

การลดสีของน้ำเสียโรงงานเยื่อและกระดาษในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า



นายสิทธิโชค คันชอทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2074-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COLOR REDUCTION OF PULP AND PAPER MILL WASTEWATER IN ELECTROCHEMICAL
REACTORS

Mr. Sittichok Khansorthong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science


Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-2074-9

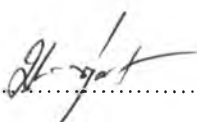
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การลดสีของน้ำเสียโรงงานเยื่อและกระดาษในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า
โดย นายสิทธิโชค คั่นชอทอง
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม

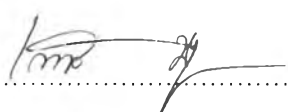
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

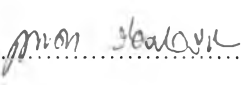

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พุกษาท)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต)

สิทธิโชค คັນชอทอง : การลดสีของน้ำเสียโรงงานเยื่อและกระดาษในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า.
(COLOR REDUCTION OF PULP AND PAPER MILL WASTEWATER IN ELECTROCHEMICAL REACTORS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. มะลิ หุ่นสม , 115 หน้า .
ISBN 974-14-2074-9.

งานวิจัยนี้ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและสารมลพิษของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และในระบบแบบต่อเนื่อง โดยขั้วไฟฟ้าที่ใช้คือแผ่นเหล็ก จำนวน 6 แผ่น โดยแต่ละแผ่นมีพื้นที่ผิวประมาณ 0.0161 ตารางเมตร จัดเรียงตัวแบบมอดอโพลาร์แบบขนาน ตัวแปรที่ศึกษาคือ ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นของน้ำเสีย ชนิดของสารเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน และอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ จากผลการทดลองพบว่าสารเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนไม่มีผลต่อการลดสารมลพิษในน้ำเสีย และภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นของน้ำเสียประมาณ 7.58 อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 2.6 ลิตรต่อนาที และเวลาในการทำงาน 45 นาที ซึ่งสามารถกำจัดซีไอดี บีไอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ที่ร้อยละ 97.0, 87.8, 80.4, 89.8 และ 37.5 ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งมีค่าต่ำกว่าระดับเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทยที่กำหนดไว้ ยกเว้นค่าบีไอดี ต้นทุนในการบำบัดประมาณ 0.29 ดอลลาร์สหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ส่วนกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในระบบแบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ทำการศึกษาเพิ่มเติมคือ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นของน้ำเสียประมาณ 7.58 อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 2.6 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 66.7 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีเวลาในการทำงาน 4 ชั่วโมง 30 นาที ระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งสามารถกำจัด ซีไอดี บีไอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ที่ร้อยละ 90.9, 76.8, 61.5, 89.9 และ 35.3 ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 8.05 และมีเหล็กตกค้างในน้ำเสียน้อยกว่า 0.098 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2548

4672442223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ELECTROCOAGULATION/PULP AND PAPER MILL WASTEWATER/ COLOR
REDUCTION/ ELECTROCOAGULATION TECHNIQUE

SITTICHOK KHANSORTHONG: COLOR REDUCTION OF PULP AND PAPER
MILL WASTEWATER IN ELECTROCHEMICAL REACTORS.THESIS ADVISOR:
ASST.PROF.MALI HUNSOM, Ph.D.115 pp. ISBN 974-14-2074-9

This research was proposed to find the optimum condition of color and pollutants reduction in pulp and paper mill wastewater by using the electrocoagulation techniques in batch and continuous reactors. Six pieces of iron plates constructed in parallel configurations were used as electrodes. The parameters investigated in the batch treatment process were current density, initial pH of wastewater, type of polyelectrolyte and circulating flow rate of wastewater in reactor. The preliminary results indicated that the polyelectrolyte had no effect on the pollutants removal. The optimum condition for treating pulp and paper mill wastewater in batch reactor was found at current density of 20.7 A/m^2 , initial pH of wastewater of 7.58, circulating flow rate of wastewater in reactor of 2.6 l/min and 45 min electrolysis time. According to this condition, the removal efficiency of color, COD, BOD, TSS and TDS were 97.0%, 87.8%, 80.4%, 89.8% and 37.5%, respectively. The pollutants in treated wastewater were less than the standard values of Thai Government except BOD. The total operating cost of the treatment process was approximately $0.29 \text{ US\$/m}^3$ wastewater.

For the wastewater treatment in continuous system, the optimum condition was found at current density of 20.7 A/m^2 initial pH of 7.58, circulating flow rate of wastewater in reactor of 2.6 l/min and flow rate of wastewater of 66.7 ml/min. The treatment process reached the steady state condition within 4.50 hrs. At this condition, the removal efficiency of color, COD, BOD, TSS and TDS were 90.9%, 76.8%, 61.5%, 89.9% and 35.3%, respectively. The pH of the treated wastewater and the iron content were around 8.05 and 0.098 mg/l, respectively.

Department..... Chemical Technology..... Student's signature..... *Sittichok khansorthong*
Field of study..... Chemical Technology..... Advisor's signature..... *Mali Hunsom*
Academic year..... 2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัย ตลอดจนได้กรุณาปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พุกษาทรและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิค ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย และช่วยซ่อมแซมอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย จนสามารถดำเนินงานวิจัยได้ดีมาตลอด และขอขอบคุณ ไฉต ชัน แมว และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อ เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บริษัท เยื่อกระดาษสยาม จำกัด (มหาชน) ที่ให้การอนุเคราะห์น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ คุณตา คุณยาย คุณป้า น้องอีฟ และญาติพี่น้อง ที่คอยสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษาและเป็นกำลังใจอันแสนอบอุ่นเสมอ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้.....	3
2. วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 กรรมวิธีการผลิตเยื่อและกระดาษ.....	4
2.1.1 การผลิตเยื่อ.....	4
2.1.2 การผลิตกระดาษ.....	12
2.2 ลิกนิน.....	12
2.3 มลพิษจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ.....	15
2.4 วิธีการจัดการน้ำเสีย.....	17
2.4.1 กระบวนการบำบัดทางกายภาพ.....	18
2.4.2 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ.....	18
2.4.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี.....	19

บทที่	หน้า
2.5 กระบวนการที่ใช้กำจัดสี.....	19
2.6 การบำบัดน้ำเสียของโรงงานเยื่อและกระดาษในประเทศไทย.....	21
2.7 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า.....	22
2.7.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	23
2.7.2 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า.....	25
2.7.3 กฎของฟาราเดย์.....	27
2.7.4 ค่าการนำไฟฟ้า.....	28
2.7.5 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ.....	28
2.7.6 การถ่ายโอนมวลสารในระบบเคมีไฟฟ้า.....	29
2.8 การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย.....	30
2.8.1 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	30
2.8.2 กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า.....	33
2.8.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	35
2.8.4 กระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	39
2.9 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นในการกำจัดสีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	44
2.10 ข้อดี -ข้อเสียของกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	48
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
3.วิธีดำเนินการวิจัย.....	50
3.1 แผนการวิจัย.....	50
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	51
3.3 สารเคมี.....	52
3.4 น้ำตัวอย่าง.....	53

3.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	53
3.5.1 วิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ.....	53
3.5.2 ศึกษาการกำจัดสีและสารมลพิษออกจากรน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและ กระดาษ โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	54
3.5.2.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าใน เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	54
(ก) ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	54
(ข) ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น.....	55
(ค) ศึกษาผลของอัตราการไหลวนของสารตัวอย่างในเครื่อง ปฏิกรณ์.....	55
(ง) ศึกษาผลของสารเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพใน การกำจัดสีและสารมลพิษของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านกระบวนการรวม ตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	55
3.5.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าใน เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	56
4. ผลและอภิปรายผลการทดลอง.....	57
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.....	57
4.2 การกำจัดและสารมลพิษของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดย กระบวนการการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	58
4.2.1 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	58
4.2.2 ผลของความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น.....	63
4.2.3 ผลของเวลาต่อการลดของสีและสารมลพิษ.....	66
4.2.4 ผลของอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์.....	67
4.2.5 ผลของสารเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน.....	68
4.2.6 ต้นทุนในการดำเนินงาน.....	74
4.2.7 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ.....	75

บทที่	ญ หน้า
4.3 การกำจัดสีและสารมลพิษของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการ รวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในระบบแบบต่อเนื่อง.....	77
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก.....	90
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค	107
ภาคผนวก ง	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขั้นตอนการฟอกเยื่อ.....	8
ตารางที่ 2.2 สารอนุพันธ์ของลิกนินจากกระบวนการผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อ.....	15
ตารางที่ 2.3 มลภาวะทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษแบบkraft.....	17
ตารางที่ 2.4 ความหมายของเครื่องหมายของ ΔG และ E	27
ตารางที่ 2.5 ศักยภาพของตัวออกซิไดส์ตามสารตั้งต้น.....	37
ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบผลของข้อแอนโดชนิดต่างๆ ต่อการออกซิเดชัน.....	40
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.....	57
ตารางที่ 4.2 ปริมาณของสีและสารมลพิษหลังจากการบำบัดที่เวลาต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	72
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.....	76
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณของสีและสารมลพิษหลังจากการบำบัดที่เวลาต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	81
ตารางที่ ข (1) ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ไอดี.....	101
ตารางที่ ข (2) ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม.....	101
ตารางที่ ข (3) การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีไอดี.....	104
ตารางที่ ง (1) ผลการทดลองการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ จากน้ำเสียโรงงานเยื่อและกระดาษที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	110
ตารางที่ ง (2) ผลการทดลองการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ จากน้ำเสียโรงงานเยื่อและกระดาษที่ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่างๆ.....	111
ตารางที่ ง (3) ผลการทดลองการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ จากน้ำเสียโรงงานเยื่อและกระดาษที่อัตราการไหลวนของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ค่าต่างๆ.....	112

ตาราง

หน้า

ตารางที่ ๔ (4) ผลการทดลองใส่สารเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนก่อนและหลังผ่าน กระบวนการรวมตะกอน ด้วยกระแสไฟฟ้าเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ จากน้ำเสีย โรงงานเยื่อและกระดาษ.....	112
ตารางที่ ๕ (5) ผลการทดลองการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จากน้ำเสียโรงงานเยื่อและกระดาษที่อัตราการไหลต่างๆ.....	113
ตารางที่ ๖ (6) แสดงค่าใช้จ่ายของระบบรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียจากโรงงาน เยื่อและกระดาษในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	114

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ.....	5
รูปที่ 2.2 กระบวนการแบบกราฟท์.....	11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ phenylpropane unit.....	12
รูปที่ 2.4 สารตั้งต้นของโครงสร้างลิกนิน.....	13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน.....	14
รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของ Polyacrylamide.....	20
รูปที่ 2.7 การปรากฏประจุไฟฟ้าของพอลิอิเล็กโทรไลต์.....	20
รูปที่ 2.8 แผนผังการบำบัดน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษในประเทศไทย.....	22
รูปที่ 2.9 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์กระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	24
รูปที่ 2.10 การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย.....	30
รูปที่ 2.11 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Tank cell.....	31
รูปที่ 2.12 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้า (ก) แบบมอโนโพลาร์ และ (ข) แบบไบโพลาร์.....	31
รูปที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Filter press.....	32
รูปที่ 2.14 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Rotating cylinder electrode.....	32
รูปที่ 2.15 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ.....	34
รูปที่ 2.16 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก.....	35
รูปที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Cylinder electrode.....	38
รูปที่ 2.18 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Packed bed.....	38
รูปที่ 2.19 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Bi-polar trickle tower.....	38
รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างของ Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes.....	41
รูปที่ 2.21 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบมอโนโพลาร์-เซลล์เดี่ยว.....	43
รูปที่ 2.22 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้ามอโนโพลาร์แบบขนาน.....	43
รูปที่ 2.23 แสดงการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้ามอโนโพลาร์แบบอนุกรม.....	43
รูปที่ 2.24 แสดงการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์.....	44

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.25 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	45
รูปที่ 2.26 ทฤษฎี Electrical Double Layer	47
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	51
รูปที่ 4.1 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อร้อยละการกำจัดสีและสารมลพิษในน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ที่เวลาต่างๆ.....	61
รูปที่ 4.2 ผลของความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่อร้อยละการกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อ และกระดาษเวลาต่างๆ.....	65
รูปที่ 4.3 ร้อยละการลดสารมลพิษกับเวลาที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	66
รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ต่อร้อยละการลดลงของสีและ สารมลพิษที่เวลาต่างๆ ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20.7 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตรความเป็นกรด-เบส 7.58 และเวลา 45 นาที.....	67
รูปที่ 4.5 ร้อยละการกำจัดสีและค่าซีโอดีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยใช้ สารเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่ปริมาณต่าง ๆ.....	69
รูปที่ 4.6 สีของน้ำตัวอย่างก่อนและหลังการบำบัดด้วยพอลิอะครีไลม์ไนด์ ที่ปริมาณต่างๆ	70
รูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดสีและสารมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยใช้ สารเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน ก่อนและหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วย กระแสไฟฟ้า.....	71
รูปที่ 4.8 สีของน้ำตัวอย่างก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแส ไฟฟ้าที่เวลาการทดลองต่าง ๆ.....	72
รูปที่ 4.9 ปริมาณของเหล็กในน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแส ไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20.7 แอมแปร์ ต่อตารางเมตร.....	73

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.10 ปริมาณขั้วเหล็กที่ใช้หลัง การบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าใน เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.	74
รูปที่ 4.11 ต้นทุนในการดำเนินงานกับเวลาที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	75
รูปที่ 4.12 ร้อยละการกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษที่อัตราการไหล ค่าต่างๆในระบบแบบต่อเนื่อง.....	78
รูปที่ 4.13 ร้อยละการลดสารมลพิษกับเวลาในระบบแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหลเข้าเครื่อง ปฏิกรณ์เท่ากับ 66.7 มิลลิลิตรต่อนาที.....	79
รูปที่ 4.14 ปริมาณของเหล็กที่เกิดจากขั้วแอโนดและปริมาณของเหล็กในน้ำทิ้งหลังการบำบัด ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในระบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 20.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	80
รูปที่ ข (1) Calibration Curve ของการวัดสีด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer.....	95