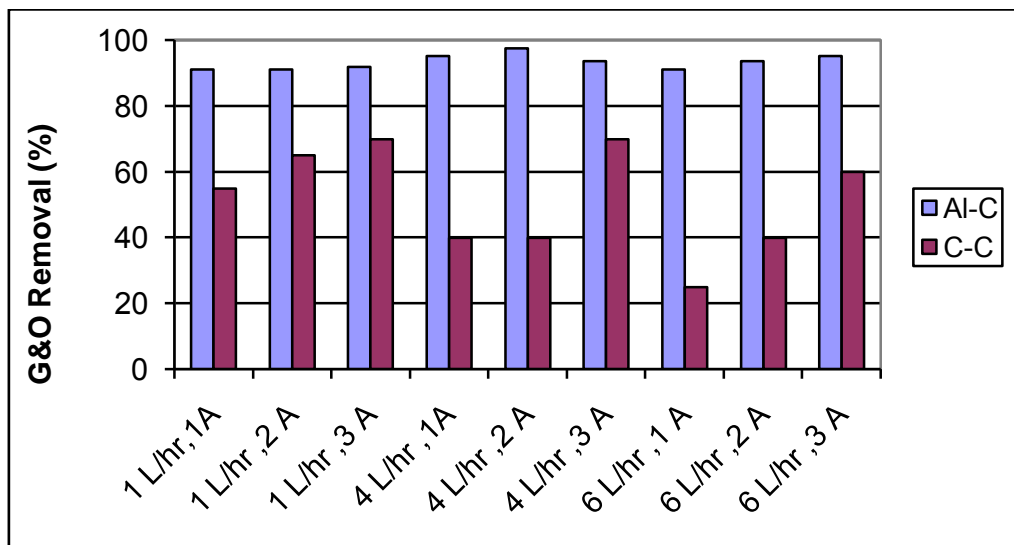
หมายเหตุ อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

4.4 การเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

4.4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด

ก) ไขมันและน้ำมัน

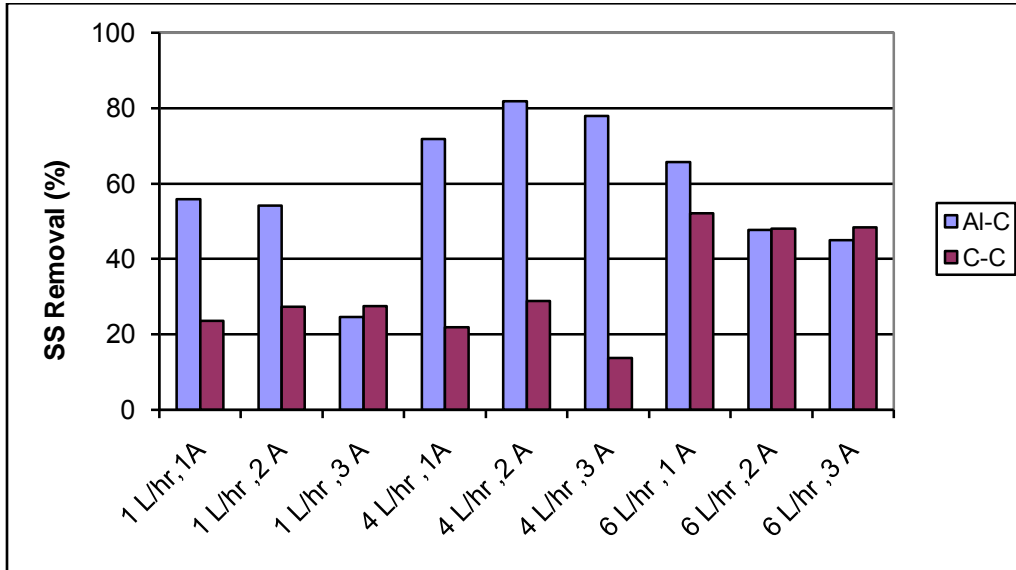
จากรูปที่ 4.31 แสดงประสิทธิภาพการกำจัด ไขมันและน้ำมันของขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด คือ อะลูมิเนียม-แกรไฟต์และแกรไฟต์-แกรไฟต์ พบว่าการ ใช้ขั้วไฟฟ้าเป็น อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ มีประสิทธิภาพการกำจัด ไขมันและน้ำมันมากกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าเป็น แกรไฟต์-แกรไฟต์ ในทุกการทดลอง ดังรูปที่ 4.31 เนื่องจาก $Al(OH)_3$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นอะลูมิเนียม-แกรไฟต์จะมีคุณสมบัติเป็นสารรวมตะกอน ซึ่งสารเหล่านี้จะรวมตัวกับไขมันและน้ำมันในน้ำ และตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสีย



รูปที่ 4.31 ผลของขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมัน

ข) ของแข็งแขวนลอย

จากการทดลองใช้ขั้วไฟฟ้าเป็น อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าเป็น แกรไฟต์-แกรไฟต์ ทุกกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหล 1-4 ลิตร/ชั่วโมง ส่วนที่อัตราการไหล 6 ลิตร/ชั่วโมงมีประสิทธิภาพการกำจัดพอๆกัน ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ผลของขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย

ค) ซีโอดี

จากการทดลองพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดค่าทั้งขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด คือ อะลูมิเนียม-แกรไฟต์และแกรไฟต์-แกรไฟต์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของน้ำเสียเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ ซึ่งไม่สามารถแยกจากน้ำเสียโดยระบบรวมตะกอนทางเคมีหรือการทำให้ลอยด้วยฟองก๊าซประกอบกับไขมันและน้ำมันที่สามารถแยกได้จากน้ำเสียโดยระบบรวมตะกอนทางเคมีมีปริมาณน้อยมาก (610 มก./ล.) เมื่อเทียบกับค่าซีโอดี (32,724 มก./ล.) จึงได้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.33 ผลของขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ศึกษาผลของชนิดขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันจากน้ำเสียไบโอดีเซลด้วยการระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์

5.1.1.2 ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม-แกรไฟต์

กระแสไฟฟ้า เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเพิ่มสูง ขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่าปริมาณขั้วโลหะที่ละลายในสารละลายนำ ไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับปริมาณกระแส ไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่ามากจะส่งผลให้มีขั้วโลหะละลายสู่น้ำ ตัวอย่างมากทำให้มีสารก่อการ จับตัวมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนทำให้มลพิษเพิ่มโอกาสที่ จะไปจับกับสารช่วยตกตะกอนแยกออกมาจากน้ำเสียได้ดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย แต่ในทางกลับกันหากอัตราการไหลสูงเกินไปอาจมีผลทำให้ ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันลดลงได้ เนื่องจากอัตราการไหลสูงมีผลให้ปริมาณไขมันและน้ำมันที่เข้าระบบสูงขึ้น ดังนั้นสถานะที่เหมาะสมของการทดลอง คือ การป้อนน้ำเสียด้วยอัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง และให้กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันของแข็งแขวนลอยสูงเท่ากับร้อยละ 97.58 และ 81.74 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 17.71 มิลลิลิตร/นาที่ โดยใช้พลังงานเท่ากับ 2.25 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร และ พีเอช น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเท่ากับ 6.88 นอกจากนี้น้ำจะมีของแข็งแขวนลอยน้อย และมีไขมันและน้ำมันต่ำ ซึ่งไม่เป็นอุปสรรคต่อการบำบัดด้วยระบบทางชีวภาพต่อไป

5.1.1.2 ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์

กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นปริมาณอิเล็กตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ทำให้ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซคลอรีน ซึ่งเป็นการช่วยให้ไขมันและน้ำมันเพิ่ม โอกาส

การสัมผัสกันรวมกันเป็นเมื่อน้ำมันขนาดใหญ่ลอยสู่ด้านบนของถังปฏิบัติการแยกออกจากน้ำ เสีย และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันลดลงเนื่องจากไม่มีสารช่วยรวม ตะกอนทำให้ต้องใช้เวลามากขึ้นในการทำให้โมเลกุลของไขมันและน้ำมันเกิดการเคลื่อนที่มา สัมผัสกัน ดังนั้น สถานะที่ดีที่สุดของการทดลอง คือ การป้อนน้ำเสียด้วยอัตราการไหล 4 ลิตร / ชั่วโมง และให้ กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ โดยมี ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมัน สูง เท่ากับร้อยละ 70 และมีประสิทธิภาพในการกำจัด ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี ค่า เท่ากับร้อยละ 13.74 และ 11.98 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ เท่ากับ 28.16 มิลลิลิตร/นาที่ โดยใช้พลังงานเท่ากับ 5.85 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร และ พีเอช น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเท่ากับ 6.06

5.1.2 สถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วย ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบโมนโพลาร์หลายเซลล์

ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า คือ ขั้วแบบ AI-C ป้อนน้ำเสียด้วยอัตราการไหล 4 ลิตร / ชั่วโมง และให้ กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันของแข็งแขวนลอยสูงเท่ากับร้อยละ 97.58 และ 81.74 ตามลำดับ

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถใช้เป็น กระบวนการบำบัดขั้นต้นในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลได้ เนื่องจากสามารถช่วยลดพิกัด สารแขวนลอย ไขมันและน้ำมันต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียที่เป็นอุปสรรคต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและขั้นตอนการบำบัดต่อจากนี้ ควรเป็นระบบบำบัดแบบชีวภาพ เพื่อทำการย่อยสลายพวกเมทานอลและกลีเซอรอลที่เหลืออยู่ให้หมดไป ซึ่งระบบบำบัดทางเคมีไม่สามารถทำการกำจัดให้หมดไปได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) น้ำที่ผ่านระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีค่าไขมันและน้ำมันลดลง แต่ค่าซีโอดียังเกิน มาตรฐานอยู่จึงน่าจะมีระบบบำบัดซีโอดีต่อจากกระบวนการนี้ เช่น การบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน

- 2) ควรนำผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียไปโอติเซลเบื้องต้นนี้ไปขยายผลเพื่อทำการทดสอบในระบบจริง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ กระแสไฟฟ้า ระยะเวลาทำปฏิกิริยา พีเอชในระบบ
- 3) ควรมีระบบกวดตะกอนด้านบนของถังปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณของแข็งแขวนลอยหลุดออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย
- 4) ควรมีการศึกษาต่อเรื่องก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการทดลองว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำไปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้หรือไม่

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. เล่ม 2 พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์.
- บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน). 2552. ไบโอดีเซล [online]. Available from: <http://www.bangchak.co.th/th/energyDetail.asp?id=14>. [2009, June 18].
- ปรีเมธ เจริญพคุณ . 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- ปัทมภัทร เจริญสาคร. 2549. การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต . ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัชรินทร์ ภูแหม่มโชติและสุรรัตน์ เกษมศรี. 2550. การสกัดน้ำมันคั่วและคาร์บอนฟูสสภาพดินภูเขาไฟที่ผ่านการใช้งานแล้วในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ _____ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,กรม. 2549. โครงการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลในกทม. และเชียงใหม่ (เฟส 2) (ที่ปรึกษาเพื่อออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียพร้อมอุปกรณ์ประกอบ). กรุงเทพมหานคร.
- พลังงาน,กระทรวง. 2550. ไบโอดีเซล [online]. Available from: <http://www.energy.go.th/th/forumDetail.asp?topicID=106&page=3&keyword> [2007, June 4].
- วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์. 2546. การกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศรายุทธ ลาภพูนผล. 2549. การกำจัดโครเมียมโดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุจินันท์ ยิ้มคมขำ. 2549. ไบโอดีเซล. บทความเผยแพร่ ฉบับที่ 04/49 . [online] . Available from: <http://www.scimetrolgy.com/Uploads/04biode.pdf> . [2007, July 20].

อัญชลี ศรีรังสรรค์. 2551. การบำบัดน้ำเสียไมโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.
 วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิตศึกษาด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Abdelwahab, O., Amin, N.K. and El-Ashtouky, E-S.Z. 2009. Electrochemical removal phenol from oil refinery wastewater. Journal of Hazardous Materials. 163: 711-716.
- Al-Shamrania, A.A., Jamesa, A., and Xiaob, H., 2002. Destabilisation of Oil–Water Emulsions and Separation by Dissolved Air Flotation. Water Research. 36: 1503-1512.
- Bensadok, K., Bennammar, S., Lopicque, F., and Nezzal, G. 2007. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. Journal of Hazardous Materials. 152: 423-430.
- Bioener G Ltd. 2007. Biodiesel Production Overview [Online], *Available in:*
http://www.bioenerg.co.uk/zn_file/biodiesel-production-overview.pdf. [5 สิงหาคม 2551]
- Canizares, P., Martinez, F., Jimenez, C., Saez, C., and Rodrigo, M.A. 2007. Coagulation and electrocoagulation of oil-in-water emulsions. Journal of Hazardous Materials. 151: 44-51.
- Chen, G. 2004. Electrocoagulation technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38: 11-44.
- Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., and Djafarzadeh, N., 2006. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameters. Journal of Hazardous Materials. 129: 116-122.
- Emamjomeh, M.M., and Sivakumar, M. 2008. Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. Journal of environmental management. 90:1204-1212.
- Fouad, Y.O.A., Konsowa, A.H., Farag, H.A., and Sedahmed, G.H. 2008. Performance of an electrocoagulation cell with horizontally oriented electrodes in oil separation compared to a cell with vertical electrodes. Chemical Engineering Journal. 145:436-440
- Friedrich, H., 1962. Ion Exchange. New York: McGraw-Hill.

- Hu, C.Y., Lo, S.L., Kuan, W.H. and Lee, Y.D. 2005. Removal of fluoride from semiconductor wastewater by electrocoagulation–flotation . Water Research. 35 :895-901
- Israilides, C.J., Vlyssides, A.G., Mourafeti, V.N. and Karvouni, G. 1997. Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system . Bioresource Technology. 61:163-170
- Kannan, N., Karthikeyan, G. and Tamilselvan, N. 2006. Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca catechu nut carbon. Journal of Hazardous Materials. B137: 1803-1809.
- Kobya, M., Can, O.T. and Bayrumoglu, M. 2003. Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. Journal of Hazardous Materials. B100: 189-199.
- Larue, O., and Vorobiev, E., 2003. Floc size estimation in iron induced electrocoagulation and coagulation using sedimentation data. International Journal of Mineral Processing. 71: 1-15.
- Mohamed T., and Nadji M.M., 2008. Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method . Journal of Hazardous Materials 158 : 107-115.
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmes, M., Parga, J. and Cocke, D.L. 2004. Fundamentals present and future perspective of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. B114: 189-199.
- Murugananthan, M., Raju, G.B., and Prabhakar, S., 2004. Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. 109: 37-44.
- Raghu, S. and Basha, C.A. 2007. Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. Journal of Hazardous Materials. 149: 324-330.
- Saatci, Y., Hasar, H., and Cici, M., 2001. Treatability of vegetable oil industry effluents through physical-chemical methods. Fresenius Environmental Bulletin. 10: 854-858.
- Suehara, K., Kawamoto, Y., Fujii, E., Kohda, J., Nakano, Y., and Yano, T., 2005. Biological treatment of wastewater discharged from biodiesel fuel production plant with alkali-catalyzed transesterification. Journal of Bioscience and Bioengineering. 100: 437-442.

- Tezcan, U., Koparal, A.S., and Ogutveren, U.B. 2007. Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes. Journal of Environmental Management. 90:428-433.
- Tir, M. and Mostefa, N.M. 2008. Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method . Journal of Hazardous Materials 158 : 107-115.
- Yousef, M. and Schennach, R. 2000. Electrocoagulation (EC)-science and applications. Journal of Hazardous Materials. 84: 29-41.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์

ขั้วไฟฟ้า (แอนโนด-แคโทด)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ช่วงเวลาเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	pH	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Grease and Oil (mg/l)	อัตราการเกิด ก๊าซ (วินาที/115 มล.)	น้ำหนักขี้ (กรัม)	
											แอนโนด	แคโทด
Al - C	1	1	0	6	31.9	4.5	31,440	425	610	0	100.4708	106.5371
	1	1	5	6.59	31.9	4.2	28,031	1960	-	-	-	-
	1	1	10	6.78	31.9	4.1	29,167	195	-	-	-	-
	1	1	30	7.3	31.9	3.9	28,031	186.67	-	15.68	-	-
	1	1	60	8.49	31.9	3.7	29,546	192.5	-	14.96	-	-
	1	1	90	8.62	31.9	3.7	29,127	230	55	16.04	99.9113	107.0566
	1	1	เฉลี่ย	7.55	31.9	3.92	28,780	552.83	55	15.56	99.9113	107.0566
	1	4	0	6	32	3.6	30,579	425	610	0	96.8518	106.7122
	1	4	5	6.34	32	3.5	28,428	223.33	-	-	-	-
	1	4	10	6.63	32	3.4	27,813	130	-	-	-	-
	1	4	30	6.88	32	3.2	29,043	132.5	-	15.02	-	-
	1	4	60	6.94	32	3.2	26,922	140	-	15.96	-	-
	1	4	90	6.98	32	3.2	27,813	120	30	16.06	96.2239	106.4350
	1	4	เฉลี่ย	6.75	32	3.3	28,003	149.16	30	15.68	96.2239	106.4350
	1	6	0	6	31.6	3.6	30,887	735	610	0	92.8009	106.4584
	1	6	5	6.18	31.6	3.5	30,769	297.5	-	-	-	-

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ (ต่อ)

ขั้วไฟฟ้า (แอโนด-แคโทด)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ช่วงเวลาเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	pH	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Grease and Oil (mg/l)	อัตราการเกิด ก๊าซ (วินาที/115 มล.)	น้ำหนักขี้ (กรัม)	
											แอโนด	แคโทด
Al - C	1	6	10	6.21	31.6	3.5	31,348	265	-	-	-	-
	1	6	30	6.33	31.6	3.3	29,965	235	-	17.63	-	-
	1	6	60	6.42	31.6	3.2	30,333	265	-	17.28	-	-
	1	6	90	6.46	31.6	3.2	29,504	257.5	55	17.28	92.1564	106.4584
	1	6	เฉลี่ย	6.32	31.6	3.34	30,383	264	55	17.42	92.1564	106.4584
	2	1	0	6	32.4	6.1	34,178	425	610	0	99.9113	107.0566
	2	1	5	6.79	32.4	6.0	27,750	155	-	-	-	-
	2	1	10	7.45	32.4	5.8	33,375	150	-	7.56	-	-
	2	1	30	8.66	32.4	5.5	27,750	112.5	-	-	-	-
	2	1	60	8.73	32.4	5.3	30,750	222.5	-	6.95	-	-
	2	1	90	8.62	32.4	5.3	32,250	195	55	6.82	98.0944	106.3821
	2	1	เฉลี่ย	8.05	32.4	5.58	30,375	167	55	7.11	98.0944	106.3821
	2	4	0	6	32	6.4	30,887	735	610	0	96.2239	106.4350
	2	4	5	6.16	32	6.0	25,875	150	-	-	-	-
	2	4	10	6.12	32	5.8	27,750	130	-	6.55	-	-
	2	4	30	6.69	32	5.5	27,750	142.5	-	-	-	-

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ (ต่อ)

ขั้วไฟฟ้า (แอโนด-แคโทด)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ช่วงเวลาเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	pH	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Grease and Oil (mg/l)	อัตราการเกิด ก๊าซ (วินาที/115 มล.)	น้ำหนักขี้ (กรัม)	
											แอโนด	แคโทด
Al - C	2	4	60	6.77	34	5.0	25,875	105	-	6.22	-	-
	2	4	90	6.88	34	4.5	24,000	110	15	6.7	94.9477	106.5165
	2	4	เฉลี่ย	6.52	32.8	5.96	26,250	127.5	15	6.49	94.9477	106.5165
	2	6	0	6	31.5	5.9	31,997.33	430	610	0	92.1564	106.4584
	2	6	5	6.5	31.5	5.4	29,196.67	197.5	-	-	-	-
	2	6	10	6.61	31.5	5.1	28,582	205	-	7.02	-	-
	2	6	30	6.91	31.5	5.0	27,967.33	215	-	-	-	-
	2	6	60	6.93	31.5	4.8	29,196.67	210	-	6.22	-	-
	2	6	90	7.06	31.5	4.7	28,305.33	250	40	7.55	90.9595	106.4637
	2	6	เฉลี่ย	6.80	31.5	5	28,649	215.5	40	6.93	90.9595	106.4637
	3	1	0	6.59	32.6	9.3	34,178	425	610	0	98.0944	106.3821
	3	1	5	6.78	32.6	9.1	25,500	95	-	5.06	-	-
	3	1	10	7.3	32.6	8.9	27,750	205	-	4.87	-	-
	3	1	30	8.49	35	8.7	24,000	410	-	4.13	-	-
	3	1	60	8.56	39	8.7	27,750	320	-	4.25	-	-
	3	1	90	6.59	39.5	8.7	25,500	350	50	5.07	96.8518	106.7122

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ (ต่อ)

ขั้วไฟฟ้า (แอนโนด-แคโทด)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ช่วงเวลาเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	pH	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Grease and Oil (mg/l)	อัตราการเกิด ก๊าซ (วินาที/115 มล.)	น้ำหนักขี้ (กรัม)	
											แอนโนด	แคโทด
Al - C	3	4	0	6	31.6	7.5	30,887	735	610	0	94.9477	106.5165
	3	4	5	6.59	31.6	7.4	24,613.33	140	-	4.55	-	-
	3	4	10	6.78	32	7.1	24,736	175	-	4.50	-	-
	3	4	30	7.3	33	6.9	25,844	170	-	4.09	-	-
	3	4	60	8.49	33.5	6.8	24,613	210	-	4.01	-	-
	3	4	90	8.62	33	6.8	23,628	237.5	40	3.94	92.8009	106.4414
	3	4	เฉลี่ย	7.55	32.62	7	24,686	186.5	40	4.21	92.8009	106.4414
	3	6	0	6	32.8	6.8	31,997.33	430	610	0	90.9595	106.4637
	3	6	5	6.59	32.8	6.5	30,766.67	125	-	4.71	-	-
	3	6	10	6.7	32.8	6.2	29,536	175	-	4.65	-	-
	3	6	30	7.18	32.8	5.9	28,305.33	187.5	-	4.28	-	-
	3	6	60	7.05	32.8	5.9	28,305.33	210	-	4.34	-	-
	3	6	90	7.18	32.8	5.9	27,074.67	312.5	30	4.57	89.0055	106.4528
	3	6	เฉลี่ย	6.94	32.8	6.08	28,797	202	30	4.51	89.0055	106.4528

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ - แกรไฟต์

ขั้วไฟฟ้า (แอนโนด-แคโทด)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ช่วงเวลาเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	pH	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Grease and Oil (mg/l)	อัตราการเกิด ก๊าซ (วินาที/120 มล.)	น้ำหนักขี้ (กรัม)	
											แอนโนด	แคโทด
C - C	1	1	0	6	32	7.3	28,764	380	100	-	95.6400	106.4563
	1	1	5	6.22	32	7.0	25,380	985	-	-	-	-
	1	1	10	6.22	32	6.5	25,944	316.5	-	-	-	-
	1	1	30	6.31	32	6.2	25,756	276.66	-	24.86	-	-
	1	1	60	6.3	32	5.9	25,380	275	-	23.97	-	-
	1	1	90	6.28	32	5.7	25,380	320	45	21.89	95.5384	106.3607
	1	1	เฉลี่ย	6.26	32	6.26	25,568	434.63	45	23.57	95.5384	106.3607
	1	4	0	6	31.7	10.1	27,810	420	100	-	95.6974	106.3125
	1	4	5	6.16	31.7	9.5	25,956	315	-	-	-	-
	1	4	10	6.15	31.7	9.1	27,439	330	-	-	-	-
	1	4	30	6.1	31.7	8.4	25,956	300	-	20.91	-	-
	1	4	60	6.1	31.7	8.0	24,843	333	-	21.74	-	-
	1	4	90	6.06	31.7	7.9	25,956	350	60	18.78	95.6044	106.3111
	1	4	เฉลี่ย	6.11	31.7	8.58	26,030	325.6	60	20.47	95.6044	106.3111
	1	6	0	6	32.4	7.7	33,828	315	100	-	95.1854	106.4958
	1	6	5	6.05	32.4	7.2	32,295	142.5	-	-	-	-

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์ (ต่อ)

ขั้วไฟฟ้า (แอโนด-แคโทด)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ช่วงเวลาเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	pH	อุณหภูมิ (^o C)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Grease and Oil (mg/l)	อัตราการเกิด ก๊าซ (วินาที/120 มล.)	น้ำหนักขี้ (กรัม)	
											แอโนด	แคโทด
C - C	1	6	10	6.07	32.4	6.9	33,828	155	-	-	-	-
	1	6	30	6.08	32.4	6.7	33,317	137.5	-	19.02	-	-
	1	6	60	6.04	32.4	6.5	33,317	145	-	18.23	-	-
	1	6	90	6.04	32.4	6.5	32,295	170	75	18.91	95.0789	106.4796
	1	6	เฉลี่ย	6.05	32.4	6.76	33,010	105	75	18.72	95.0789	106.4796
	2	1	0	6	31.4	11	28,764	390	100	-	95.3246	106.6312
	2	1	5	6.38	31.4	10.2	24,862	695	-	-	-	-
	2	1	10	6.36	31.9	9.4	25,620	560	-	9.06	-	-
	2	1	30	6.44	33.3	9.0	24,862	305	-	9.87	-	-
	2	1	60	6.4	34.8	8.6	25,663	260	-	9.56	-	-
	2	1	90	6.46	35.6	8.5	24,862	285	35	9.83	95.3058	106.6227
	2	1	เฉลี่ย	6.40	33.4	9.14	25,173	421	35	9.58	95.3058	106.6227
	2	4	0	6	32.4	10.3	34,250	405	100	-	95.0362	106.2639
	2	4	5	6.37	32.4	9.6	31,824	272.5	-	-	-	-
	2	4	10	6.29	32.4	9.1	33,904	235	-	9.64	-	-
	2	4	30	6.1	32.4	8.4	32,517	304	-	9.48	-	-

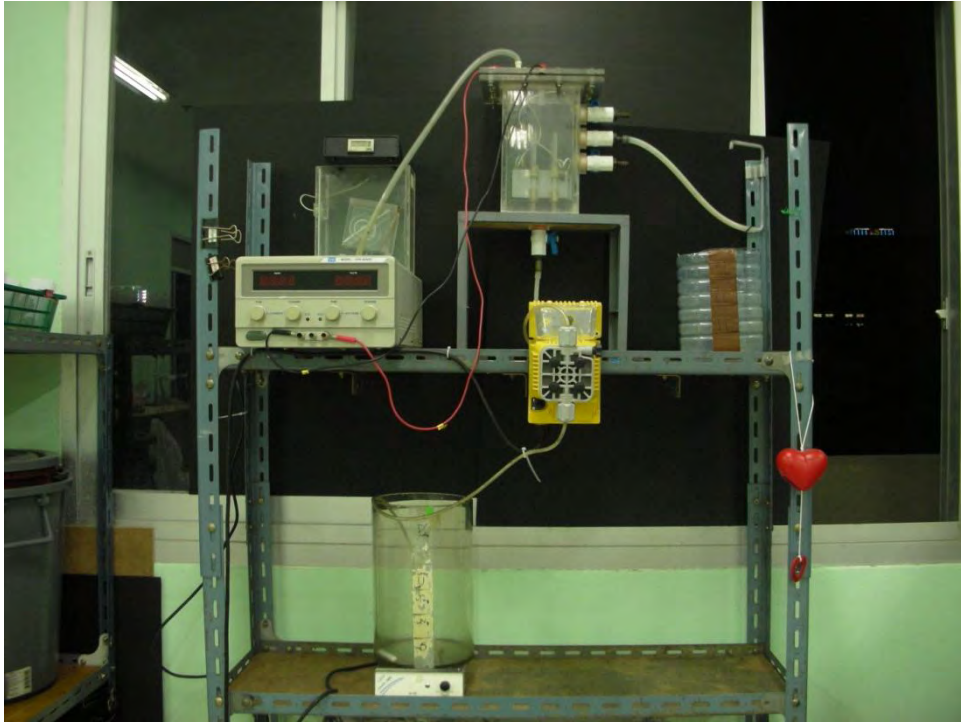
ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์ (ต่อ)

ขั้วไฟฟ้า (แอนโนด-แคโทด)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ช่วงเวลาเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า(โวลต์)	COD (mg/l)	SS(mg/l)	Grease and Oil (mg/l)	อัตราการเกิด ก๊าซ (วินาที/ 120 มล.)	น้ำหนักขี้ (กรัม)	
											แอนโนด	แคโทด
C - C	2	4	60	6.04	32.4	7.4	30,784	277.5	-	9.12	-	-
	2	4	90	6.02	32.4	7.2	30,264	282.5	60	9.04	94.9387	106.2741
	2	4	เฉลี่ย	6.16	32.4	8.34	31,858	274.3	60	9.32	94.9387	106.2741
	2	6	0	6	31.5	10.8	33,828	295	100	-	94.9378	106.2741
	2	6	5	6.19	31.5	9.6	34,339	142.5	-	-	-	-
	2	6	10	6.19	31.5	9.2	33,828	130	-	8.65	-	-
	2	6	30	6.15	31.5	8.5	34,339	147.5	-	9.21	-	-
	2	6	60	6.03	31.5	8.2	33,828	157.5	-	9.07	-	-
	2	6	90	6.03	31.5	7.9	33,828	155	60	9.43	94.7683	106.2354
	2	6	เฉลี่ย	6.11	31.5	8.68	34,032	146.5	60	9.09	94.7683	106.2354
	3	1	0	6	31.6	11.8	27,810	405	100	-	95.5384	106.3607
	3	1	5	6.44	31.6	10.9	24,102	785	-	4.10	-	-
	3	1	10	6.41	31.6	10.6	24,962	645	-	4.87	-	-
	3	1	30	6.44	32.4	9.5	24,102	330	-	4.07	-	-
	3	1	60	6.53	37.6	8.7	25,338	285	-	4.56	-	-
	3	1	90	6.35	37.7	8	24,102	265	45	4.4	95.4379	106.4169

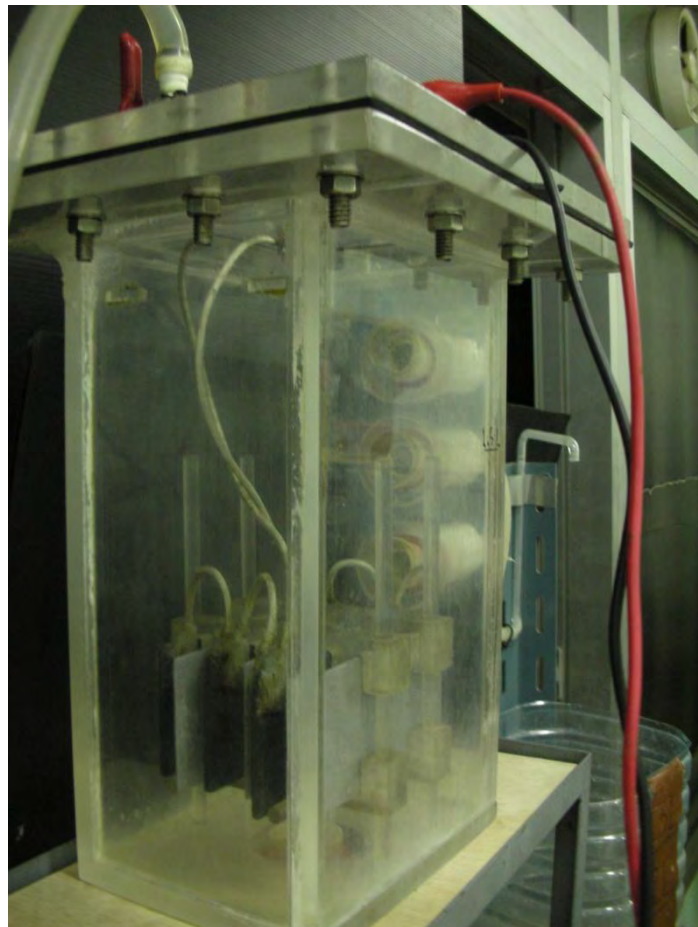
ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า แกรไฟต์-แกรไฟต์ (ต่อ)

ขั้วไฟฟ้า (แอนโนด-แคโทด)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ช่วงเวลาเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า(โวลต์)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Grease and Oil (mg/l)	อัตราการเกิด ก๊าซ (วินาที/ 120 มล.)	น้ำหนักขี้ (กรัม)	
											แอนโนด	แคโทด
C - C	3	1	เฉลี่ย	6.43	34.18	9.54	24,521	462	45	4.40	95.4379	106.4169
	3	4	0	6	31.2	11.9	27,810	405	100	-	95.3407	106.4169
	3	4	5	6.25	31.2	11.1	24,102	306.65	-	4.14	-	-
	3	4	10	6.2	31.2	10.5	22,866	330	-	4.53	-	-
	3	4	30	6.1	31.2	9.4	25,338	368	-	3.98	-	-
	3	4	60	6.08	31.5	8.2	24,613	365	-	4.20	-	-
	3	4	90	6.05	31.7	7.8	23,484	315	30	4.45	95.0512	106.2639
	3	4	เฉลี่ย	6.13	31.36	9.4	24,080	336.93	30	4.26	95.0512	106.2639
	3	6	0	6	32.5	13.6	34,946	271.66	100	-	94.6472	106.2354
	3	6	5	6.23	32.5	12.7	35,619	145	-	4.01	-	-
	3	6	10	6.15	32.5	12.1	35,619	120	-	4.35	-	-
	3	6	30	6.06	32.5	11.3	35,619	130	-	4.27	-	-
	3	6	60	6.03	32.5	10.2	34,340	147.5	-	3.85	-	-
	3	6	90	6.01	32.5	9.8	34,946	142.5	40	4.22	94.3802	106.2083
	3	6	เฉลี่ย	6.09	32.5	11.22	35,228	137	40	4.14	94.3802	106.2083

ภาคผนวก ข
ภาพประกอบการทดลอง



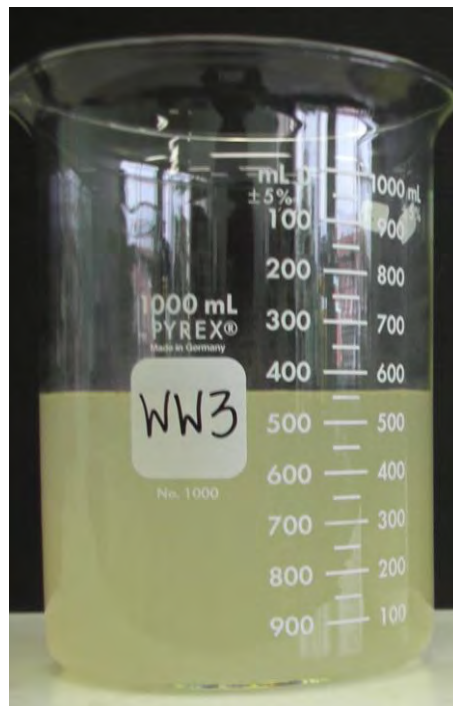
การต่อตั้งปฏิกิริยา



ลักษณะขั้วไฟฟ้า



ลักษณะตะกอนในถังปฏิกิริยา



ลักษณะน้ำที่นำมาใช้ในการทดลอง



น้ำเสียที่ผ่านบำบัดโดยใช้ขี้เถ้าลูมิเนียม – แกรไฟต์
(อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์)



น้ำเสียที่ผ่านบำบัดโดยใช้ขี้แกรไฟต์ – แกรไฟต์
(อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์)

ภาคผนวก ค
การคำนวณกระแสไฟฟ้าและค่าชั่วโมงไฟฟ้า

ตัวอย่างการคำนวณ การบำบัดน้ำเสียอัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมกว้าง 5 ซม. ยาว 10 ซม.หนา 3 มม. เป็นอิเล็กโทรด จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบโมนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน จำนวน 6 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1.5 ซม. ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.5 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

1. การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร} \quad C &= I/A \\
 &= (2)/((0.1*0.05)*5) \\
 &= 80 \quad \text{แอมแปร์/ตร.ม.}
 \end{aligned}$$

3. การคำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัด

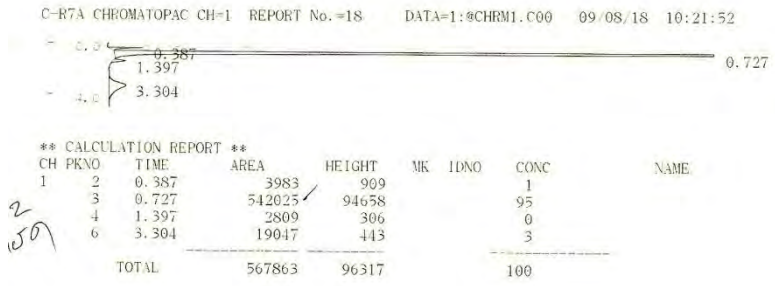
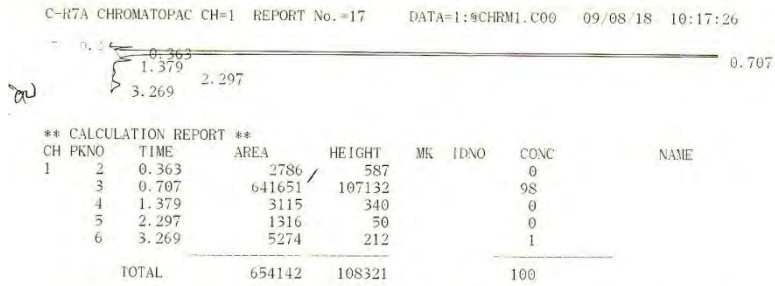
$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร} \quad W &= VI/Q \\
 &= (4.5*2)/(4) \\
 &= 2.25 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง /ลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

4. การคำนวณหาค่าไฟฟ้า

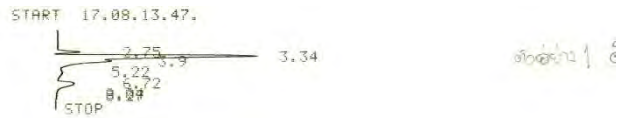
$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร ค่าไฟฟ้า} &= (\text{พลังงานที่ใช้*ค่ายูนิต/หน่วย}) \\
 &= 2.25*2 \\
 &= 4.5 \quad \text{บาท/ลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์เมทานอล ก๊าซเซอร์โรล และตะกอน

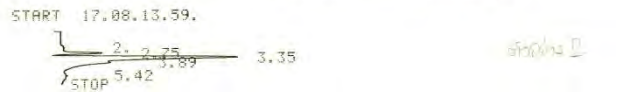


ผลวิเคราะห์เมทานอลในน้ำเสียไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดแล้ว ที่สภาวะ
 อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์
 ด้วยเครื่อง GC (Gas Chromatography)



C-R1A
 SMPL # 00
 FILE # 2
 REPT # 21
 METHOD 41

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		2.75	0.002		14558
0		3.34	0.0245		170580
0		3.9	3.3102	V	22987320
0		5.22	96.6604	V	671244992
0		6.72	0.0026	V	18377
TOTAL			99.9999		694435776



C-R1A
 SMPL # 00
 FILE # 2
 REPT # 22
 METHOD 41

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		2.	2.9919		8392
0		2.75	10.3186	V	28945
0		3.35	57.3147	V	160774
0		3.89	24.3088	V	68189
0		5.42	5.0657	V	14210
TOTAL			100.		280511

ผลวิเคราะห์กักสีเซอร์อลในน้ำเสียไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดแล้ว ที่สภาวะ
 อัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์
 ด้วยเครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography)

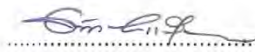
รายงานเลขที่ ICP-055 / 2552

หน้าที่ 1 / 1

รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	สารละลาย	รหัสใบส่งตัวอย่าง 522199
เจ้าของตัวอย่าง	นายณัฐพล กสิวัฒน์	
	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
วัตถุประสงค์ วิธีวิเคราะห์	เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ Al ICP atomic emission spectrometry	
เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer; Perkin Elmer model PLASMA-1000	
วันที่วิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์	13 สิงหาคม 2552	

สารละลาย	ปริมาณธาตุ Al (mg/l)
สารละลายตัวอย่าง	606

 ผู้วิเคราะห์
(นายณัฐพล คิยะวิสุทธิ์ศรี)

หมายเหตุ ผลการทดสอบฉบับนี้ เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ส่งทดสอบ
ณ. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เท่านั้น

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ Al ด้วยวิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission Spectrometer
ของน้ำเสียไปโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดแล้ว
ที่สถานะอัตราการไหล 4 ลิตร/ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างสัปดาห์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กทรอนิกส์ที่ 25 องศาเซลเซียส

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$I_3^- + 2e \leftrightarrow 3I^-$	0.536
$I_2(s) + 2e \leftrightarrow 2I^-$	0.5355
$I_2(aq) + 2e \leftrightarrow 2I^-$	0.620
$Cu^+ + e \leftrightarrow Cu(s)$	0.521
$H_2SO_3 + 4H^+ + 4e \leftrightarrow S(s) + 3H_2O$	0.45
$Ag_2CrO_4(s) + 2e \leftrightarrow 2Ag(s) + CrO_4^{2-}$	0.446
$VO^{2+} + 2H^+ + e \leftrightarrow V^{3+} + H_2O$	0.361
$Fe(CN)_6^{3-} + e \leftrightarrow Fe(CN)_6^{4-}$	0.36
$Cu^{2+} + 2e \leftrightarrow Cu(s)$	0.337
$UO_2^{2+} + 4H^+ + 2e \leftrightarrow U^{4+} + 2H_2O$	0.334
$BiO^+ + 2H^+ + 3e \leftrightarrow Bi(s) + H_2O$	0.32
$Hg_2Cl_2(s) + 2e \leftrightarrow 2Hg(l) + 2Cl^-$	0.368
$AgCl(s) + e \leftrightarrow Ag(s) + Cl^-$	0.222
$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \leftrightarrow H_2SO_3 + H_2O$	0.17
$BiCl_4^- + 3e \leftrightarrow Bi(s) + 4Cl^-$	0.16
$Sn^{4+} + 2e \leftrightarrow Sn^{2+}$	0.154
$Cu^{2+} + e \leftrightarrow Cu^+$	0.153
$S(s) + 2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2S(g)$	0.141
$TiO^{2+} + 2H^+ + e \leftrightarrow Ti^{3+} + H_2O$	0.1
$AgBr(s) + e \leftrightarrow Ag(s) + Br^-$	0.095
$S_4O_6^{2-} + 2e \leftrightarrow 2S_2O_3^{2-}$	0.08
$Ag(S_2O_3)_2^{3-} + e \leftrightarrow Ag(s) + 2S_2O_3^{2-}$	0.010
$2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2(g)$	0.000
$Pb^{2+} + 2e \leftrightarrow Pb(s)$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e \leftrightarrow Sn(s)$	-0.136
$AgI(s) + e \leftrightarrow Ag(s) + I^-$	-0.151
$CuI(s) + e \leftrightarrow Cu(s) + I^-$	-0.185
$N_2(g) + 5H^+ + 4e \leftrightarrow N_2H_5^+$	-0.23
$Ni^{2+} + 2e \leftrightarrow Ni(s)$	-0.250
$V^{3+} + e \leftrightarrow V^{2+}$	-0.255
$Co^{2+} + 2e \leftrightarrow Co(s)$	-0.277
$Ag(CN)_2^- + e \leftrightarrow Ag(s) + 2CN^-$	-0.31
$Tl^+ + e \leftrightarrow Tl(s)$	-0.336
$PbSO_4(s) + 2e \leftrightarrow Pb(s) + SO_4^{2-}$	-0.356
$Ti^{3+} + e \leftrightarrow Ti^{2+}$	-0.37
$Cd^{2+} + 2e \leftrightarrow Cd(s)$	-0.403
$Cr^{3+} + 2e \leftrightarrow Cr^{2+}$	-0.41
$Fe^{2+} + 2e \leftrightarrow Fe(s)$	-0.440
$2CO_2(g) + 2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2C_2O_4$	-0.49
$Cr^{3+} + 3e \leftrightarrow Cr(s)$	-0.74
$Zn^{2+} + 2e \leftrightarrow Zn(s)$	-0.763
$Mn^{2+} + 2e \leftrightarrow Mn(s)$	-1.18
$Al^{3+} + 3e \leftrightarrow Al(s)$	-1.66
$Mg^{2+} + 2e \leftrightarrow Mg(s)$	-2.37
$Na^+ + e \leftrightarrow Na(s)$	-2.714
$Ca^{2+} + 2e \leftrightarrow Ca(s)$	-2.87
$Ba^{2+} + 2e \leftrightarrow Ba(s)$	-2.90
$K^+ + e \leftrightarrow K(s)$	-2.925
$Li^+ + e \leftrightarrow Li(s)$	-3.045

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$F_2(g) + 2H^+ + 2e \leftrightarrow 2HF(aq)$	3.06
$O_3(g) + 2H^+ + 2e \leftrightarrow O_2(g) + H_2O$	2.07
$S_2O_8^{2-} + 2e \leftrightarrow 2SO_4^{2-}$	2.01
$Co^{3+} + e \leftrightarrow Co^{2+}$	1.842
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \leftrightarrow 2H_2O$	1.776
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \leftrightarrow MnO_2(s) + 2H_2O$	1.695
$Ce^{4+} + e \leftrightarrow Ce^{3+}$	
$HClO + H^+ + e \leftrightarrow \frac{1}{2}Cl_2(g) + H_2O$	1.63
$H_5IO_6 + H^+ + 2e \leftrightarrow IO_3^- + 3H_2O$	1.60
$BrO_3^- + 6H^+ + 5e \leftrightarrow \frac{1}{2}Br_2(l) + 3H_2O$	1.52
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \leftrightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51
$Mn^{3+} + e \leftrightarrow Mn^{2+}$	
$ClO_3^- + 6H^+ + 5e \leftrightarrow \frac{1}{2}Cl_2(g) + 3H_2O$	1.47
$PbO_2(s) + 4H^+ + 2e \leftrightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	1.455
$Cl_2(g) + 2e \leftrightarrow 2Cl^-$	1.359
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \leftrightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33
$Tl^{3+} + 2e \leftrightarrow Tl^+$	1.25
$IO_3^- + 2Cl^- + 6H^+ + 4e \leftrightarrow ICl_2 + 3H_2O$	1.24
$MnO_2(s) + 4H^+ + 2e \leftrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23
$O_2(g) + 4H^+ + 4e \leftrightarrow 2H_2O$	1.229
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \leftrightarrow \frac{1}{2}I_2(s) + 3H_2O$	1.195
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \leftrightarrow \frac{1}{2}I_2(aq) + 3H_2O$	1.178
$SeO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \leftrightarrow 2H_2SeO_3 + H_2O$	1.15
$Br_2(l) + 2e \leftrightarrow 2Br^-$	1.065
$Br_2(aq) + 2e \leftrightarrow 2Br^-$	1.087
$ICl_2^- + e \leftrightarrow \frac{1}{2}I_2(s) + 2Cl^-$	1.06
$V(OH)_4^+ + 2H^+ + e \leftrightarrow VO^{2+} + H_2O$	1.00
$HNO_2 + H^+ + e \leftrightarrow NO(g) + H_2O$	1.00
$Pd^{2+} + 2e \leftrightarrow Pd(s)$	0.987
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \leftrightarrow HNO_2 + H_2O$	0.94
$2Hg^{2+} + 2e \leftrightarrow Hg_2^{2+}$	0.920
$HO_2^- + H_2O + 2e \leftrightarrow 3OH^-$	0.88
$Cu^{2+} + I^- + e \leftrightarrow CuI(s)$	0.86
$Hg_2^{2+} + 2e \leftrightarrow Hg(l)$	0.854
$Ag^+ + e \leftrightarrow Ag(s)$	0.799
$Hg_2^{2+} + 2e \leftrightarrow 2Hg(l)$	0.789
$Fe^{3+} + e \leftrightarrow Fe^{2+}$	0.771
$H_2SeO_3 + 4H^+ + 4e \leftrightarrow Se(s) + 3H_2O$	0.740
$PtCl_4^{2-} + 2e \leftrightarrow Pt(s) + 4Cl^-$	0.73
$C_6H_4O_2(quinone) + 2H^+ + 2e \leftrightarrow C_6H_4(OH)_2$	0.699
$O_2(g) + 2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2O_2$	0.682
$PtCl_6^{2-} + 2e \leftrightarrow PtCl_4^{2-} + 2Cl^-$	0.68
$Hg_2SO_4(s) + 2e \leftrightarrow 2Hg(l) + SO_4^{2-}$	0.615
$Sb_2O_5(s) + 6H^+ + 4e \leftrightarrow 2SbO^+ + 3H_2O$	0.581
$MnO_4^- + e \leftrightarrow MnO_4^{2-}$	0.564
$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \leftrightarrow H_3AsO_3 + H_2O$	0.559

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อนุรักษ์ กสิวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550