

การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า



นางสาวอัญชลี ศรีรังสรรค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF BIODIESEL WASTEWATER BY
ELECTROCOAGULATION PROCESS

Miss Anchalee Srirangsan

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511503

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอน
ด้วยไฟฟ้า

โดย

นางสาวอัญชลี ศรีรังสรรค์


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

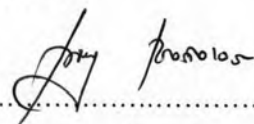
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

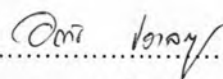
รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

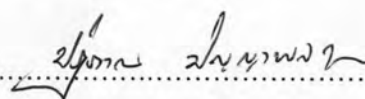

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. สมชาย ดารารัตน์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปริญญา ปัญญาพลกุล)

อัญชลี ศรีรังสรรค์ : การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (TREATMENT OF BIODIESEL WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION PROCESS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 126 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการออกแบบการทดลองแบบใช้ตัวแปรเดียวในการทดลองแต่ละครั้ง โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการทดลองทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ ชนิดของขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแอโนดและแคโทดเป็นแบบเหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe) เหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-C) แกรไฟต์-แกรไฟต์ (C-C) อลูมิเนียม-แกรไฟต์ (Al-C) และอลูมิเนียม-อลูมิเนียม (Al-Al) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 4 ถึง 9 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 10 ถึง 30 โวลต์ ระยะเวลาทำปฏิกิริยา ตั้งแต่ 10 ถึง 40 นาที สภาวะที่เหมาะสมในบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล คือ ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบอลูมิเนียม-แกรไฟต์ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 6 ใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน 25 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันและไขมันเท่ากับร้อยละ 55.43 96.88 และ 97.76 ตามลำดับ น้ำหนักขั้วที่สลายไปเท่ากับ 0.1475 กรัม สามารถผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 390 มิลลิลิตร ใช้ค่าพลังงานเท่ากับ 6.92 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร เสียค่าไฟฟ้าในการบำบัดเท่ากับ 13.36 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการทดลองทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาทำปฏิกิริยา โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบอลูมิเนียม-แกรไฟต์ จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 และมีประสิทธิภาพการกำจัดรวมทั้งค่าใช้จ่ายใกล้เคียงกันด้วย ซึ่งเป็นการยืนยันว่าผลการทดลองของทั้ง 2 วิธี สามารถเชื่อถือได้ ซึ่งในการนำไปใช้งาน ต้องเลือกสภาวะที่มีความเหมาะสมกับเครื่องมือและเทคโนโลยีที่ใช้ สามารถควบคุมง่าย เกิดความคุ้มค่าสูงสุด

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต.....*อัญชลี ศรีรังสรรค์*
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....*อรทัย ชวาลภาฤทธิ์*
 ปีการศึกษา 2551

##4970698521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

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

ANCHALEE SRIRANGSAN : TREATMENT OF BIODIESEL WASTEWATER BY
ELECTROCOAGULATION PROCESS. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC.
PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 126 pp.

This research aimed to study optimum the suitable condition for biodiesel wastewater treatment by electrocoagulation process. The experiment was divided into two steps.

The first step : Different operational conditions were examined using one variable at a time method. Type of electrode for anode and cathode such as : Fe-Fe / Fe-C / C-C / Al-C and Al-Al were used in this study. The initial pH from 4-9, voltage from 10 to 30 volts and retention time from 10 to 40 minutes were tested. The results showed that the optimum condition for treatment of biodiesel wastewater was using Al-C electrode as anode and cathode, initial pH of 6, voltage of 20 V and retention time of 25 minutes. 55.43% COD remove, 96.88% SS remove and 97.76% grease and oil remove under this condition. Furthermore 0.1475 grams of electrode lost after the experiment and 390 ml of gases occurred from the chemical reaction. Moreover, the energy consumption and the electric cost for the treatment are 6.92 kW/m³ and 13.36 baht respectively.

The second part : Box-Behnken. The parameters are initial pH of wastewater, voltage and retention time by using Al-C electrode. The experiment showed that the suitable condition is similar to the 1st part experiment including the removal efficiency and the electric cost. It's can confirm that the result of both experiment are reliable. However, the treating condition for the treatment plant should proper to the equipment and technology for the easier operation and the most benefit.

Department : Environmental Engineering

Field of study : Environmental Engineering

Academic year : 2008

Student's signature : *Anchalee Srirangsan*

Principal Advisor's signature : *Orathai Chavalparit*

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร. ורתัย ขวาลภาฤทธิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง รวมถึงแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ อาจารย์ ดร. สมชาย คารารัตน์ อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอน และถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน โดยได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ที่สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณปริญา เลิศสถิตย์พงษ์ คุณเอนกประชา แก้วมณี และคุณอนุศักดิ์ เจริญ บริษัทบางจาก ปีโตรเลียม 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.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไบโอดีเซล.....	3
2.1.1 ความหมายของไบโอดีเซล.....	3
2.1.2 ประเภทของไบโอดีเซล.....	3
2.1.3 วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล.....	4
2.1.4 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์.....	5
2.1.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลของบริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)...	6
2.1.6 การจัดการน้ำเสียไบโอดีเซลของบริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)...	9
2.1.7 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลชุมชน.....	9
2.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อน.....	10
2.3 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	12
2.3.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	13
2.3.2 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	14
2.3.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์.....	17
2.3.4 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	18
2.3.5 ค่าการนำไฟฟ้า.....	19
2.3.6 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ.....	20

2.3.7 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี.....	20
2.3.8 ขั้วไฟฟ้า.....	21
2.3.9 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	23
2.3.10 หลักการในการออกแบบเครื่องตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี.....	24
2.3.11 ข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี.....	25
2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	25
2.4.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design).....	25
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.5.1 การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลและน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน.....	31
2.5.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันและไขมัน โดยกระบวนการรวม ตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	33
2.5.3 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วย ไฟฟ้า.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 แผนการวิจัย.....	36
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	38
3.3.1 การออกแบบการทดลองแบบใช้ตัวแปรเดียวในการทดลองแต่ละครั้ง.....	39
3.3.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ด้วยโปรแกรมมินิแทป.....	44
3.3.3 ศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล.....	46
3.3.4 ตัวแปรในการทดลอง.....	47
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	50
4.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	50
4.2 การออกแบบการทดลองแบบใช้ตัวแปรเดียวในการทดลองแต่ละครั้ง.....	51
4.2.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ เหมาะสม.....	51
4.2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	59
4.2.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม.....	63
4.2.4 สรุปสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย โดยการออกแบบการทดลอง แบบใช้ตัวแปรเดียวในการทดลองแต่ละครั้ง.....	67

4.3 การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	69
4.3.1 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี...	70
4.3.2 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ของแข็งแขวนลอย.....	75
4.3.3 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด น้ำมันและไขมัน.....	80
4.4 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลอง.....	84
4.4.1 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแบบจำลอง.....	86
4.4.2 การวิเคราะห์หาค่าสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของแต่ละ ตัวแปร.....	88
4.4.3 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม.....	91
4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสม.....	94
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	97
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
5.1.1 การออกแบบการทดลองแบบใช้ตัวแปรเดียวในการทดลองแต่ละครั้ง.....	97
5.1.2 การออกแบบแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	97
5.1.3 การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมมินิแทป.....	98
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	103
ภาคผนวก ข รูปประกอบการทดลอง.....	113
ภาคผนวก ค การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าและค่าชั่วโมงไฟฟ้า.....	117
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์เมทานอล กลีเซอรอล และตะกอน.....	120
ภาคผนวก จ ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	126

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)..... 8
ตารางที่ 2.2	ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานไบโอดีเซลต้นแบบจังหวัดเชียงใหม่หลังผ่านการ แยกน้ำมันและไขมันออกแล้ว..... 10
ตารางที่ 2.3	ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE 18
ตารางที่ 2.4	การออกแบบบ็อกซ์-เบห็นเคนแบบ 3 ตัวแปร..... 26
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห็นเคน..... 44
ตารางที่ 3.2	สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห็นเคน โดยใช้โปรแกรมมินิแทป..... 44
ตารางที่ 3.3	ค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 1 เพื่อวิเคราะห์หาชนิดของขั้วไฟฟ้าและ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสม..... 47
ตารางที่ 3.4	ค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เหมาะสม..... 48
ตารางที่ 3.5	ค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองที่ 3 เพื่อวิเคราะห์หาระยะเวลาในการทำ ปฏิกริยาที่เหมาะสม..... 48
ตารางที่ 3.6	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสียและตะกอน..... 49
ตารางที่ 4.1	ลักษณะน้ำเสียจากการล้างน้ำมันผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตน้ำมัน ไบโอดีเซล..... 51
ตารางที่ 4.2	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ที่ขั้วไฟฟ้าต่างๆ..... 52
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดของการใช้ขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด..... 58
ตารางที่ 4.4	ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม- แกรไฟต์ ที่พีเอช 6..... 60
ตารางที่ 4.5	ผลของระยะเวลาการทำปฏิกริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัด เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า อลูมิเนียม-แกรไฟต์ ที่พีเอช 6 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์..... 63
ตารางที่ 4.6	สรุปผลการศึกษาการบำบัดไบโอดีเซลด้วยการออกแบบการทดลองแบบ ใช้ตัวแปรเดียวในการทดลองแต่ละครั้ง..... 68

ตารางที่ 4.7	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันและไขมันที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน โดยใช้โปรแกรมมินิแทป.....	70
ตารางที่ 4.8	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ.....	85
ตารางที่ 4.9	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย.....	86
ตารางที่ 4.10	ค่า p -value ของแบบจำลอง.....	88
ตารางที่ 4.11	เปรียบเทียบค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันและไขมันที่ได้จากการทดลองกับค่าร้อยละที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic.....	93
ตารางที่ 4.12	ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบใช้ตัวแปรเดียวในการทดลองแต่ละครั้งและการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	94

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริเฟเคชันของไตรกลีเซอไรด์.....	3
รูปที่ 2.2 แผนภาพการผลิตไบโอดีเซลของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน).....	8
รูปที่ 2.3 แผนผังแนวทางการจัดการน้ำเสีย บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน).....	9
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบการเกิดปฏิกริยาทางไฟฟ้าเคมี.....	13
รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	13
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์เมื่อควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	14
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่.....	15
รูปที่ 2.8 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับ 3 ตัวแปร.....	27
รูปที่ 2.9 พื้นที่การตอบสนองแบบ 3 มิติและกราฟเส้น โครงร่าง.....	28
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์และถังปฏิกรณ์.....	37
รูปที่ 3.2 ขนาดของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	38
รูปที่ 3.3 ขนาดและองค์ประกอบของถังปฏิกริยา.....	38
รูปที่ 3.4 ผังการไหลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม.....	39
รูปที่ 3.5 ผังการไหลการทดลองที่ 1 ศึกษาหาชนิดของขั้วไฟฟ้าและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสม.....	41
รูปที่ 3.6 ผังการไหลการทดลองที่ 2 ศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	42
รูปที่ 3.7 ผังการไหลการทดลองที่ 3 ศึกษาหาระยะเวลาในการทำปฏิกริยาที่เหมาะสม.....	43
รูปที่ 3.8 ผังการไหลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยใช้โปรแกรมมินิแทป.....	46
รูปที่ 4.1 ผลของขั้วไฟฟ้าและพีเอชเริ่มต้นต่อค่าพีเอชหลังการทดลอง.....	53
รูปที่ 4.2 น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ที่เวลา 30 นาที ที่พีเอช 4, 6 และ 9 โดยเรียงจากซ้ายไปขวา.....	54
รูปที่ 4.3 ผลของขั้วไฟฟ้าและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี.....	54
รูปที่ 4.4 ผลของขั้วไฟฟ้าและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย.....	56
รูปที่ 4.5 ผลของขั้วไฟฟ้าและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน.....	56
รูปที่ 4.6 ผลของขั้วไฟฟ้าและพีเอชเริ่มต้นต่อปริมาณการผลิตก๊าซที่เกิดขึ้นที่จากปฏิกริยา.....	57
รูปที่ 4.7 ผลของขั้วไฟฟ้าและพีเอชเริ่มต้นต่อปริมาณขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป.....	58
รูปที่ 4.8 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ต่อค่าพีเอชหลังจากปฏิกริยา.....	60

รูปที่ 4.9	ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันและไขมัน.....	61
รูปที่ 4.10	ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ต่อปริมาณการผลิตก๊าซที่เกิดขึ้นที่จากปฏิกิริยา.....	62
รูปที่ 4.11	ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ต่อน้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่สลายไปหลังการทดลอง.....	62
รูปที่ 4.12	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อพีเอชหลังการทดลอง.....	64
รูปที่ 4.13	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันและไขมัน.....	65
รูปที่ 4.14	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ต่อปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลอง.....	65
รูปที่ 4.15	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ต่อน้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่สลายไปหลัง การทดลอง.....	66
รูปที่ 4.16	ตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา.....	67
รูปที่ 4.17	แผนภาพพื้นที่ผิว (Surface Plot) (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (Contour Plot) (ข) แสดงอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่มีต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี.....	72
รูปที่ 4.18	แผนภาพพื้นที่ผิว (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (ข) แสดงอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของ น้ำเสียและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี.....	73
รูปที่ 4.19	แผนภาพพื้นที่ผิว (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (ข) แสดงอิทธิพลความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี.....	75
รูปที่ 4.20	แผนภาพพื้นที่ผิว (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (ข) แสดงอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของ น้ำเสียและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ของแข็งแขวนลอย.....	77
รูปที่ 4.21	แผนภาพพื้นที่ผิว (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (ข) แสดงอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของ น้ำเสียและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ของแข็งแขวนลอย.....	78
รูปที่ 4.22	แผนภาพพื้นที่ผิว (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (ข) แสดงอิทธิพลความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ของแข็งแขวนลอย.....	80
รูปที่ 4.23	แผนภาพพื้นที่ผิว (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (ข) แสดงอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสียและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและ ไขมัน.....	81

รูปที่ 4.24	แผนภาพพื้นที่ผิว (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (ข) แสดงอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน.....	83
รูปที่ 4.25	แผนภาพพื้นที่ผิว (ก) และแผนภาพคอนทัวร์ (ข) แสดงอิทธิพลความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน.....	84
รูปที่ 4.26	ค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ที่ได้จากการทดลองกับค่าร้อยละที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic.....	95
รูปที่ 4.27	ค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ที่ได้จากการทดลองกับค่าร้อยละที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic.....	95
รูปที่ 4.28	ค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน ที่ได้จากการทดลองกับค่าร้อยละที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic.....	95