

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี



นายภคพงศ์ เสงยวิจิตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4555-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HEAVY METALS REMOVAL IN COD WASTEWATER
USING ELECTROCHEMICAL PROCESS

Mr.Pakkapong Ngeywijit

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003


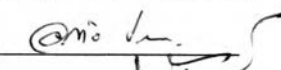
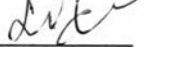
ISBN 974-17-4555-9

ภาคพงศ์ เสงยวิจิตร : การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี.
 (HEAVY METALS REMOVAL IN COD WASTEWATER USING ELECTROCHEMICAL PROCESS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์ , อ.ที่ปรึกษา (ร่วม) : ผศ.บุญยง โสฬังศ์วัฒน์ ,156 หน้า , ISBN 974-17-4555-9.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี การทดลองได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน ได้แก่ โครเมียม เงิน และปรอท ในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง (เจือจาง 10 เท่า) โดยศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักดังกล่าว ซึ่งจะใช้ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมและค่าใช้จ่ายเบื้องต้นเป็นเกณฑ์ในการหาสภาวะที่เหมาะสม ตลอดจนศึกษาถึงน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่สลายไปและชนิดของสารประกอบในตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัด

ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยน้ำเสียซีไอดีเจือจางมีปริมาณโครเมียม เงิน และปรอทเริ่มต้นเท่ากับ 49.8 223.1 และ 354.2 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจางให้เท่ากับ 3 ใช้แผ่นเหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำการบำบัดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 3.91 แอมแปร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้มีปริมาณโครเมียม เงิน และปรอทเหลืออยู่ในน้ำเท่ากับ 0.04 0.27 และ 0.0047 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการกำจัดโลหะหนักในงานวิจัยนี้จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 14,370 บาท / ลบ.ม.ของน้ำเสียซีไอดีเข้มข้น หรือเท่ากับ 1.15 บาท / ตัวอย่างซีไอดี ซึ่งค่าใช้จ่ายดังกล่าวส่วนใหญ่อยู่ละ 90 เป็นค่าสารเคมีที่ใช้ปรับพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น (โซเดียมไฮดรอกไซด์)

ผลการทดลองนี้ยังพบว่า เมื่อทำการบำบัดที่สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมีการสลายตัวของแผ่นเหล็กจากขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งเมื่อนำตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดภายใต้สภาวะนี้ไปวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) จะพบสารประกอบ 3 ชนิด คือ maghemite (Fe₂O₃) , goethite (FeO(OH)) และ thenardite (Na₂SO₄)

ภาควิชา	<u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u>	ลายมือชื่อนิสิต	<u></u>
สาขาวิชา	<u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u>	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	<u></u>
ปีการศึกษา	<u>2546</u>	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม)	<u></u>

4370434621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : ELECTROCHEMICAL / COD WASTEWATER / HEAVY METALS

PAKKAPONG NGEYWIJIT : HEAVY METALS REMOVAL IN COD WASTEWATER USING
ELECTROCHEMICAL PROCESS . THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.ORATHAI
CHAVALPARIT. THESIS CO - ADVISOR : ASSIST.PROF.BOONYONG LOHWONGWATTANA.
156 pp. ISBN 974-17-4555-9.

The objective of this research was to study the optimum conditions for heavy metals removal in COD wastewater using the electrochemical process. Factors that effects the effectiveness of Cr, Ag and Hg removal in diluted COD wastewater prepared from diluting 10 times of real COD wastewater with demineral water were measured, which included the type of electrode, the initial pH wastewater, the electrical potential difference level, the average electrical current, and the operation time. In addition, the electrode consumptions and the main compounds of the precipitated sludge occurred from the reaction were also studied. The criteria used for determining the optimum conditions were based on the effluent standards of the Ministry of Industry and the preliminary expense.

The results from this study showed that the electrochemical process could effectively remove Cr, Ag and Hg in diluted COD wastewater under the conditions of low pH (pH=3), using iron plates as anode and cathode, the electrical potential difference level was 2 volts, the average electrical current was 3.91 amperes, and the operation time was 1 hour. Under these conditions, the concentrations of Cr, Ag and Hg in diluted COD wastewater were decreased to 0.04, 0.27 and 0.0047 mg/l, respectively, from the initial concentrations of 49.8, 223.1 and 354.2 mg/l, respectively. In addition, the preliminary expense for the heavy metals removal of real COD wastewater in this study was about 14,370 baht / m³ or 1.15 baht / COD sample . And ninety percent of the expense was used for pH neutralization of initial COD wastewater by sodium hydroxide.

The results from this study also demonstrated that, under the above optimum conditions, the iron electrode plates were lost during reaction . The X-ray diffractometric analysis of the precipitated sludge in the electrochemical process revealed the three main compounds of the precipitated sludge to be maghemite (Fe₂O₃) , goethite (Fe(OH)) and thenardite (Na₂SO₄)

Department Environmental Engineering
Field of study Environmental Engineering
Academic year 2003

Student 's signature Pakkapong .
Advisor 's signature Orathai Chavalparit
Co - advisor 's signature B. Lohwongwatana

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของบุคคลต่างๆ หลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังนี้

รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด รวมทั้งให้กำลังใจเมื่อมีปัญหาต่างๆ เกิดขึ้นในการทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โฉ่ห้วงศ์วัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำชี้แนะ ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่สามารถเป็นประโยชน์กับงานวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความถูกต้องและครบถ้วนมากยิ่งขึ้น

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้

คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ช่วยอบรมสั่งสอนและให้ความรู้

คุณจันทวรรณ (พี่ปอง) เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการปริญญาโท ที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจ และอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

คุณนิอร อิศระภิญโญ ที่ได้ช่วยในการพิมพ์และตรวจสอบรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา โดยเฉพาะในยามที่มีปัญหา และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คุณณัฐ ดิลกเกียรติ ที่ช่วยให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น และให้กำลังใจเสมอ เมื่อมีปัญหาในการทำงานวิจัยนี้

ขอบคุณพี่ต๊อก จุน นึก พี่ตี๋ น้องอ้อง น้องต่าย ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา – มารดา พี่ชายและพี่สาว ที่ช่วยอบรมสั่งสอนเลี้ยงดู ให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ ตลอดจนสนับสนุนในด้านการเงินมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ซีไอดี	4
2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของซีไอดี	4
2.1.2 การวิเคราะห์ค่าซีไอดี	5
2.1.3 ลักษณะน้ำเสียซีไอดี	7
2.2 เทคโนโลยีในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	7
2.2.1 การทำให้เป็นกลาง	10
2.2.2 การสร้างตะกอนผลึกทางเคมี	10
2.2.3 การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน	11
2.2.4 ออกซิเดชันและรีดักชัน	12
2.2.5 การแลกเปลี่ยนไอออน	12
2.2.6 รีเวอร์ส ออสโมซิส	12
2.2.7 การระเหย	13
2.2.8 อิเล็กโตรไดอะไลซิส	13
2.2.9 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า	13
2.2.10 การดูดติดผิว	13

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2.11 การบำบัดโดยจุลินทรีย์	14
2.3 กระบวนการไฟฟ้าเคมี	14
2.3.1 การแยกสลายด้วยไฟฟ้า	15
2.3.2 หลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมี	18
2.3.3 ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี	28
2.3.4 ดัชนีที่มีผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี	30
2.3.5 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี	34
2.3.6 การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย	36
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดี	39
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	43
3. แผนการดำเนินการวิจัย	47
3.1 แผนการทดลอง	47
3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย	48
3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	49
3.4 การดำเนินการทดลอง	50
3.4.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจาง ...	50
3.4.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	52
3.4.3 การทดลองที่ 3 การทดลองระบบบำบัดน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการ ไฟฟ้าเคมี โดยศึกษาน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่สลายไปตามชนิดของ ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม และศึกษาชนิดของสารประกอบในตะกอน ที่เกิดขึ้นจากการบำบัด	59
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์	62
4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจาง ต่อการตกตะกอนของโลหะหนัก	62
4.1.1 ปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ	63

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.1.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อปริมาณโลหะหนักที่เหลือใน น้ำเสียซีไอดีเจือจาง	65
4.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	66
4.2.1 ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า และค่าพีเอชเริ่มต้น	66
4.2.2 ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา	94
4.2.3 ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัด	109
4.2.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิด	113
4.3 การทดลองที่ 3 การทดลองระบบบำบัดน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการ ไฟฟ้าเคมี โดยศึกษาน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่สลายไปตามชนิดของ ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม และศึกษาชนิดของสารประกอบในตะกอน ที่เกิดขึ้นจากการบำบัด	115
4.3.1 ศึกษาน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่สลายไป	115
4.3.2 ศึกษาชนิดของสารประกอบในตะกอนที่เกิดขึ้น	117
4.3.3 การนำระบบไฟฟ้าเคมีไปใช้งานจริง	119
4.4 กลไกในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	120
4.4.1 กลไกการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์	121
4.4.2 กลไกการตกตะกอนของโลหะหนักกับสารประกอบเชิงซ้อน	122
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	124
5.1 สรุปผลการทดลอง	124
5.2 ข้อเสนอแนะ	125

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง	126
ภาคผนวก	131
ภาคผนวก ก. รูปแสดงเครื่องมือ อุปกรณ์ และผลการทดลอง	132
ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น	136
ภาคผนวก ค. เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ของ งานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา	141
ภาคผนวก ง. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)	146
ภาคผนวก จ. การเปลี่ยนขนาดของขั้วไฟฟ้า	150
ภาคผนวก ฉ. ตัวอย่างการคำนวณ	152
ภาคผนวก ช. ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่ขั้วแคโทด	154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	156

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้กับขนาดตัวอย่างต่าง ๆ.....	6
2.2 การประมาณความเข้มข้นของเงิน โปรท โคโรเมียม และเหล็ก ในการวิเคราะห์ซีไอดี	8
2.3 ลักษณะของน้ำเสียซีไอดีของงานวิจัยที่ผ่านมา	8
2.4 ความหมายของเครื่องหมายของ	19
2.5 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโตรดที่ 25 องศาเซลเซียส	21
4.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง	63
4.2 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	67
4.3 ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและสุดท้ายที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	71
4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	72
4.5 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	76
4.6 ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและสุดท้ายที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	80
4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	81
4.8 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับขั้วเหล็กและเหล็ก	85
4.9 ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและสุดท้ายที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับขั้วเหล็กและเหล็ก ..	89
4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก สำหรับขั้วเหล็กและเหล็ก	89
4.11 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์	95
4.12 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์	96
4.13 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์	97
4.14 ปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัด	105
4.15 ปริมาณเงินที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัด	106
4.16 ปริมาณโปรทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัด	108
4.17 สรุปลักษณะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม	110
4.18 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียซีไอดี	110
4.19 สรุปลักษณะที่เหมาะสมในการกำจัดเงิน	111
4.20 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดเงินในน้ำเสียซีไอดี	111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.21 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท	112
4.22 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดปรอทในน้ำเสียซีโอดี	112
4.23 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดในน้ำเสียซีโอดี	114
4.24 น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังการทดลอง	115
ข-1 ค่าใช้จ่ายสำหรับการให้บริการศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ	139
ค-1 ตารางแสดงปริมาณโลหะก่อนและหลังบำบัดรวมถึงปริมาณโลหะที่ถูกกำจัด ในงานวิจัยต่าง ๆ	143
ค-2 ตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีกับงานวิจัยต่าง ๆ ..	144
จ-1 การเปลี่ยนขนาดของขั้วไฟฟ้า	151

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแยกสลายด้วยไฟฟ้าของ NaCl ที่หลอมเหลว	16
2.2 การทำงานของเซลล์อิเล็กโทรลิติก	25
2.3 ตัวอย่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี	35
3.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	48
3.2 ผังการทดลองศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น	51
3.3 วิธีการทดลองที่ 2 ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้น และชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ..	54
3.4 วิธีการทดลองที่ 2 ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม	57
3.5 ผังการทดลองการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	61
4.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น	64
4.2 ปริมาณโลหะหนักที่เหลือกับค่าพีเอชเริ่มต้น	65
4.3 ค่าพีเอชเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	68
4.4 ค่าไออาร์พีเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	69
4.5 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	70
4.6 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	71
4.7 ปริมาณโครเมียมเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	73
4.8 ปริมาณเงินเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	74
4.9 ปริมาณปรอทเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	75
4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน	75
4.11 ค่าพีเอชเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	77
4.12 ค่าไออาร์พีเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	78
4.13 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	79
4.14 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	80
4.15 ปริมาณโครเมียมเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	82
4.16 ปริมาณเงินเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ปริมาณปรอทเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและคาร์บอน	84
4.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับซั้วเหล็กและคาร์บอน	84
4.19 ค่าพีเอชเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก	86
4.20 ค่าไออาร์พีเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก	87
4.21 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก	88
4.22 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก	88
4.23 ปริมาณโครเมียมเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก	90
4.24 ปริมาณเงินเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก	91
4.25 ปริมาณปรอทเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก	92
4.26 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก	92
4.27 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3	93
4.28 ค่าพีเอชของน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	98
4.29 ค่าไออาร์พีของน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	99
4.30 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	100
4.31 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายระบบกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	101
4.32 ค่าของแรงแวนลอยที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	102
4.33 ค่าอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	103
4.34 ปริมาณโครเมียมที่เหลือน้ำในน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	105
4.35 ปริมาณเงินที่เหลือน้ำในน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	107
4.36 ปริมาณปรอทที่เหลือน้ำในน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	109
4.37 ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบในตะกอนที่เกิดขึ้น จากการบำบัดด้วยเครื่อง XRD	118
ก-1 น้ำเสียซีไอดีเจือจางที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 3	133
ก-2 เครื่อง DC Power Supply Regulator	133
ก-3 Reactor ที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ขั้นตอนที่ 2	133

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-4 แผ่นเหล็กที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า	133
ก-5 ขั้วไฟฟ้าก่อนการทดลอง a) แอโนด b) แคโทด	134
ก-6 ขั้วไฟฟ้าหลังการทดลอง a) แอโนด b) แคโทด	134
ก-7 a) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี b) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี และตั้งทิ้งไว้ 30 นาที	135
ก-8 ตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	135