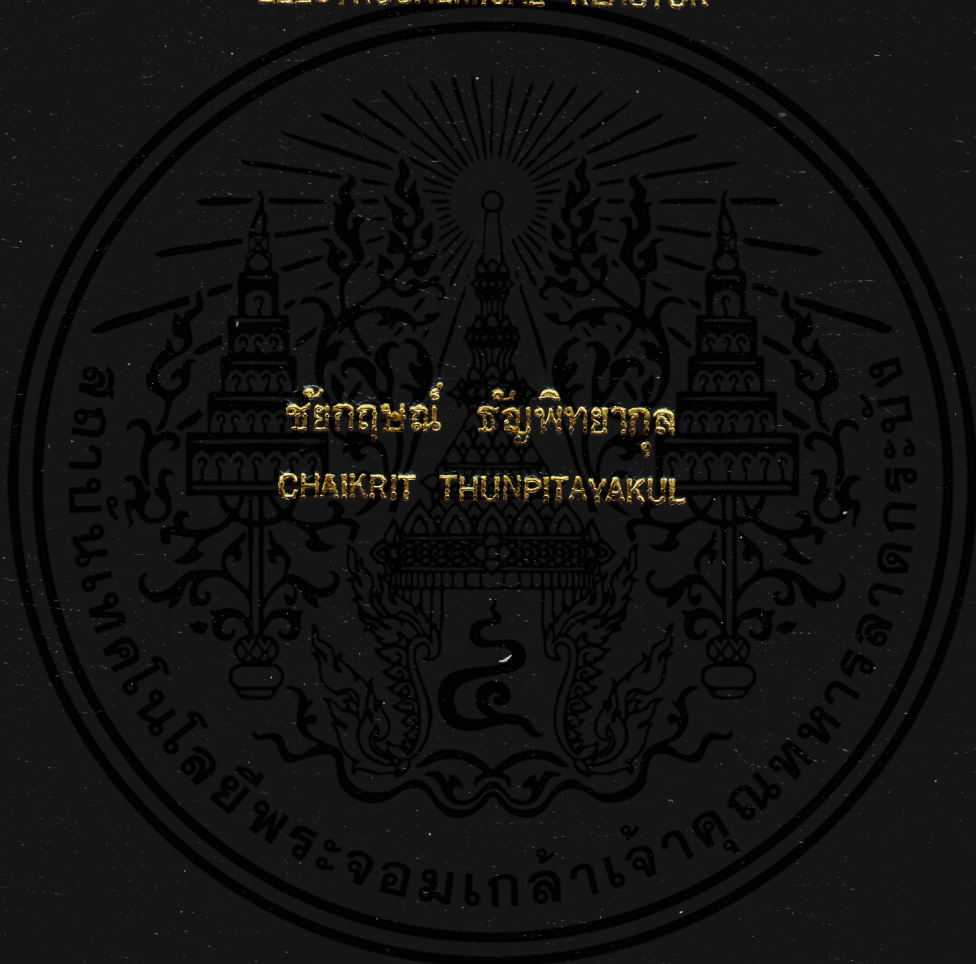


การนำโลหะทองแดงในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า

แบบหมุน

A RECOVERY OF COPPER FROM WASTEWATER BY A ROTARY
ELECTROCHEMICAL REACTOR



ชัยกฤษณ์ ธีรพิทยากุล
CHAIKRIT THUNPITAYAKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีประยุกต์

บัณฑิตศึกษาด้าน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-622-675-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การนำโลหะทองแดงในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า
แบบหมุน

A RECOVERY OF COPPER FROM WASTEWATER BY A ROTARY
ELECTROCHEMICAL REACTOR



ชัยกฤษณ์ ฐัญพิทยากุล

CHAIKRIT THUNPITAYAKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2543

ISBN 974-622-675-4

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 35172
วัน, เดือน, ปี..... 2 3 ส.ค. 2543

**A RECOVERY OF COPPER FROM WASTEWATER BY A ROTARY
ELECTROCHEMICAL REACTOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED CHEMISTRY**

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่พิมพ์พิเศษเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้

2000

ISBN 974-622-675-4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำโลหะทองแดงในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เครื่อง
	ปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน
นักศึกษา	นายชัชกฤษณ์ รัชฎพิทยากุล
รหัสประจำตัว	38064100
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์ (เคมีสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. เผอิญชัย ไชยสิทธิ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน เพื่อนำมาใช้กำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ อาศัยพื้นฐานจากเซลล์ชนิดที่มีขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ โดยขั้วแคโทดเป็นโลหะทองแดงกลางขนาดเล็ก และ ขั้วแอโนดเป็นท่อโลหะสแตนเลส สภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงซัลเฟต ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงคือ 60 นาที ใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลาง 10000 ลูกที่สภาวะพีเอช 0.7 โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าในวงจรให้เท่ากับ 19.0 แอมแปร์ ในการทดสอบการกำจัดไอออนของทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงซัลเฟต ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 117.3 และ 1002.0 พีพีเอ็ม เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดจะมีไอออนของทองแดงเหลืออยู่เฉลี่ยเท่ากับ 0.7 และ 4.3 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.42 และ 99.59 ตามลำดับ น้ำหนักทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดเมื่อทดสอบกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม คิดเป็นร้อยละ 90.20 ส่วนการทดสอบกับน้ำเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมหุบเขาลือบผิวด้วยโลหะ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 99.97 และ 871.5 พีพีเอ็ม เมื่อผ่านกระบวนการบำบัด จะมีไอออนของทองแดงเหลืออยู่เฉลี่ยเท่ากับ 0.75 และ 2.3 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.25 และ 99.74 ตามลำดับ น้ำหนักทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดเมื่อทดสอบกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม คิดเป็น

ร้อยละ 67.11 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Recovery of Copper From Wastewater by a Rotary Electrochemical Reactor
Student	Mr. Chaikrit Thunpithayakul
Student ID.	38064100
Degree	Master of Science
Programme	Applied Chemistry
Year	2000
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pachernchai Chaiyasith
Thesis Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Aree Wichianchai

ABSTRACT

The objective of this research is the study, design and construction of a Rotary Electrochemical Reactor. The reactor was constructed to remove copper ions from wastewater based on the design of Moving-Cathode Cells. The components of the electrodes were the cathode, made of circular copper pieces, and the anode, made of a stainless steel pipe. The reactor was used to find the best conditions in removing copper ions from a water sample. In this experiment, the water was a copper sulfate solution, having the initial copper ions concentration of 1000 ppm. The results showed the suitable time for removing copper ions to be 60 minutes, the number of circular copper pieces 10000, pH 0.7, and the cell current 19.0 amperes. For further test to remove copper ions from two more copper sulfate solutions, the average copper ions concentration was reduced from 117.3 and 1002.0 ppm to 0.7 and 4.3 ppm respectively, corresponding to 99.42 and 99.59 % of copper ions being treated and 90.20 % of copper ions were recovered for the test with the average initial copper ion concentration of 1002.0 ppm. In the case of wastewater obtained from an electroplating factory, the average copper ions concentration was reduced from 99.97 and 871.5 ppm to 0.75 and 2.3 ppm respectively, corresponding to 99.25 and 99.74 % of copper ions being treated and 67.11 % of copper ions were recovered for the test with the average initial copper ions concentration of 871.5 ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาเกี่ยวกับหลักการทางเคมีไฟฟ้า รวมถึงแนวทาง และ วิธีการแก้ปัญหาจาก ผศ.ดร. เมษิณชัย ไชยสิทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และจาก รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ศักดา ไตรศักดิ์ รศ. อรุณี กงศักดิ์ไพศาล อ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ อ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวทางการแก้ไขปัญหา และตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เป็นไปอย่างถูกต้อง รวมถึงช่วยประสานงานกับหน่วยงานต่างๆ ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยเข้าใจในงานวิทยานิพนธ์ และทำให้เกิดความคล่องตัวในการทำวิทยานิพนธ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ปรีชา เทียนสมประสงค์ ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี และ ผศ.ดร. ปรีชา युพาพิน อ. ธวัชชัย ขาวประเสริฐ ที่ได้ให้คำแนะนำ และ แนะนำวิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆ ทางไฟฟ้า ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้ความเข้าใจในอุปกรณ์นั้นๆ ได้อย่างถูกต้อง เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ อ. สาโรจน์ พรรคแพร ที่ได้แนะนำแนวทางบางประการ และให้ความอนุเคราะห์นำเสียอุตสาหกรรมจากโรงงานชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ เพื่อนำมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณจรินทร์ โพธิไชยะ และ คุณชำนาญ จันทร์ชุ่ม ที่ได้ช่วยจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์ และช่วยซ่อมแซมเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ จนทำให้งานวิทยานิพนธ์ดำเนินไปจนเป็นผลสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจสอบข้อผิดพลาดในการเขียนวิทยานิพนธ์ และในการเสนอผลงานวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่เคารพรักยิ่ง ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนต่อผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชัชกฤษณ์ ธัญพิทยากุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ประโยชน์ที่จะได้รับ	7
1.3 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา	7
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	7
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	8
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.2.1 การพัฒนาทาง โครงสร้างทางกายภาพของเซลล์ไฟฟ้า	17
2.2.2 การพัฒนาทางเคมี	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	28
3.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	28
3.2 การออกแบบ และสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน	28
3.3 ทดสอบการใช้งาน และประเมินผล	42
3.4 สรุป และรายงานผล	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล	63
4.1 ผลการศึกษาวัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นขั้วอิเล็กโทโรด และตัวนำกระแสไฟฟ้า	63
4.1.1 วัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นขั้วอิเล็กโทโรด	63
4.1.2 วัสดุที่เหมาะสมจะใช้เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์	63
4.2 ผลการศึกษากิจกรรมของตัวแปร ที่มีต่อการกำจัดไอออนของทองแดง ออกจากร้าน้ำเสียสังเคราะห์.....	63
4.2.1 ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของ ทองแดงในน้ำเสีย.....	63
4.2.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง	66
4.2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)	69
4.2.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า	71
4.2.5 ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด	73
4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจากร้าน้ำเสีย	75
4.3.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง ออกจากร้าน้ำเสียสังเคราะห์	75
4.3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง ออกจากร้าน้ำเสียอุตสาหกรรม	77
บทที่ 5 วิจัยผลการทดลอง	79
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	85
6.1 สรุปผลการวิจัย	85
6.2 ข้อเสนอแนะ	87

เอกสารอ้างอิงที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	92
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง	93
ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าต่าง ๆ	141
ภาคผนวก ข. คำจำกัดความ	152
ภาคผนวก ค. ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งอุตสาหกรรม	153
ภาคผนวก ค. หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	154
ภาคผนวก ฉ. สาเหตุที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี	161
ภาคผนวก ง. กระบวนการบำบัดโลหะหนักวิธีการอื่นๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ	165
ภาคผนวก จ. การเกิดขึ้นได้เองของปฏิกิริยา	169
ภาคผนวก ฉ. การส่งผ่านมวล	172
ภาคผนวก ช. กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรไลซิส	174
ภาคผนวก ช. หน้าที่ของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)	176
ภาคผนวก ฉ. การชุบเคลือบผิวด้วยโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิม และการสึกกร่อน	177
ภาคผนวก ญ. โลหะหนักทองแดง	179
ภาคผนวก ฎ. ค่าใช้จ่ายในงานวิทยานิพนธ์	184
ภาคผนวก ฎ. ข้อมูลโรงงาน	185
ประวัติผู้เขียน	194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ	2
1.2 แสดงช่วงของความเข้มข้นของโลหะหนักในโรงงานชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ	3
1.3 แสดงความสามารถในการทนต่อระดับความเป็นพิษของโลหะหนัก และสารประกอบโลหะหนัก ในสิ่งมีชีวิต	4
2.1 แสดงศักย์ไฟฟ้าเกินตัวของก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยใช้ขั้วชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C	14
4.1 แสดงระยะเวลาที่เหมาะสม ที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดง ในน้ำเสีย	64
4.2 แสดงระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม	66
4.3 แสดงระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม	67
4.4 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัด ออกจากน้ำเสียไอออนของทองแดง	69
4.5 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย	71
4.6 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่มีผลต่อการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย	73
4.7 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจาก น้ำเสียสังเคราะห์	75
4.8 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจาก น้ำเสียอุตสาหกรรม	77
ก.1 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัด ไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.2 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2	95
ก.3 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3	96
ก.4 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	97
ก.5 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1	98
ก.6 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2	99
ก.7 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3	100
ก.8 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	101
ก.9 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 (ไม่ใช่กรดซัลฟูริก) ในการทดลองครั้งที่ 1	102
ก.10 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 (ไม่ใช่กรดซัลฟูริก) ในการทดลองครั้งที่ 2	103

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด เว้นแต่ได้รับอนุญาตให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.24 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	110
ก.25 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 1	111
ก.26 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 2	112
ก.27 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 3	112
ก.28 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	113
ก.29 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 1	113
ก.30 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 2	114
ก.31 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 3	114
ก.32 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อ การกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.33 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 1	115
ก.34 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 2	116
ก.35 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 3	116
ก.36 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	117
ก.37 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 500 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1	118
ก.38 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 500 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2	119
ก.39 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 500 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3	119
ก.40 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 500 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	119
ก.41 แสดงผลการศึกษาระดับประถมศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย มุกดาหาร ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้ให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.42 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2	121
ก.43 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3	121
ก.44 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	122
ก.45 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 4000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1	122
ก.46 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 4000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2	123
ก.47 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 4000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3	123
ก.48 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 4000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	124
ก.49 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 6000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1	124
ก.50 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 6000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้จัดทำขอสงวนสิทธิ์ในคำคัดค้านเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.51 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 6000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3	125
ก.52 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 6000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	126
ก.53 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 8000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1	126
ก.54 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 8000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2	127
ก.55 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 8000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3	127
ก.56 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 8000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	128
ก.57 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 10000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1	128
ก.58 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 10000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2	129
ก.59 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 10000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้มิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.60 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 10000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	130
ก.61 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1	131
ก.62 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2	132
ก.63 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3	132
ก.64 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	133
ก.65 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1	134
ก.66 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2	134
ก.67 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3	135
ก.68 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	135

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.69 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1	136
ก.70 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2	137
ก.71 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3	137
ก.72 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	138
ก.73 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1	139
ก.74 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2	139
ก.75 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3	140
ก.76 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง	140
ญ.1 แสดงข้อมูลศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน(Standard Electrode Potentials)ของทองแดง...	181
ฎ.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่มีทองแดงระหว่าง ไม่ว่ากรณีใดวิธีทางเคมีไฟฟ้ากับวิธีทางเคมี ...	184
ฎ.1 แสดงข้อมูลประเภทโรงงานอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วย โลหะ	185

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจน	10
2.2 แสดงเซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolytic Cell)	11
2.3 แสดงกราฟของกระแส และศักย์ไฟฟ้าในการทำอิเล็กโทรไลซิส สารละลายของทองแดง	14
2.4 แสดง Plate-in-Tank Cell	17
2.5 แสดง Plate-and-Frame Cell	18
2.6 แสดง Turbulence-Promoted Electrolyte	19
2.7 แสดง Fluidized-Bed-Electrode	20
2.8 แสดง Concentric Cathode Cell	21
2.9 แสดง Falling-Film Cell	22
2.10 แสดง Vertically Moving Particle Bed Electrode	23
2.11 แสดง Eco-Cell	24
2.12 แสดง Impact Rod Reactor	24
2.13 แสดง Moving-Particle-Electrode Reactor ของ Barrel Cell	25
2.14 แสดง Vertically Moving Particle Bed Reactor	26
3.1 แสดงเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน	29
3.2 แสดงตัวเซลล์	29
3.3 แสดงขั้วแคโทด (โลหะทองแดงกลวง)	30
3.4 แสดงขั้วแอโนด (ท่อโลหะสแตนเลส)	30
3.5 แสดงระบบพินเฟือง	30
3.6 แสดงมอเตอร์	31
3.7 แสดงท่อพลาสติกพีวีซี	32
3.8 แสดงรูเจาะที่กลางท่อพลาสติกพีวีซี	32
3.9 แสดงวงแหวนพลาสติกพีวีซี และการต่อเชื่อม	32
3.10 แสดงแผ่นยางกันซึม และการต่อเชื่อม	33
3.11 แสดงแผ่นสแตนเลสที่ม้วนเป็นวงกลม	33
3.12 แสดงรูเจาะที่กลางแผ่นสแตนเลสที่ม้วนแล้ว	33
3.13 แสดงวงแหวนสแตนเลส และการต่อเชื่อม	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงการสวมสเดนเลสที่เชื่อมเรียบร้อยแล้วเข้ากับท่อพลาสติกพีวีซี	34
3.15 แสดงการต่อเชื่อมระหว่างแผ่นยางกันซึม กับท่อพลาสติกพีวีซี ที่สวมสเดนเลสแล้ว	35
3.16 แสดงการต่อเชื่อมระหว่างแผ่นพลาสติกพีวีซีเข้ากับท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 9.)	36
3.17 แสดงการต่อเชื่อมท่อสเดนเลสเข้ากับท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 10.)	36
3.18 แสดงตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า	37
3.19 แสดง Breaker	37
3.20 แสดงตัวไดโอด	38
3.21 แสดงตัวเก็บประจุ	38
3.22 แสดงตัววัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter) และศักย์ไฟฟ้า (Voltmeter)	39
3.23 แสดงสายไฟ	40
3.24 แสดงแผ่นสปริง	40
3.25 แสดงแผ่นสเดนเลส	41
3.26 แสดงขั้นตอนการประกอบชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับตัวเซลล์	41
4.1 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออน ของทองแดงในน้ำเสีย เมื่อทดลองเป็นเวลา 15 นาที	64
4.2 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออน ของทองแดงในน้ำเสีย เมื่อทดลองเป็นเวลา 30 นาที	65
4.3 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม	67
4.4 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม	68
4.5 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย	70
4.6 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ โลหะทองแดงกลวง ที่มีผลต่อการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสีย	75
4.8 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม	76
4.9 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม	76
4.10 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียอุตสาหกรรม มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม	78
4.11 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียอุตสาหกรรม มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม	78
ค.1 แสดงการชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า	154
ค.2 แสดงขั้นตอนการชุบ โลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย	155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากการพัฒนาประเทศในปัจจุบัน เน้นหนักไปทางด้านอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น โรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ได้เกิดขึ้นมากมาย เพื่อแปรรูปวัตถุดิบและผลิตสินค้า ทำให้มีของเสีย และมลพิษต่างๆ ออกมาจากขบวนการการผลิตเพิ่มมากขึ้นด้วย หากไม่มีการวางระบบจัดการดูแลอย่างถูกต้อง อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์ได้

ปัจจุบันการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ เป็นอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว การชุบเคลือบผิวถือเป็นขบวนการผลิตขั้นสุดท้ายของชิ้นงาน เช่น การตกแต่งอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรม ให้มีความสวยงาม คงทน และเพื่อเพิ่มมูลค่าของชิ้นงาน [1]

จากข้อมูลโรงงานที่ได้จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พบว่าปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวจำนวนทั้งสิ้น 112 โรงงาน (ข้อมูลเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2542 คุรยละเอียดในภาคผนวก ก.) ประเภทของการชุบเคลือบผิวที่พบมาก ได้แก่ การชุบทองแดง นิกเกิล โครเมียม สังกะสี อลูมิเนียม เงิน และการชุบนิกเกิล 2 ชั้น ส่วนใหญ่โรงงานจะชุบชิ้นงานเพื่อจำหน่ายเอง รองลงมาเป็นโรงงานรับจ้างชุบ ประเภทอุตสาหกรรมที่ผ่านขบวนการชุบเคลือบผิวมากที่สุดคือ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ รองลงมาคือ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุปกรณ์ในครัวเรือน ภาชนะบนโต๊ะอาหาร เครื่องมือหุงต้ม อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์พลาสติก เป็นต้น [2]

ในกระบวนการชุบเคลือบผิว มักจะมีน้ำเสียออกมาด้วยเสมอ ซึ่งมาจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน และ น้ำมัน
2. น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และ กำจัดสนิม
3. น้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา
4. น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
5. น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และ บริเวณสถานที่

มลพิษที่ปล่อยออกมาในปริมาณสูงได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมัน และ ไขมัน จะมีน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นด่างออกมา น้ำเสียจากขั้นตอนการจุ่มเงา และ กำจัดสนิม จะมีน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดออกมา น้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยาจะมีน้ำเสียที่มีโลหะหนัก และ ไซยาไนด์ออกมา ส่วนน้ำเสียเนื่องจากน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่นานๆ

จะเกิดขึ้นสักครั้ง น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และ บริเวณสถานที่ จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ และมีปริมาณไม่มากนัก [3]

ปริมาณ และ ลักษณะน้ำเสียที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิว จะแตกต่างกันไปในแต่ละโรงงาน ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของโรงงาน รูปแบบการจับชิ้นงาน วิธีในการล้างชิ้นงาน และหลักการชุบ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 [4]

ตารางที่ 1.1 แสดงลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ

โรงงาน	ชนิดของโลหะหนัก	อัตราการไหล (cu.m/d)	pH	ของแข็งละลาย (mg/l)	ของแข็งแขวงลอย (mg/l)	โลหะหนัก (ppm)				CN (ppm)
						Cu	Zn	Ni	Cr	
1	Cr, Ni, Cu, Zn	4	3.2	1410	110	8.2	14.2	10	2.6	19.7
2	Cr, Ni, Cu, Zn	33	7.4	483	67	2.9	40	6	8.9	3.2
			4.5	2580	158	1	35.5	1.6	-	0.5
3	Cr, Ni, Cu	8	7.7	707	8	-	-	-	60	24
			8	583	12	-	-	0.22	2.8	2.4
4	Cr, Ni, Cu	4	6.1	864	244	21.5	-	14.3	7.5	-
5	Cr, Ni, Cu	2	7.1	462	84	0.9	-	1.9	0.9	10.3
6	Ni, Cu, Zn	10	8.9	1722	320	10.7	54	7	47	86.6
7	Cr, Ni, Cu	4.5	7.6	574	200	5.7	-	20.5	2.2	14
8	Cr, Ni, Cu	2	6.7	272	264	1.1	-	5.7	19.4	3.8
9	Cr, Ni, Cu	4	7.1	658	520	0.2	-	8.9	26.3	0.5
10	Cr, Ni, Cu	3	7.2	1218	280	0.4	-	25.6	8	1.4
11	Cr, Ni, Cu	2	7.4	264	160	0.7	-	0.6	0.2	-
12	Cr, Ni, Cu	3	6.7	1823	507	1.9	-	104	39.5	-
13	Cr, Ni, Cu, Zn	6	6	1470	1050	0.8	156	33.6	31.4	25.8
14	Cr, Ni, Cu, Zn	2	7.3	864	72	0.9	2.8	18.1	16.6	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จะเห็นได้ว่าน้ำเสียที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิว มักจะมีโลหะหนัก ที่ใช้เป็นตัวชุบ ซึ่งปริมาณที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักที่ใช้ และปริมาณน้ำที่ใช้เป็นวัตถุดิบ จากกระบวนการชุบเคลือบผิวปนเปื้อนมากับน้ำเสียอยู่เสมอ ซึ่งส่วนใหญ่มาจาก 2 แหล่งคือ [5]

1. ถังน้ำยาที่ใช้สูบ

2. การล้างทำความสะอาดชิ้นงานโดยใช้น้ำยาต่าง และ กรด

ซึ่งช่วงความเข้มข้นของโลหะหนักโดยทั่วไป ที่ออกมาคือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิว ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.2 [6]

ตารางที่ 1.2 แสดงช่วงของความเข้มข้นของโลหะหนักในโรงงานชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ

มลสาร	ความเข้มข้น (ppm)
โครเมียม	0.25 – 2,600
ทองแดง	0.74 – 75
นิกเกิล	0.07 – 125
สังกะสี	0.12 – 140
ตะกั่ว	0.45 – 20
เหล็ก	0.17 – 300

ดังนั้นหากไม่มีขบวนการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียอย่างถูกต้อง อาจก่อให้เกิดผลเสียดังนี้

ประการแรก เป็นการสูญเสียโลหะหนักที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ในกระบวนการผลิตไปโดยเปล่าประโยชน์

ประการที่สอง ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม เนื่องจากความเป็นพิษของโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย ทำให้สิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรมลง กล่าวคือ

1. ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติเกิดมลพิษ น้ำเสีย ไม่สามารถนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภคได้

2. ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ทั้งสัตว์น้ำ และรวมถึงมนุษย์ด้วย

3. ผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์

3.1 เกิดการขาดแคลนอาหารเนื่องจากห่วงโซ่อาหารในน้ำถูกทำลาย

3.2 เกิดผลกระทบต่อการประกอบอาชีพของมนุษย์ที่อาศัยแหล่งน้ำท่ามาหากิน

3.3 โรคร้ายต่างๆ ขึ้นกับชนิดของโลหะหนัก [7], [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.3 แสดงความสามารถในการทนต่อระดับความเข้มข้นของโลหะหนัก และ สารประกอบโลหะหนัก ในสิ่งมีชีวิต [9]

Element / Compound	Biologic Purification	Self - Purification	Crustacean	Fish	Mammal	Man
$Al_2(SO_4)_3$	-	-	136	1.8 (trout)	12 g/kg	-
Ag-Compounds	-	-	0.01 - 0.03	0.003 - 0.1	-	(0.05 mg/l chron.)
As-Compounds	> 0.7	-	4 - 9.1	1 - 23	2 - 15 mg/kg	2 mg/kg (0.05 mg/l chron.)
$BaCl_2$	1000	-	83 - 1500	0.15 - 8.3 g/l	30 - 500 mg/kg	3.3 - 8.3 mg/kg
$BeSO_4$ (Be)	-	-	-	1.3 (sunfishes)	-	-
H_2BO_3	-	-	-	0.2 (others)	-	-
$CdCl_2$ (Cd)	1 - 5	0.1	0.03 - 0.4	1 - 10 g/l	1 - 5.1 g/kg	5 - 20 g
Co-Compound (Co)	-	5	(0.5) protozoa	30 (trout)	0.07 - 0.15 mg/kg	5 - 500 mg/kg
Chromate [Cr(VI)]	-	-	0.3 - 0.7	0.01 - 0.1	0.7 - 1.5 g/kg	50 - 500 mg/kg
$Cr_2(SO_4)_3$ (Cr)	2 - 5	0.3	0.03 - 0.1	0.015 - 0.195	(0.45 - 1.1 mg/l chron.)	0.5 - 5 g/kg
$CuSO_4$ (Cu)	1	0.01	0.08 - 0.8	1.2 - 200	-	-
				0.03 - 0.8 (trout)	(8g)	(8g)

ตารางที่ 1.3 (ต่อ)

Element / Compound	Biologic Purification	Self - Purification	Crustaccan	Fish	Mammal	Man
FeSO ₄ (Fe)	> 35	Fe-deposits	1.62 - 152	0.9 - 152	0.5 - 5 g/kg	0.5 - 5 g/kg
HgCl ₂ (Hg)	-	0.018	0.03 - 0.1	0.15 - 0.25 (trout)	(0.1 - 1 g)	-
Mn-Compounds (Mn)	-	-	0.5 - 1 g/l	0.05 - 1.2 g/l	-	0.5 - 5 g/kg
Ni-compounds (Ni)	6	0.1	0.0055 - 1 g/l	0.8 - 55	-	50 - 500 mg/kg
Pb(NO ₃) ₂ (Pb)	5	-	3 - 170	0.33 - 200 (trout)	2 g/kg	-
Se-Compounds	-	-	(183) protozoa	2 - 10.5	(5 - 10 mg/l chron.)	(0.01 mg/l chron.)
Sn-Compounds	-	-	-	2	-	-
ZnSO ₄ (Zn)	1 - 3	0.1	19.4	1 - 5 (trout)	1.9 - 2.2 mg/kg	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย อาจก่อให้เกิดพิษในมนุษย์ และสิ่งมีชีวิต ดังนี้ [7], [8]

1. ทองแดง (Cu)

ทำให้เกิดโรค Wilson Disease เกิดขึ้นเนื่องจากมีระดับทองแดงสะสมอยู่ในร่างกายมาก กรณีที่เกิดอุบัติเหตุ ทำให้อวัยวะได้รับทองแดงเข้าไปมาก ซึ่งจะเกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลันคือ อาเจียน ท้องร่วง ปัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจทำให้เสียชีวิตได้

2. โครเมียม (Cr)

สารประกอบของโครเมียมประจุบวกหก ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง ไอกรดโครมิกเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

3. นิกเกิล (Ni)

นิกเกิล และ นิกเกิลคาร์บอนิล ที่ใช้เป็นสารประกอบในการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ และสัตว์ การแพร่กระจายของนิกเกิลในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง

4. สังกะสี (Zn)

จัดเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจะเกิดพิษต่อร่างกาย ทำให้เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการผุกร่อนของเยื่อทางเดินอาหาร ไตไม่ทำงาน โลหิตจาง ช็อค และอาจทำให้เสียชีวิตได้

โดยทั่วไปการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ที่เกิดจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิว นิยมใช้กระบวนการบำบัดโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (กระบวนการบำบัดคูลในภาคผนวก ข.) หลังจากผ่านกรรมวิธีการบำบัด ไอออนของโลหะหนักในน้ำทิ้ง (น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว) จะเปลี่ยนรูปเป็นตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ ตะกอนที่ได้จะนำไปฝังกลบ ซึ่งถ้าการฝังกลบทำไม่ถูกวิธี อาจทำให้โลหะหนักถูกชะออกมาปนเปื้อนกับแหล่งน้ำธรรมชาติ เกิดเป็นมลพิษขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมให้กลับคืนดังเดิม นอกจากนี้การฝังกลบยังต้องใช้เนื้อที่มาก ทำให้สูญเสียพื้นที่ที่มีประโยชน์ไป และเป็นการสูญเสียโลหะหนักที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการชุบเคลือบผิวไปโดยเปล่าประโยชน์อีกด้วย

ดังนั้นวิธีการบำบัดน้ำเสีย โดยไม่มีโลหะหนักตกค้างอยู่ในธรรมชาติ ที่จะก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาพแวดล้อม เหมือนกับวิธีบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนทางเคมี แล้วยังได้โลหะหนักที่ได้จากกระบวนการกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก จึงนับเป็นจุดเริ่มต้นของโครงการวิจัยนี้

โครงการวิจัยนี้เป็นอีกแนวทางหนึ่ง ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักในรูปของไอออน โดยการจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุนที่ใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้า นำมาใช้กำจัดไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยจะศึกษาน้ำเสียที่มีไอออนของทองแดงปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากโลหะทองแดงมักจะใช้ในการชุบเคลือบผิวชิ้นแรกของชิ้นงาน ก่อนที่จะนำไปชุบโลหะที่ต้องการอยู่เสมอ เพื่อป้องกันชิ้นงานเสียหาย และเพื่อให้ชิ้นงานมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น

1.2 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. สามารถลดความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย เพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในระดับที่ต่ำ และสามารถนำโลหะทองแดงที่ได้จากกระบวนการกลับมาใช้ประโยชน์
2. สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือ และ เซลล์ไฟฟ้า ในระดับสูงต่อไปเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศให้ทัดเทียมกับเทคโนโลยีของต่างประเทศ
3. ช่วยรักษาสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ

1.3 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน ที่อาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า นำมากำจัดไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสีย (น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงซัลเฟต และ น้ำเสียอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิว) เพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในระดับที่ต่ำ
2. ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสีย ได้แก่ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง ค่าความเป็นกรด - ด่าง (พีเอช) ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด เพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีไอออนของทองแดงเหลืออยู่น้อยที่สุด
3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง ของเครื่องปฏิกรณ์ประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ และนำหนักทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม)
4. เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นใช้เองในประเทศ และรักษาสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุนที่ใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้า โดยเลือกใช้เซลล์ชนิดที่มีขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ (Moving-Cathode Cell) ซึ่งมีขั้วแคโทดทำจากโลหะทองแดงกลวง (Hollow Cathode-Pipe) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ยาว 0.5 เซนติเมตร และขั้วแอโนดทำจากท่อโลหะสแตนเลส (Stainless Steel Pipe) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร และ สร้างชุดจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เซลล์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นมาทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสียคือ

2.1 ระยะเวลาที่เหมาะสม ที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดง ทำการศึกษาที่ระยะเวลา 15 และ 30 นาที

2.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง ทำการศึกษาทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2.3 ค่าความเป็นกรด – ด่าง (พีเอช) ทำการศึกษาที่ พีเอช 4.5 (ไม่เติมกรดซัลฟูริก) พีเอช 3.0, พีเอช 1.0 และ พีเอช 0.7

2.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ทำการศึกษาเมื่อมีกระแสไฟฟ้า 8, 13 และ 19 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า

2.5 ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ทำการศึกษาเมื่อมีปริมาณโลหะทองแดงกลวง 500, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000 ลูก

โดยมีอัตราการหมุนตัวเซลล์ถังที่ 10.5 รอบต่อนาที ทำการศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมที่ทำให้ไอออนของทองแดงถูกกำจัดออกจากรน้ำเสียได้มากที่สุด

3. นำค่าตัวแปรที่เหมาะสม มาทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงโดยทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ และ น้ำเสียอุตสาหกรรม (จากมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารธนบุรี ภาควิชาเคมี) ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 100 และ 1000 พีพีเอ็ม เพื่อควาไอออนของทองแดงจะเหลืออยู่ในน้ำทิ้งเท่าใด แล้วหาประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ และ โลหะทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม)

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. การออกแบบ และ สร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน
3. การทดสอบการใช้งาน และ ประเมินผล
4. สรุป และ รายงานผล

บทที่ 2

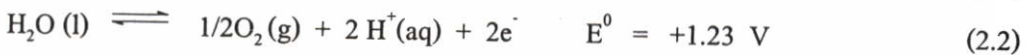
ทฤษฎี และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน โดยอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) เคมีไฟฟ้าเป็นวิชาที่ว่าด้วยการศึกษาปรากฏการณ์ทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับไฟฟ้าใน 2 ลักษณะ คือการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เรียกว่า เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) หรือเซลล์โวลตาอิก (Voltaic Cell) ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ [10] และการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเคมี หรือกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่อาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก เราเรียกกระบวนการเช่นนี้ว่า อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ตัวอย่างเช่น กระบวนการกำจัดน้ำด้วยไฟฟ้าหรือกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะเกิดขึ้นเมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกเข้าไปในสารละลาย แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือเรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Oxidation-Reduction or Redox Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารที่ใช้ทำปฏิกิริยากัน หรือเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ออกซิเดชันสเตต (Oxidation State) ของธาตุต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงไป ออกซิเดชันสเตต หมายถึงจำนวนประจุไฟฟ้าประจำตัวของอนุภาค (อะตอม โมเลกุล และไอออน) เช่น Na^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} และ Cl_2 เป็นต้น [11] ตัวอย่างของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ในโครงการวิจัยนี้ คือกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสของสารละลายทองแดงซัลเฟต [12]

ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

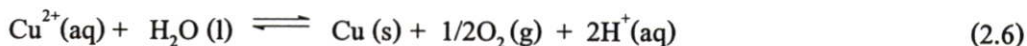


ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเนื้อหาไปใช้

ระหว่างการทำอิเล็กโทรไลซิส พบว่าเกิดแก๊สออกซิเจนขึ้นที่ขั้วแอโนด และมีโลหะทองแดงไปเกาะที่ขั้วแคโทด แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง คือปฏิกิริยาที่ (2.2) และ (2.3) ดังนั้นปฏิกิริยาของเซลล์ คือ

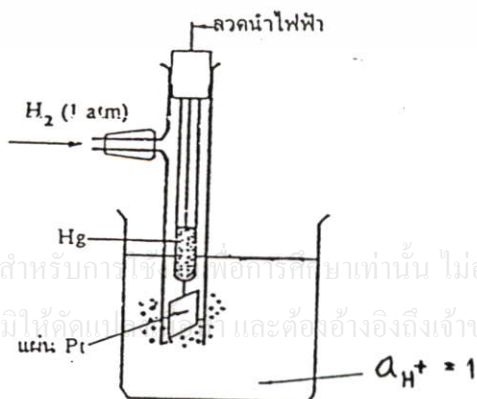


ปฏิกิริยาของเซลล์ในโครงการนี้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารที่ใช้ทำปฏิกิริยา น้ำถูกออกซิไดซ์หรือเสียอิเล็กตรอนไปเป็นแก๊สออกซิเจน โดยมีออกซิเดชันสเตรตเปลี่ยนจาก -2 ไปเป็น 0 และ Cu^{2+} ถูกรีดิวซ์ หรือรับอิเล็กตรอนไปเป็นโลหะทองแดง แสดงว่าออกซิเดชันสเตรตถูกเปลี่ยนจาก $+2$ ไปเป็น 0 [11]

อิเล็กโทรไลต์ของสารละลายทองแดงซัลเฟต น้ำถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่า SO_4^{2-} ส่วน Cu^{2+} ถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าน้ำ

จากตัวอย่างของปฏิกิริยา (2.2) และ (2.3) แต่ละปฏิกิริยาเรียกว่า ครึ่งปฏิกิริยา (Half Reaction) สมการที่(2.2) เป็นครึ่งปฏิกิริยาเคมีที่มีการให้อิเล็กตรอน เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนสมการที่(2.3) เป็นครึ่งปฏิกิริยาเคมีที่มีการรับอิเล็กตรอน เรียกว่าปฏิกิริยารีดักชัน

ค่า E^0 ในสมการต่างๆ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (Standard Reduction Potential) ค่า E^0 ของครึ่งเซลล์ใดๆ ก็ตาม เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของครึ่งเซลล์นั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐาน (Standard Electrode Potential, SHE) ปัจจุบันกำหนดให้อิเล็กโทรดไฮโดรเจน (รูปที่2.1) เมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน (คือผ่านแก๊สไฮโดรเจนที่มีความดัน 1 บรรยากาศ ลงไปในสารละลายที่มีลวดแพลตทินัม (Pt) จุ่มอยู่ และสารละลายนั้นมีไฮโดรเจนไอออนที่มีแอกติวิตี 1 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ที่ทุกอุณหภูมิ ศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจน



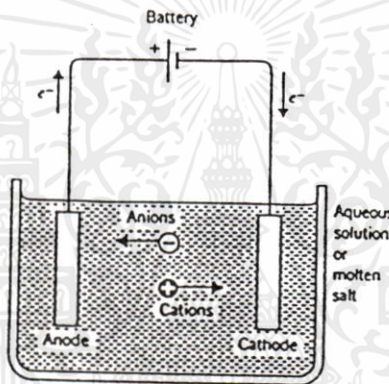
รูปที่ 2.1 แสดงอิเล็กโทรดไฮโดรเจน

E^0 ของแต่ละครึ่งเซลล์จะใช้ประโยชน์ในการบ่งบอกว่า ปฏิกิริยาของเซลล์จะเกิดอะไรขึ้นบ้าง [11]

ปฏิกิริยาที่เกิดที่ขั้วแอโนด จากสมการค่า E^0 ของน้ำต่ำกว่าค่า E^0 ของ SO_4^{2-} บ่งบอกว่าน้ำรับอิเล็กตรอนได้เร็วกว่า SO_4^{2-} คือมีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ดีกว่า SO_4^{2-} ดังนั้นที่ขั้วแอโนดจะมีแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้น [11]

ปฏิกิริยาที่เกิดที่ขั้วแคโทด จากสมการค่า E^0 ของ Cu^{2+} มากกว่า E^0 ของน้ำ บ่งชี้ว่า Cu^{2+} รับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าน้ำ ดังนั้นที่ขั้วแคโทดจะมีการเกาะของโลหะทองแดงที่ขั้ว

ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส สารละลายที่นำไฟฟ้าได้ เรียกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เรียกว่าเซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolytic Cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงเซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolytic Cell)

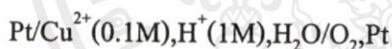
เซลล์อิเล็กโทรไลซิสประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก อิเล็กโทรด (ขั้วแคโทด และ ขั้วแอโนด) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ เรียกว่าขั้วแอโนด อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่ เรียกว่าขั้วแคโทด เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรดพบว่าไอออนบวก (Cation) ในสารละลายจะวิ่งไปหาขั้วแคโทด และไอออนลบ (Anion) จะวิ่งไปหาขั้วแอโนด การนำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออน เมื่อไอออนบวกเคลื่อนที่ถึงขั้วแคโทด ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้น โดยที่ขั้วแคโทดมีอิเล็กตรอนเหลือเพื่อ ไอออนบวกจะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด ดังนั้นที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เป็นปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอน ขณะเดียวกันที่ขั้วแอโนดหรือขั้วที่ขาดแคลนอิเล็กตรอน ไอออนลบจะเคลื่อนที่ไปให้อิเล็กตรอนแก่ขั้วแอโนด เพราะฉะนั้นที่ขั้วแอโนด จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือปฏิกิริยาที่ให้อิเล็กตรอน สารละลายจะนำไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ครบเท่าที่ยังเกิดปฏิกิริยาเคมีอยู่ [13]

ไม่ว่ากรณีใดๆ อิเล็กตรอนที่ไอออนลบให้กับขั้วบวก จะวิ่งออกจากขั้วบวกผ่านวงจรภายนอกเข้าสู่ขั้วลบ จะเห็นได้ว่าการนำไฟฟ้าจะมีอิเล็กตรอนไหลผ่านเส้นลวดที่อยู่ภายนอก แต่ภายในสารละลาย การนำไฟฟ้าจะอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนบวก และไอออนลบ ตลอดเวลาที่ไอออนเคลื่อนที่

หรือเกิดปฏิกิริยาที่อิเล็กโทรด ระบบจะต้องรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าเสมอ ทุกครั้งที่ไอออนลบหนึ่งไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ไอออนบวกหนึ่งไอออนจะต้องเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบทันทีที่อิเล็กโทรดทั้งสองก็เช่นกัน ทุกครั้งที่ไอออนลบให้อิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอนกับขั้วบวก จะต้องมียไอออนบวกที่ขั้วลบรับอิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอนทันทีเช่นกัน

การทำอิเล็กโทรไลซิสสารละลายที่ประกอบด้วยไอออนของโลหะต่างๆ ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์เพียงพอที่จะทำให้ไอออนเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ ไอออนเหล่านั้นจะเกิดการให้และรับอิเล็กตรอนแล้วเกิดเป็นโลหะอิสระเกิดขึ้น โลหะที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกาะที่ขั้วแคโทด ถ้ามีการขั้วก่อนที่จะมีโลหะมาเกาะกับภายหลังที่มีโลหะมาเกาะ ก็จะสามารถหาน้ำหนักของโลหะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสได้ [14]

การควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง เป็นสิ่งจำเป็นมากในการทำอิเล็กโทรไลซิส ถ้าในการทดลองให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากเกินไป จะทำให้ไอออนอื่นๆที่ไม่ต้องการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน แล้วเกิดเป็นโลหะเข้าเกาะที่ขั้ว ถ้าศักย์ไฟฟ้านั้นเพียงพอที่จะทำให้มันเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยการคำนวณตามทฤษฎีสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่จะทำให้ไอออนของโลหะที่ต้องการเกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นโลหะเกาะที่ขั้วได้[14] เช่นการทำอิเล็กโทรไลซิสไอออนของทองแดงโดยใช้ขั้วแพลตินัมเป็นขั้วอิเล็กโทรด พื้นที่ของขั้วแต่ละขั้วเท่ากับ 150 ตารางเซนติเมตร จุ่มในสารละลาย 0.10 M ของสารละลายไอออนของทองแดง จำนวน 200 มิลลิลิตร และมีความเข้มข้นของ H^+ เท่ากับ 1.00 M เกิดแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 1 atm ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสองมีดังนี้ [15]



ที่ขั้วแคโทด



ที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาของเซลล์



ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

$$\begin{aligned} E^0_{cell} &= E^0_{cathode} - E^0_{anode} \\ &= +0.34 - 1.23 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าจะด้วยวิธีการใดก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เท่ากับ $-0.89 V$

ตามสมการของเนิร์นสต์

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cell}}^{\circ} - \frac{0.059}{n} \log \frac{[\text{P}_{\text{O}_2}]^{\frac{1}{2}} [\text{H}^+]^2}{[\text{Cu}^{2+}]}$$

เมื่อ P_{O_2} คือ ความดันของแก๊สออกซิเจน

$$[\text{Cu}^{2+}] = 0.1 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 1 \text{ M}$$

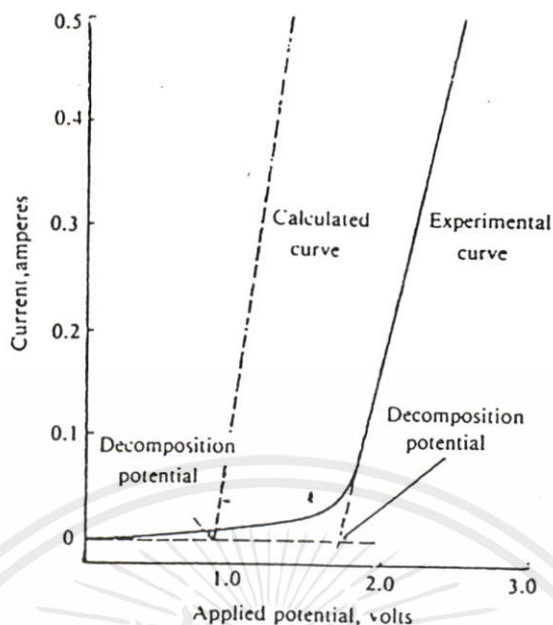
$$[\text{P}_{\text{O}_2}] = 1 \text{ atm}$$

n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเท่ากับ 2

$$\begin{aligned} E_{\text{cell}} &= -0.89 - \frac{0.591}{2} \log \frac{1}{0.1} \\ &= -0.89 - 0.03 \\ &= -0.92 \text{ V} \end{aligned}$$

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์มีค่าเป็นลบแสดงว่า ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเองไม่ได้ (ถ้าเป็นบวกปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองได้) (การเกิดขึ้นได้เองของปฏิกิริยาอยู่ในภาคผนวก จ.) เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อได้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ถ้าค่อยๆ เพิ่มศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายจากศูนย์ไปเรื่อยๆ ในระยะแรกกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ต่ำจนกระทั่งมีศักย์ไฟฟ้า 0.92 V จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างบนนี้ได้ [14] ซึ่งศักย์ไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ให้แก่เซลล์แล้วสามารถเกิดปฏิกิริยาตามที่ต้องการ เรียกว่าศักย์ไฟฟ้าแตกตัว หรือศักย์ไฟฟ้าสลายตัว (Decomposition Potential) ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าสลายตัวนี้ จะเป็นค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโทรด และสถานะอื่นๆ ด้วย ที่ศักย์ไฟฟ้าสลายตัวนี้จะเห็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด คือมีฟองแก๊สเกิดขึ้น ส่วนที่ขั้วแคโทดมีโลหะทองแดงมาเกาะ และจากนี้กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้น และเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ทำให้ลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง [12] แต่ในทางปฏิบัติต้องให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในเซลล์ให้มากขึ้นเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ โดยการให้ศักย์ไฟฟ้ามากกว่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี ดังรูปที่ 2.3 [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงกราฟของกระแส และศักย์ไฟฟ้าในการทำอิเล็กโทรไลซิสสารละลายของทองแดง

ตารางที่ 2.1 แสดงศักย์ไฟฟ้าเกินตัวของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยใช้ขั้วชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C

Electrode Composition	Overvoltage, V (Current Density 0.001 A/cm ²)		Overvoltage, V (Current Density 0.01 A/cm ²)		Overvoltage, V (Current Density 1 A/cm ²)	
	H ₂	O ₂	H ₂	O ₂	H ₂	O ₂
Smooth Pt	0.024	0.721	0.068	0.85	0.676	1.49
Platinized Pt	0.015	0.348	0.030	0.521	0.048	0.76
Au	0.241	0.673	0.391	0.963	0.798	1.63
Cu	0.479	0.422	0.584	0.580	1.269	0.793
Ni	0.563	0.353	0.747	0.519	1.241	0.853
Hg	0.9	-	1.1	-	1.1	-
Zn	0.716	-	0.746	-	1.229	-
Sn	0.856	-	1.077	-	1.231	-
Pb	0.52	-	1.090	-	1.262	-
Bi	0.78	-	1.05	-	1.23	-

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าที่คำนวณได้ จึงจะทำให้เกิดอิเล็กโทรไลซิสได้สมบูรณ์ ทั้งนี้เพราะภายในเซลล์ยังมีศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน หรือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overpotential หรือ Overvoltage) ซึ่งทำให้เกิดกระแส 1.5 แอมแปร์ และมีความต้านทานเกิดขึ้น 0.50 โอห์ม แสดงว่าความหนาแน่นของกระแสเท่ากับ 0.010 A/cm² (พื้นที่ของขั้ว

เท่ากับ 150 cm^3) จากตารางที่ 2.1 เมื่อใช้ขั้วแอโนดที่เรียบ และมีความหนาแน่นของกระแส 0.010 A/cm^2 จะมีศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเกิดขึ้น 0.85 V

$$\begin{aligned} E_{\text{appl}} &= E_{\text{cell(คำนวณได้)}} - E_{\text{overvoltage}} - IR_{\text{drop}} - E_j \\ &= -0.92 - 0.85 - (1.50 \times 0.50) - 0.00 \\ &= -2.52 \text{ V} \end{aligned}$$

ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีเท่ากับ -0.92 V แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์สูงถึง -2.52 V ในทางทฤษฎีเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์ยังไม่ถึงค่าศักย์ไฟฟ้าสลายตัวจะไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แต่จากเคอร์ฟที่ได้จากการทดลองจะเห็นได้ว่าจะปรากฏกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเล็กน้อยก่อนถึงศักย์ไฟฟ้าสลายตัว เนื่องจาก [15]

1. ในสารละลายมีสิ่งเจือปนที่สามารถถูกรีดิวส์ได้ง่ายกว่าไอออนของทองแดง ปนอยู่ เช่น ออกซิเจน และ Fe^{3+} เมื่อไอออนมลทินถูกรีดิวส์ที่ขั้วก็จะเกิดกระแสขึ้นได้

2. เกิดการรีดิวส์ของไอออนของทองแดงเอง จากการทดลองพบว่า Cu^{2+} จำนวนเล็กน้อยในสารละลายสามารถถูกรีดิวส์ได้ต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าสลายตัว

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้หลักอิเล็กโทรไลซิสโดยทั่วไป สาเหตุที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์ มากกว่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีจะได้กล่าวโดยละเอียดในภาคผนวก ข.

การทำอิเล็กโทรไลซิสในโครงการวิจัยนี้ จะมีทั้งการทำอิเล็กโทรไลซิสโดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้คงที่ และ การทำอิเล็กโทรไลซิสโดยควบคุมกระแสในวงจรให้คงที่

1. การทำอิเล็กโทรไลซิสโดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้คงที่

ในโครงการวิจัยนี้จะทำอิเล็กโทรไลซิสโดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้คงที่ เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง และอิทธิพลของปริมาณโลหะทองแดงกลางที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กับการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากราน้ำเสีย

การทำอิเล็กโทรไลซิสโดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้คงที่นั้น พบว่าทำให้ภายในเซลล์ไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลง 2 ประการคือ

1.1 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ในโครงการวิจัยนี้ เมื่อเวลาในการทดลองผ่านไปพบว่าความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียจะลดลง ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเพิ่มขึ้นดูรายละเอียดของปรากฏการณ์การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นในภาคผนวก ข. ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้านลดลง การลดลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาเป็นไปตามสมการ Exponential คือ

$$i_t = i_0 e^{-kt}$$

i_t คือปริมาณกระแสไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป

i_0 คือกระแสไฟฟ้าตอนเริ่มต้น

t คือเวลา เป็น วินาที

กระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 2-3 นาที หลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ การคนสารละลาย และการแพร่ไม่เพียงพอที่จะนำไอออนของทองแดงจากสารละลายไปยังผิวของขั้วแคโทด ในอัตราที่เพียงพอต่อการรักษากระแสไฟฟ้าให้คงที่ได้ กระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการถ่ายเทมวลของไอออนของทองแดง จากสารละลายไปยังผิวของขั้วไฟฟ้า อัตราเร็วนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในสารละลายเหลืออยู่น้อยมาก

1.2 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด

การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด อาจมีผลทำให้มลพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในสารละลายเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสได้

2. การทำอิเล็กโทรไลซิสโดยควบคุมกระแสในวงจรให้คงที่

ในโครงการวิจัยนี้จะทำอิเล็กโทรไลซิสโดยควบคุมกระแสในวงจรให้คงที่ เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสีย และทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงของเครื่องปฏิกรณ์ ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และ น้ำเสียอุตสาหกรรม

การทำอิเล็กโทรไลซิสโดยควบคุมกระแสในวงจรให้คงที่ ทำได้โดยการปรับระดับของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ตลอดเวลาที่ทำอิเล็กโทรไลซิส เพราะเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณกระแสไฟฟ้าจะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียนั้นลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการทำให้กระแสไฟฟ้าคงที่ไม่ว่าความเข้มข้นของน้ำเสียจะลดลงไปเท่าใดก็ตาม สามารถทำได้โดยการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์ [15]

ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยหลักการของอิเล็กโทรไลซิส ต้องมีการควบคุมสภาวะต่างๆ เนื่องจากมีผลต่อการเกาะของโลหะที่ขั้วเช่น คุณสมบัติของโลหะ ส่วนประกอบของน้ำเสีย ความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย (พีเอช) ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะในน้ำเสีย ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า การกวนน้ำเสีย (เพิ่มการส่งผ่านมวล (Mass Transport) (การส่งผ่านมวลครายละเอียดในภาคผนวก ฉ.) พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด เหล่านี้ จะทำให้การทำอิเล็กโทรไลซิสเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ [14]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันหลักการอิเล็กโทรไลซิส ได้มีการพัฒนาในหลายๆด้านทั้งทางโครงสร้างทางกายภาพของเซลล์ไฟฟ้า และทางเคมี

2.2.1. การพัฒนาทางโครงสร้างทางกายภาพของเซลล์ไฟฟ้า

2.2.1.1 Plate – in – Tank Cell [16]

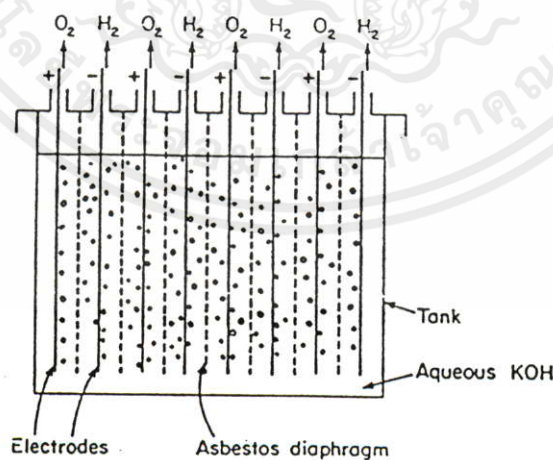
เป็นเซลล์ที่มีขั้วอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นแผ่น (Plate) โดยมีขั้วแคโทด และ ขั้วแอโนด เรียงอยู่สลับกันและขนานกัน ในแท็งก์ (Tank) มีเยื่อ Asbestos อยู่ระหว่างขั้วแคโทด และ ขั้วแอโนด เพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดผสมกับแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดวางอยู่ชิดกันมีพื้นที่ผิวมาก และเนื่องจากขั้วไฟฟ้าอยู่ชิดกันทำให้ใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำ ภายในแท็งก์มีการกวนสารละลายเพื่อเพิ่มการส่งผ่านมวล

ข้อดี

1. สร้างได้ง่าย
2. มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ (Metal Removal Efficiency) สูงที่อัตราการไหลต่ำ

ข้อเสีย

1. มีการสะสมตัวของโลหะที่ขั้วแคโทดเร็วทำให้ต้องเปลี่ยนขั้วแคโทดบ่อย
2. ใช้เวลานาน ดังนั้นเซลล์ชนิดนี้จึงเหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นโลหะน้อย ๆ



รูปที่ 2.4 แสดง Plate – in – Tank Cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 Plate – and – Frame Cell [16]

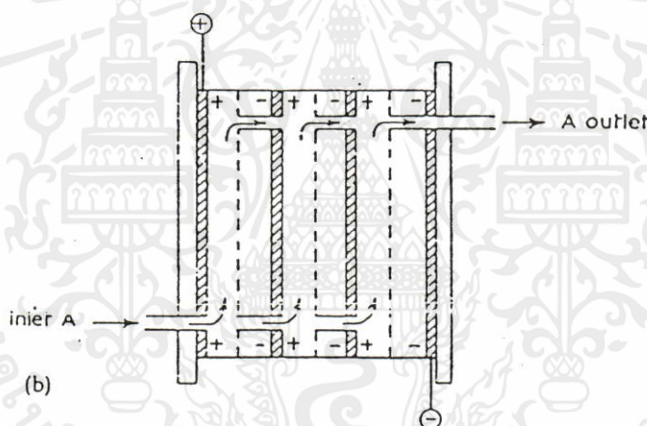
เป็นเซลล์ที่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วแคโทด ขั้วแคโทดมีลักษณะเป็นรูพรุน (Porous) เรียกว่า Pack-Bed-Electrode ขั้วแอโนดทำจากแผ่นกราไฟต์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะไหลจากด้านล่างของตัวเซลล์ด้วยความเร็วสูงผ่านเข้าสู่เซลล์ แล้วผ่านออกทางด้านบนของตัวเซลล์ เป็นเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูง

ข้อดี

1. สร้างได้ง่าย
2. มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วแคโทด

ข้อเสีย

มีการสะสมตัวของโลหะที่ขั้วแคโทดเร็วทำให้ต้องเปลี่ยนขั้วแคโทดบ่อย



รูปที่ 2.5 แสดง Plate – and – Frame Cell

2.2.1.3 Turbulence – Promoted Electrolyte [16]

ภายในเซลล์ประกอบไปด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วอิเล็กโทรดที่เรียกว่า Plastic-Mesh Turbulence-Promoter มีลักษณะเป็นตาข่ายโลหะขยายที่มีขั้วแอโนด และขั้วแคโทด วางสลับกันไป ขั้วทั้งสองก้ำจัดกันอยู่ด้วยวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า

ข้อดี

1. สามารถบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะได้ดี เพื่อนำโลหะกลับมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

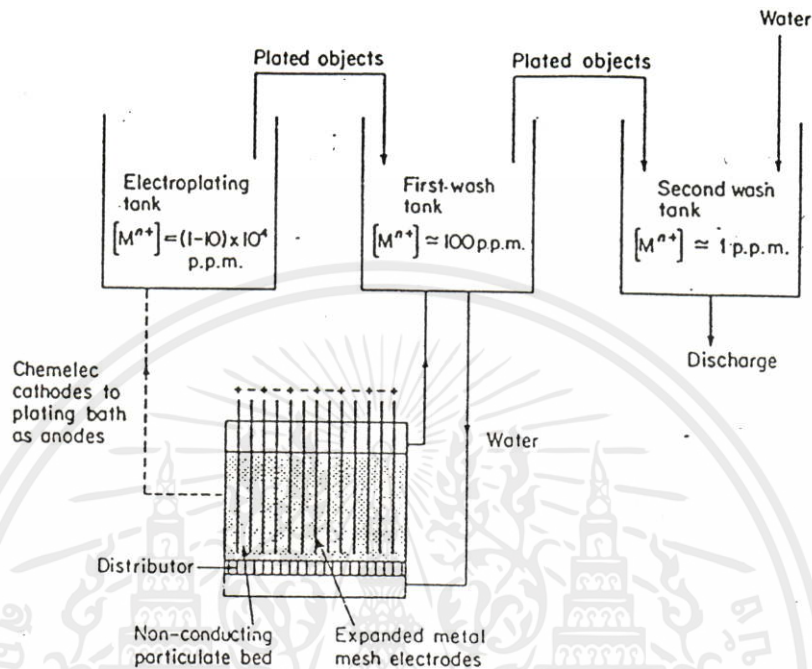
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อัตราการส่งผ่านมวลสูง

ข้อเสีย

ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ
มลพิษกรรมต่อลิตร

ขีดต่ำสุดของโลหะที่จะบำบัดคือ 50



รูปที่ 2.6 แสดง Turbulence - Promoted Electrolyte

2.2.1.4 Fluidized - Bed - Electrode [16]

เป็นเซลล์ที่มีขั้วแคโทดทำจากโลหะขนาดเล็ก กระจายตัวอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วแอโนดวางตัวในแนวตั้ง มีการทำงานอย่างต่อเนื่องโดยการเติมขั้วแคโทดทางด้านบนของเซลล์ ขณะที่ขั้วแคโทดที่มีโลหะเกาะจะกำจัดตัวออกทางด้านล่างของเซลล์

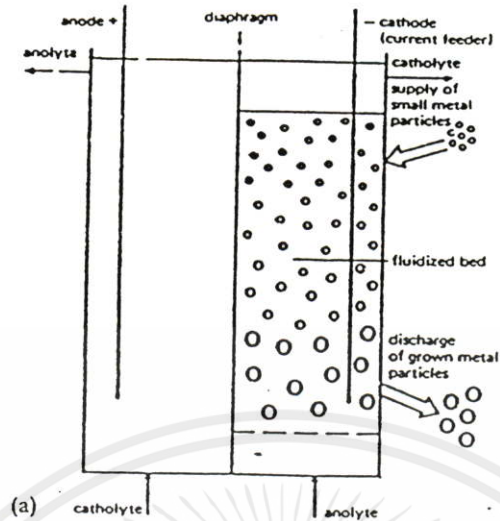
ข้อดี

1. มีอัตราการยึดจับโลหะสูง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรมาก
2. สารละลายสัมผัสกับขั้วได้อย่างทั่วถึง
3. อัตราการส่งผ่านมวลสูง

ข้อเสีย

ขั้วแคโทดมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นก้อน โดยเฉพาะบริเวณที่ขั้วแคโทดหยุดนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดง Fluidized – Bed – Electrode

2.2.1.5 Concentric Cathode Cell [16]

เป็นเซลล์ที่ใช้งานง่าย มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะสูง ออกแบบให้มีการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในลักษณะที่เป็นการช่วยเพิ่มการส่งผ่านมวลให้มากขึ้น ส่วนใหญ่นำมาใช้ในการกำจัดโลหะมีค่าในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิว การทำโลหะให้บริสุทธิ์ และกำจัดเงินจากน้ำล้างฟิล์มถ่ายรูป (Photographic Silver Recovery)

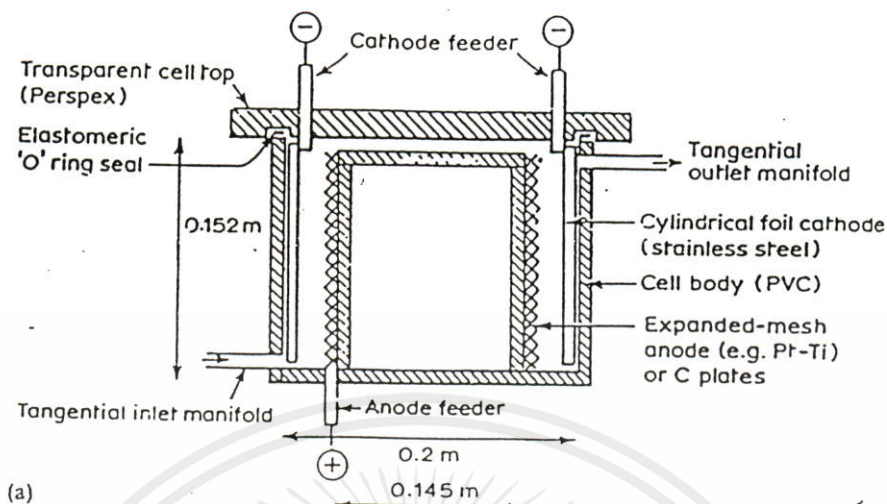
ข้อดี

1. ออกแบบง่าย
2. การกำจัดโลหะที่เกาะที่ขั้วแคโทดทำได้ง่าย

ข้อเสีย

มีการสะสมตัวของโลหะที่ขั้วแคโทดเร็วทำให้ต้องเปลี่ยนขั้วแคโทดบ่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดง Concentric Cathode Cell

2.2.1.6 Falling – Film Cell [17]

J. LEGRAND, J. M. MARRACINO, F. COEURET ได้คิดค้นเทคนิคการกำจัดทองแดงจากสารละลายที่มีไอออนของทองแดงเจือจาง โดยออกแบบเซลล์ให้สารละลายมีการไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรดตามแรงโน้มถ่วงของโลก ขั้วแคโทด และขั้วแอโนดวางห่างกันในระยะที่เหมาะสมบนผิวที่ลาดเอียง โลหะทองแดงจะถูกยึดเป็นแผ่นบางบนผิวที่ลาดเอียงนั้น

ข้อดี

1. สามารถบำบัดสารละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำได้ (Low Electrical Conductivity)

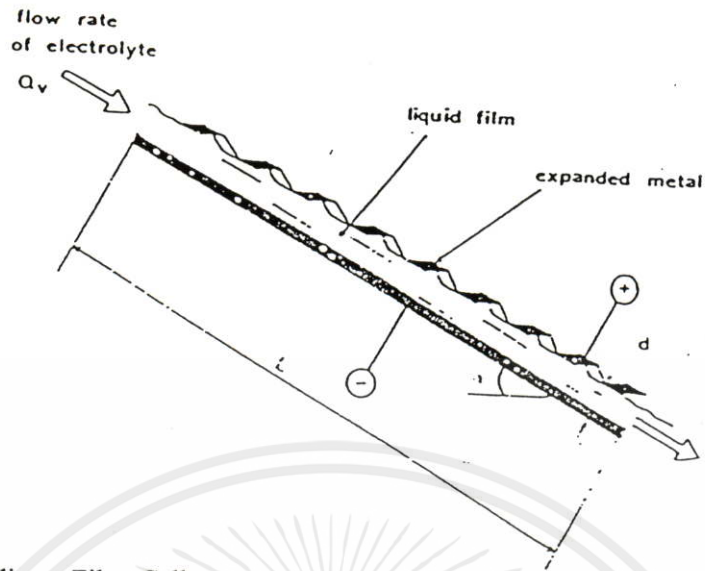
เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดน้อย

2. ออกแบบง่าย
3. ประหยัดพลังงาน

ข้อเสีย

ไม่สามารถบำบัดสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูงๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดง Falling – Film Cell

2.2.1.7 Vertically Moving Particle Bed Electrode [18]

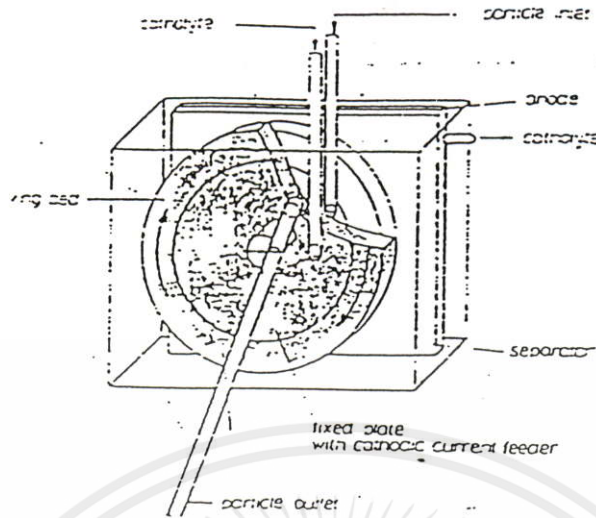
H. BERGMANN, K. HERTWIG, F. NIEBER ได้คิดค้นเครื่องมือจับโลหะจากน้ำเสีย
 เจือจาง เซลล์เป็นรูปทรงกระบอกที่หมุนได้ ประกอบด้วยขั้วแอโนดทำจากกราฟไฟต์หรือทิตาเนียม
 ขั้วแคโทดมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก มีระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดต่ำสุด

ข้อดี

1. สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะตั้งแต่ 0.1 ppm จนถึง 20 ppm
2. ประหยัดพลังงาน

ข้อเสีย

ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะอยู่สูง



รูปที่ 2.10 แสดง Vertically Moving Particle Bed Electrode

2.2.1.8 Moving – Cathode Cell [16]

เป็นเซลล์ที่มีขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ ภายในเซลล์ประกอบด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วแอโนดที่ทำจากแผ่นคาร์บอน หรือลูกโลหะ ขั้วแคโทดที่โดยปกติทำด้วยสแตนเลส เซลล์ชนิดนี้มีขนาดเล็ก มีหลายรูปแบบดังนี้

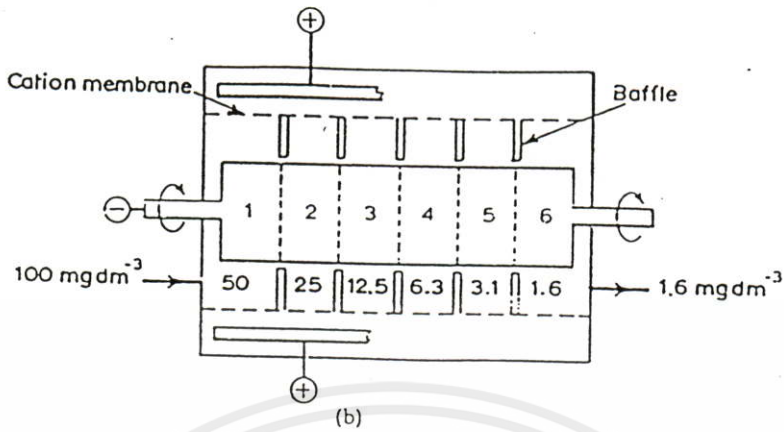
2.2.1.8.1 Eco – Cell

อาศัยพื้นฐานของเซลล์ที่มีขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ ภายในเซลล์ประกอบด้วย สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ ขั้วอิเล็กโทรด ขั้วอิเล็กโทรดอยู่ในส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอกที่แบ่ง ออกเป็นหลายส่วน ขั้วแคโทดที่มีลักษณะเป็นเยื่อที่เรียกว่า Cation-Exchange Membrane ที่มีพื้นผิว ขรุขระ และขั้วแอโนด สารละลายมีการไหลวนสูงเนื่องมาจากการหมุนของขั้วแคโทด สารละลาย อิเล็กโทรไลต์จะผ่านเข้าออกจากเซลล์ทางที่ว่างบริเวณที่ขนานกับแกนหมุน

ข้อดี

1. มีอัตราการกำจัดโลหะสูงเนื่องจากมีการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วแคโทด (พื้นที่ผิวที่ขรุขระ จะช่วยเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้มีอัตราการส่งผ่านมวลมากกว่าพื้นที่ผิวที่เรียบถึง 50 เท่า
2. สามารถลดความเข้มข้นของไอออนของทองแดงจาก 100 พีพีเอ็ม เหลือ 1-2 พีพีเอ็ม
3. ออกแบบง่าย
4. มีขนาดเล็ก
5. ใช้งานง่าย
6. ประหยัดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



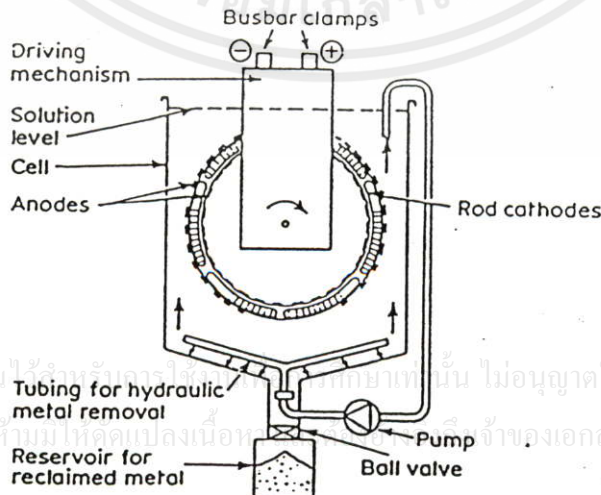
รูปที่ 2.11 แสดง Eco – Cell

2.2.1.8.2 Impact Rod Reactor

เป็นเซลล์ที่อาศัยพื้นฐาน Moving-Cathode Cell เช่นกัน ขั้วอิเล็กโทรดจะเคลื่อนที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นระยะๆ เป็นการเพิ่มอัตราการขีดยึดเกาะ ส่วนตะกอนโลหะจะตกลงสู่ก้นกรวยตรงด้านล่างของเซลล์

ข้อดี

1. ออกแบบง่าย
2. มีขนาดเล็ก
3. ใช้งานง่าย
4. ประหยัดพลังงาน



รูปที่ 2.12 แสดง Impact Rod Reactor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่หรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.8.3 Moving-Particle-Electrode Reactor ของ Barrel Cell

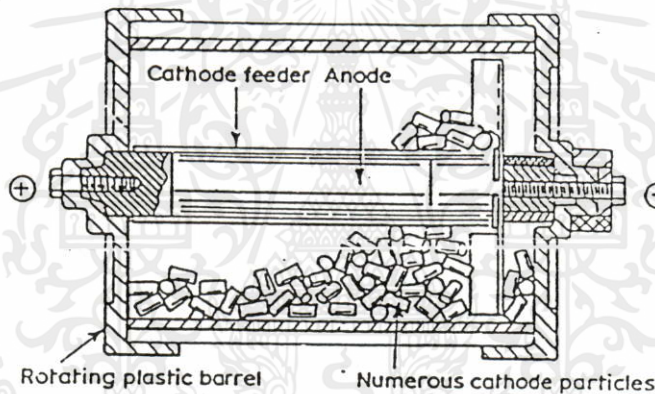
เป็นเซลล์ที่มีลักษณะทรงกระบอก ปลายด้านหนึ่งของเซลล์เป็นขั้วบวกหรือขั้วแอโนด อีกด้านหนึ่งเป็นขั้วลบหรือขั้วแคโทด ขั้วแคโทดมีขนาดเล็ก (Electroplate) และมีจำนวนมาก เป็นเซลล์ที่มักได้รับการติดตั้งในอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวอยู่เสมอ

ข้อดี

1. มีขนาดเล็ก
2. ใช้งานง่าย

ข้อเสีย

1. มีอัตราการส่งผ่านมวลน้อย
2. มีพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดต่อหน่วยปริมาตรค่อนข้างน้อย



รูปที่ 2.13 แสดง Moving - Particle - Electrode Reactor ของ Barrel Cell

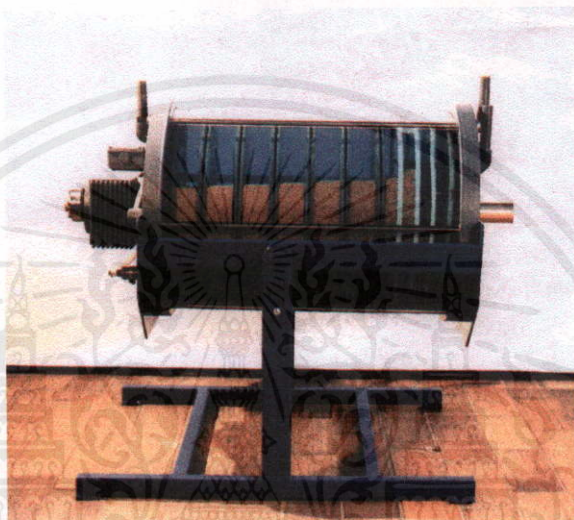
2.2.1.8.4 Vertically Moving Particle Bed Reactor [19]

Rittel ได้คิดค้นเซลล์ที่อาศัยพื้นฐานของ Moving-Cathode Cell เพื่อนำบัดโลหะหนักในสารละลาย เซลล์ได้รับการออกแบบมาให้สามารถหมุนได้โดยภายในเซลล์ประกอบด้วยสายละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วแคโทดที่มีลักษณะเป็นชั้นของอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก บรรจุอยู่ในถังเป็นชุดๆ และขั้วแอโนดวางเป็นแนวอยู่ระหว่างถัง ส่วนของถังต่อกันอยู่กับหลอดพิเศษที่ใช้สำหรับถ่ายเทอนุภาค สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และแก๊ส

ข้อดี

1. ขั้วแคโทดที่มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากนี้ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด ดังนั้นแม้สารละลายจะมีความเข้มข้นของโลหะอยู่น้อยมากก็สามารถกลายเป็นโลหะเกาะที่ขั้วแคโทดได้ จึงทำให้เซลล์นี้มีประสิทธิภาพดีกว่าเซลล์แบบอื่น
2. เซลล์ที่หมุนได้ ช่วยป้องกันการจับตัวของโลหะเป็นก้อนที่ผิวของอนุภาคแคโทด

3. สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง
4. ประหยัดพลังงาน
5. มีขนาดเล็ก กะทัดรัด
6. มีท่อสำหรับกำจัดแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์
7. มีอายุการใช้งานยาวนาน
8. มีการถ่ายเทอนุภาคแคโทดอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 2.14 แสดง Vertically Moving Particle Bed Reactor

2.2.2. การพัฒนาทางเคมี

2.2.2.1 Mass', M. และคณะ [20]

ทำการศึกษาการเกาะของทองแดงที่ขั้วแคโทดเมื่อมีแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้น โดยใช้เซลล์ Rotating Cylinder Electrode พบว่าปฏิกิริยาที่น้ำถูกออกซิไดซ์หรือสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด มีส่วนเกี่ยวข้องกับเกาะของทองแดง ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายจะลดลงเมื่อมีแก๊สออกซิเจนมากขึ้น นั่นคือจะมีโลหะทองแดงเกาะบนขั้วแคโทดมากขึ้น นอกจากนี้อัตราเร็วของการหมุนเซลล์ (Rotation Speed) ก็มีผลต่อการเกิดแก๊สออกซิเจนด้วย ถ้าเพิ่มอัตราเร็วของการหมุนเซลล์ แก๊สออกซิเจนก็จะเกิดมากขึ้น ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในสารละลายจะลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่อัตราเร็วของการหมุนเซลล์ต่ำจะต้องใช้เวลานาน ในการที่

เอกสารนี้เป็น จะทำให้ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงลดลง เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 ESREF, A. [21]

ศึกษาการนำโลหะทองแดงกลับมาใช้ใหม่จากสารละลายของทองแดง ที่อยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรม ศึกษาโดยใช้เซลล์ Rotating Tubular Bed Reactor พบว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วแคโทด และให้เวลาที่พอเหมาะ จะสามารถลดความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในสารละลายให้ลงไปอยู่ในระดับที่ต่ำ และได้โลหะกลับมาใช้ใหม่จำนวนมาก และถ้าใช้หลักการของอิเล็กโทรไลซิส แล้วต่อด้วยการบำบัดแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange Treatment) ก็จะสามารถลดความเข้มข้นของไอออนของทองแดงให้อยู่ในระดับส่วนในล้านส่วน (พีพีเอ็ม) ได้

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน ที่อาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า มากำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงอยู่สูง โดยเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุนที่สร้างขึ้น มีเซลล์ที่มีขั้วแคโทดที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หรือเซลล์ที่มีการหมุนของขั้วอิเล็กโทรด (Rotating Cylinder Electrode) ภายในเซลล์ประกอบด้วย ส่วนของขั้วอิเล็กโทรดที่ประกอบด้วย ขั้วแคโทดที่มีพื้นที่ผิวสูงทำจากโลหะทองแดงกลางขนาด เล็กจำนวนมาก และขั้วแอโนดทำจากท่อสแตนเลสและทำหน้าที่เป็นแกนหมุน (Electrode Movement) ของเซลล์ด้วย ในส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือน้ำเสียจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ประเภทแรก เป็นน้ำเสียที่มีไอออนของทองแดงซึ่งเตรียมขึ้นมาจากสารสังเคราะห์ทองแดงซัลเฟต เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย และเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ประเภทที่สอง เป็นน้ำเสียที่มีไอออนของทองแดงที่นำมาจากอุตสาหกรรมหุบเคลือบผิวด้วยโลหะ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยเนื้อหาทั้งหมดนี้จะกล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน ที่อาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า เพื่อกำจัดไอออนของทองแดงออกจากราน้ำเสียสังเคราะห์ และ น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงอยู่สูง เพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในระดับที่ต่ำ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 ศึกษาหลักพื้นฐานทางเคมีไฟฟ้า หลักการของกระบวนการทางอิเล็กโทรไลซิส เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการวิจัย

3.1.2 ศึกษารูปแบบเครื่องมือ และเซลล์ ชนิดต่างๆ ที่ใช้หลักการเดียวกัน เพื่อหาข้อดีและข้อเสีย

3.1.3 ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากราน้ำเสีย

3.2 การออกแบบ และ สร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน

เมื่อศึกษาจนได้รูปแบบเครื่องมือ และเซลล์ที่เหมาะสมแล้ว จะทำการออกแบบ และสร้างเครื่องมือ เรียกเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้ว่า เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแบบหมุน

ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

3.2.1 ตัวเซลล์

ตัวเซลล์ สร้างขึ้นโดยมีรูปแบบของขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ โดยตัวเซลล์ทำจากท่อพลาสติกพีวีซี ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ยาว 1 ฟุต ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ภายในเป็นส่วนของขั้วอิเล็กโทรด และน้ำเกลือ



รูปที่ 3.2 แสดงตัวเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของข้าวอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย

ข้าวแคโทด ทำจากโลหะทองแดงกลวงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ยาว 0.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3

ข้าวแอนด ทำจากท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร และทำหน้าที่เป็นแกนหมุนของเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

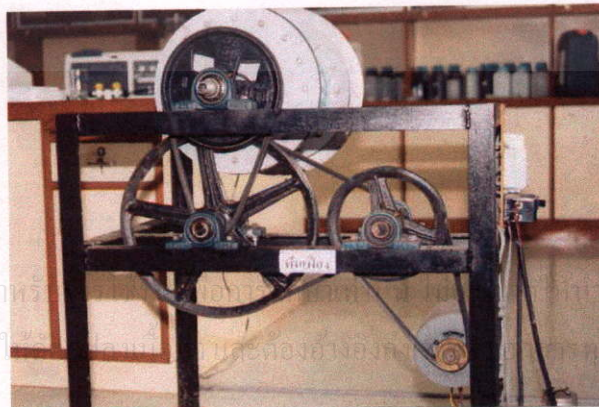


รูปที่ 3.3 แสดงข้าวแคโทด (โลหะทองแดงกลวง)



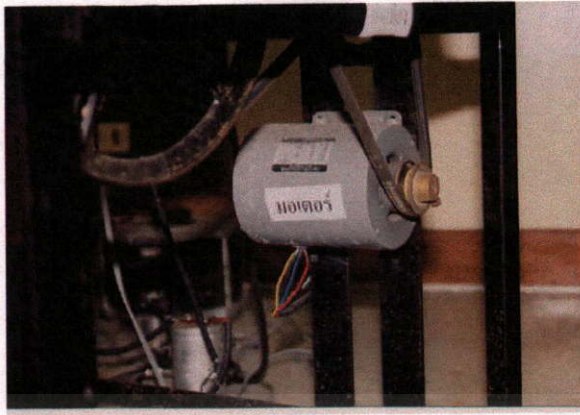
รูปที่ 3.4 แสดงข้าวแอนด (ท่อโลหะสแตนเลส)

ตัวเซลล์จะต่ออยู่กับระบบการหมุนที่ประกอบด้วยฟันเฟือง และมอเตอร์เพื่อหมุนตัวเซลล์ให้มีการไหลวนของข้าวแคโทด และน้ำเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 แสดงระบบฟันเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิ... และต้องแจ้งของ... ครั้งที่มีการนำไปใช้



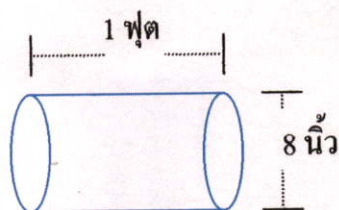
รูปที่ 3.6 แสดงมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการจัดสร้างตัวเซลล์

1. ตัดท่อพลาสติกพีวีซีให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ยาว 1 ฟุต



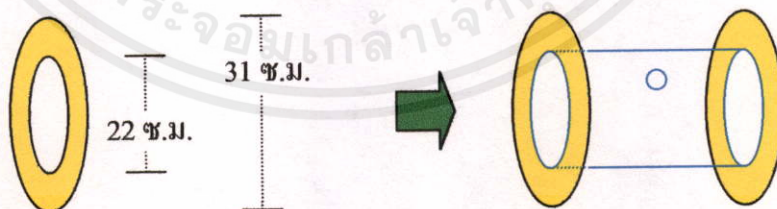
รูปที่ 3.7 แสดงท่อพลาสติกพีวีซี

2. เจาะรูที่กลางท่อพลาสติกพีวีซี ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร (จากข้อ 1.) เพื่อเป็นช่องเปิดสำหรับถ่ายเทขี้แคโทด (โลหะทองแดงกลวงขนาดเล็ก) และน้ำเสีย



รูปที่ 3.8 แสดงรูเจาะที่กลางท่อพลาสติกพีวีซี

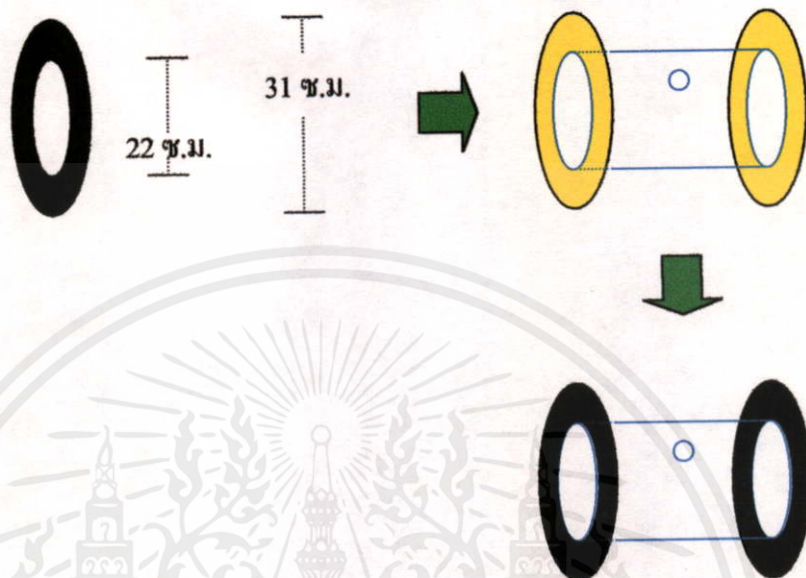
3. ตัดแผ่นพลาสติกพีวีซีให้มีลักษณะเป็นวงแหวน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 31 เซนติเมตร วงใน 22 เซนติเมตร มาประกอบกับท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 2.) ทั้ง 2 ด้าน ของท่อ ด้วยลวดเชื่อมพีวีซี



รูปที่ 3.9 แสดงวงแหวนพลาสติกพีวีซี และการต่อเชื่อม

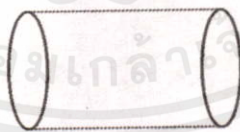
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตัดแผ่นยางกันซึมให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง วนอก 31 เซนติเมตร วงใน 22 เซนติเมตร 2 แผ่น นำแต่ละแผ่นมายึดให้ติดกับแผ่นพลาสติกพีวีซีที่เชื่อมต่อกับท่อพลาสติกพีวีซีเรียบร้อยแล้ว (จากข้อ 3.) ทั้ง 2 ด้าน ด้วยกาวพีวีซี



รูปที่ 3.10 แสดงแผ่นยางกันซึม และการต่อเชื่อม

5. นำแผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 8 มิลลิเมตร มาทำเป็นวงกลม แล้วเชื่อมให้ติดกันเพื่อนำเข้าไปสวมในท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 1.) ให้ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วแคโทด



รูปที่ 3.11 แสดงแผ่นสแตนเลสที่ม้วนเป็นวงกลม

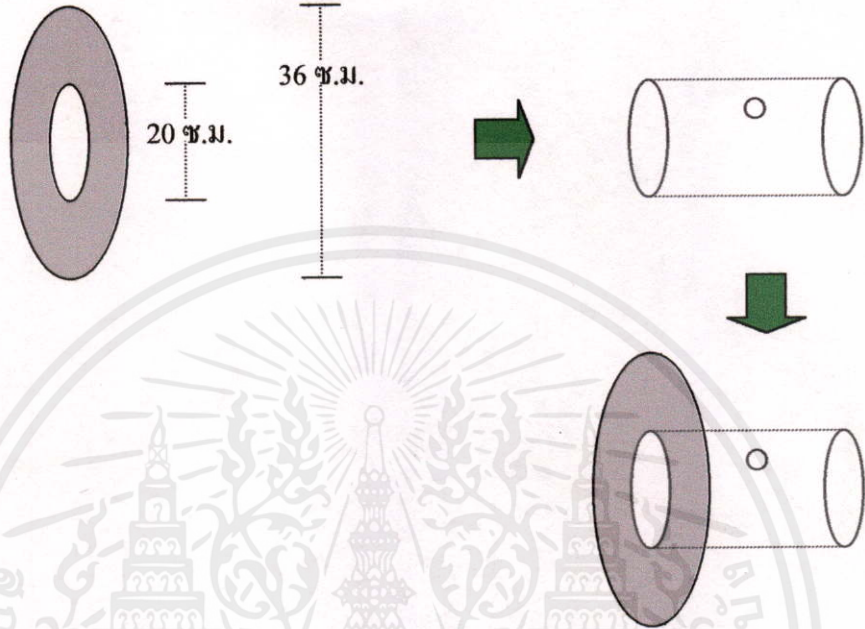
6. เจาะรูแผ่นสแตนเลสที่ม้วนแล้วให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ให้ตรงกับรูที่เจาะก่อนหน้านี้ของท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 2.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารนี้



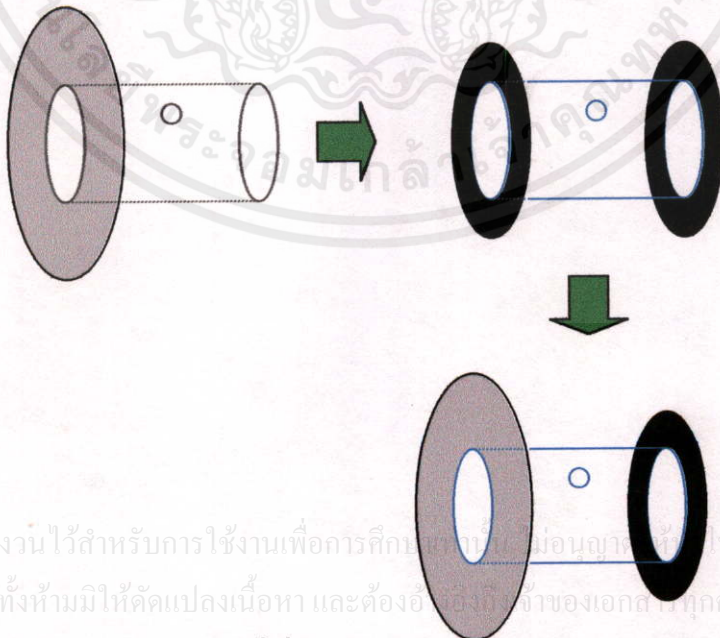
รูปที่ 3.12 แสดงรูเจาะที่กลางแผ่นสแตนเลสที่ม้วนแล้ว

7. ตัดแผ่นสแตนเลสให้มีลักษณะเป็นวงแหวน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 36 เซนติเมตร วงใน 20 เซนติเมตร นำไปเชื่อมติดกับสแตนเลสที่ม้วนแล้ว (จากข้อ 6.) เพื่อใช้เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ตัวเซลล์



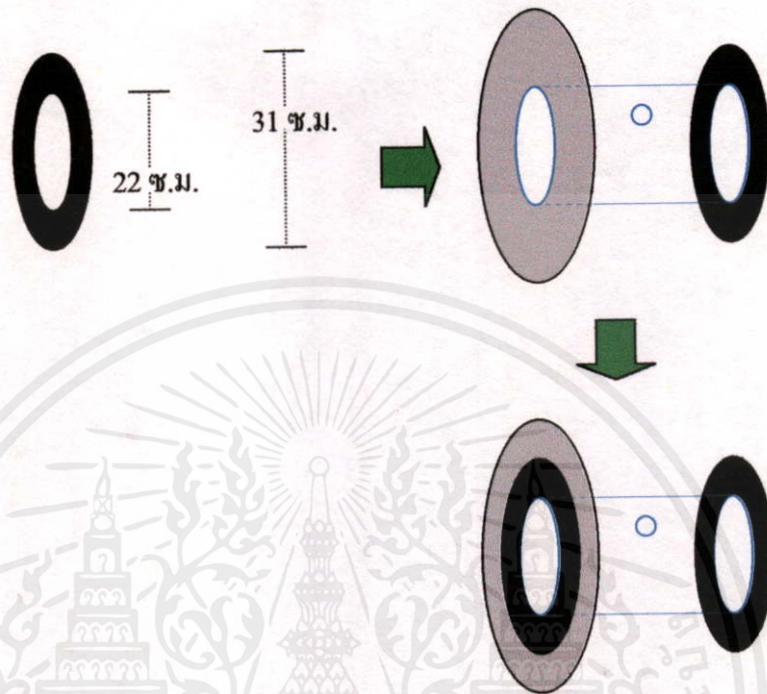
รูปที่ 3.13 แสดงวงแหวนสแตนเลส และการต่อเชื่อม

8. สวมสแตนเลสที่เชื่อมเรียบร้อยแล้วเข้ากับท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 4.)



รูปที่ 3.14 แสดงการสวมสแตนเลสที่เชื่อมเรียบร้อยแล้วเข้ากับท่อพลาสติกพีวีซี

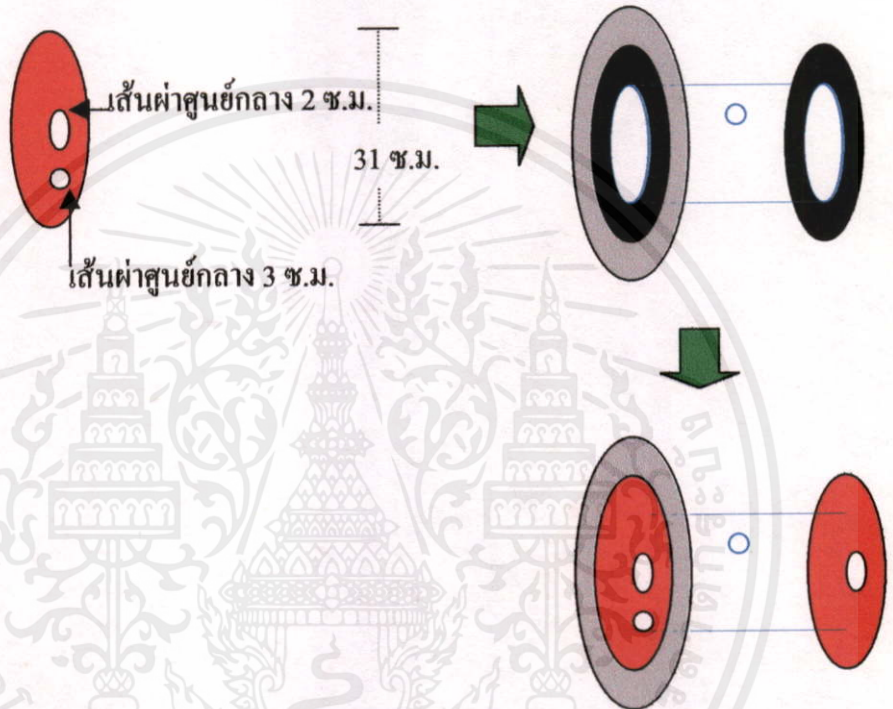
9. ตัดแผ่นยางกันซึมให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง วงนอก 31 เซนติเมตร วงใน 22 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น มาประกบกับท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 8.) ทั้ง 2 ด้านของท่อ



รูปที่ 3.15 แสดงการต่อเชื่อมระหว่างแผ่นยางกันซึมกับท่อพลาสติกพีวีซีที่สวมสแตนเลสแล้ว

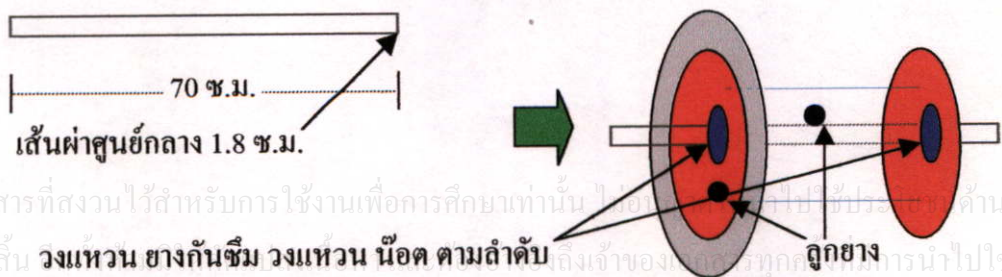
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ตัดแผ่นพลาสติกพีวีซีมา 2 แผ่น ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 31 เซนติเมตร เจาะรูตรงกลางแผ่นให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เพื่อไว้สวมท่อสแตนเลส และนำแผ่นพลาสติกพีวีซีหนึ่งในสองแผ่นมาเจาะรูเพิ่มอีก 1 รูห่างจากขอบเข้ามา 6 เซนติเมตร ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร เพื่อใช้ระบายแก๊สที่เกิดระหว่างทำการทดลอง นำมาประกบต่อจากแผ่นยางกันซึมทั้ง 2 ด้าน ของท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 9.) ยึดเข้าด้วยกันด้วยน็อต



รูปที่ 3.16 แสดงการต่อเชื่อมระหว่างแผ่นพลาสติกพีวีซีเข้ากับท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 9.)

11. ตัดท่อสแตนเลสให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร มาสวมอัดให้แน่นทั้ง 2 ด้านด้วยวงแหวน ยางกันซึม วงแหวน และน็อตตัวเมียที่เป็นสแตนเลส ทั้งด้านในและด้านนอกของท่อพลาสติกพีวีซี ตามลำดับ อุดรูที่เจาะด้วยลูกยาง



รูปที่ 3.17 แสดงการต่อเชื่อมท่อสแตนเลสเข้ากับท่อพลาสติกพีวีซี (จากข้อ 10.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น วงแหวน ยางกันซึม วงแหวน น็อต ตามลำดับ ถูกเจ้าของโครงการทุกคลังใช้การนำไปใช้

3.2.2 ชุดจ่ายกระแสไฟฟ้า

เป็นส่วนที่ให้กระแสไฟฟ้ากับเซลล์ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสมีส่วนประกอบดังนี้

3.2.2.1 ตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า

ทำหน้าที่แปลงศักย์ไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้า 220 โวลต์ เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า

3.2.2.2 Breaker

ทำหน้าที่ตัดกระแสหรือจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดง Breaker

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.3 ตัวไดโอด

ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยา
 ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงตัวไดโอด

3.2.2.4 ตัวเก็บประจุ

ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บประจุไฟฟ้า และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เซลล์ดังแสดงในรูปที่

3.21



รูปที่ 3.21 แสดงตัวเก็บประจุ

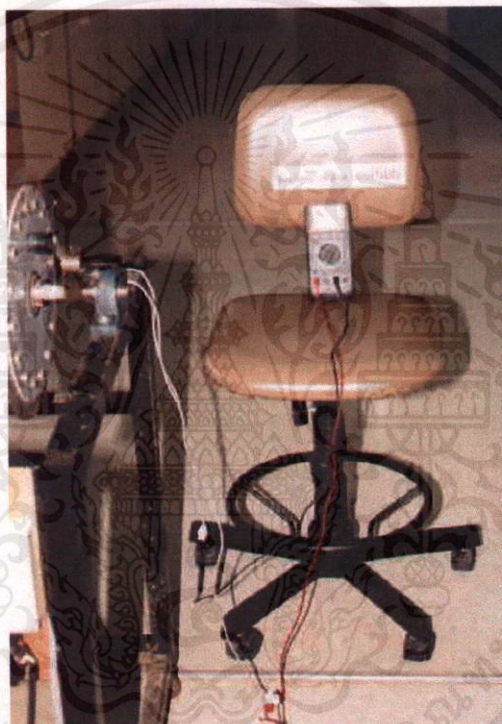
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.5 ตัววัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter)

ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.22

3.2.2.6 ตัววัดศักย์ไฟฟ้า (Voltmeter)

ทำหน้าที่ยืนยันความถูกต้องของศักย์ไฟฟ้า ที่ออกจากตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.22

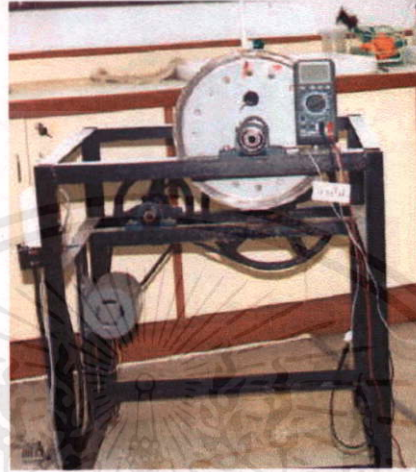


รูปที่ 3.22 แสดงตัววัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter) และ ศักย์ไฟฟ้า (Voltmeter)

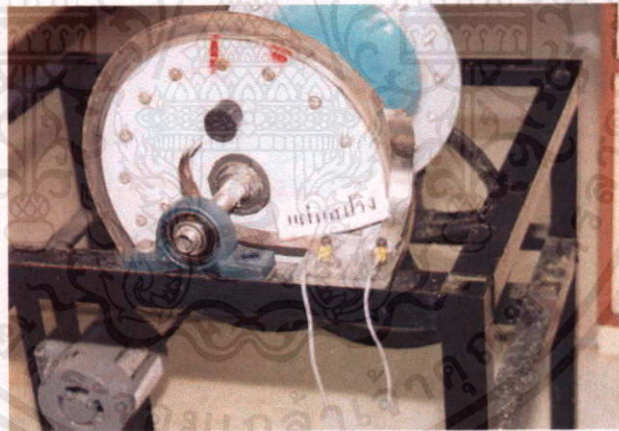
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.7 ตัวนำกระแสไฟฟ้า

ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์คือ สายไฟ แผ่นสปริง แผ่นสแตนเลส (นำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วแคโทด) ดังแสดงในรูปที่ 3.23, 3.24 และ 3.25 ตามลำดับ

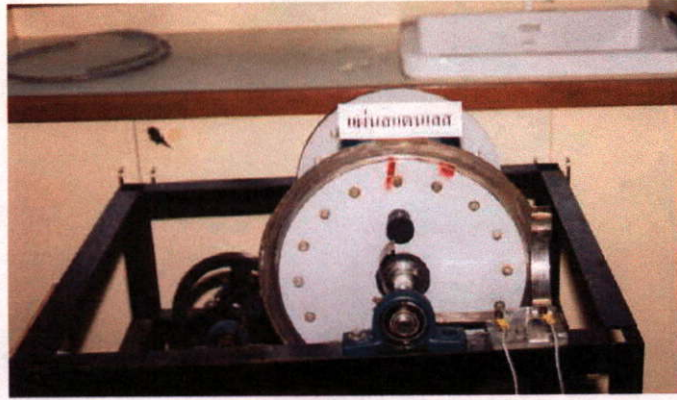


รูปที่ 3.23 แสดงสายไฟ



รูปที่ 3.24 แสดงแผ่นสปริง

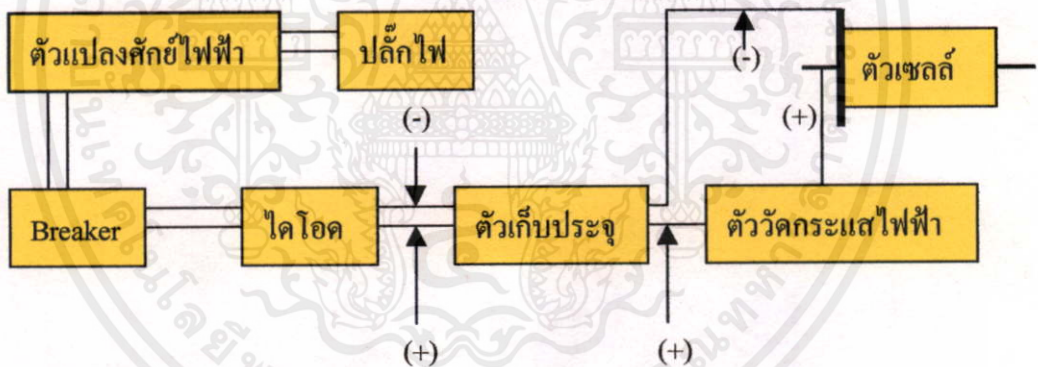
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แสดงแผ่นสแตนเลส

ขั้นตอนการประกอบชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับตัวเซลล์

1. ต่อสายไฟเริ่มต้นจากตัวแปลงศักย์ไฟฟ้าไปยัง Breaker ตัวไดโอด และตัวเก็บประจุ
2. ต่อขั้วบวกของตัวเก็บประจุเข้ากับตัววัดกระแสไฟฟ้าก่อน แล้วจึงต่อเข้ากับแผ่นสปริงที่สัมผัสกับแกนทอสแตนเลส
3. ต่อขั้วลบของตัวเก็บประจุเข้ากับแผ่นสปริงที่สัมผัสกับวงแหวนสแตนเลสที่ตัวเซลล์



รูปที่ 3.26 แสดงขั้นตอนการประกอบชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับตัวเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ทดสอบการใช้งาน และ ประเมินผล

หลังจากออกแบบ และจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน จนเป็นผลสำเร็จ จะทำการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรหรือไม่ หากผ่านการทดสอบ แสดงว่า เครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ จากนั้นจะนำมาทำการศึกษาอิทธิพลของ ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากร้าน้ำเสีย โดยทำการศึกษากับน้ำเสีย สังกะราห์ ดังตัวแปรต่อไปนี้

1. ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย
2. ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
3. ค่าความเป็นกรด - ด่าง
4. กระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า
5. ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด

ทำการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการกำจัดไอออนของทองแดง ออกจากร้าน้ำเสียสังกะราห์ เมื่อทราบค่าตัวแปรที่เหมาะสมแล้ว จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของ เครื่องปฏิกรณ์ โดยทดสอบกับน้ำเสียสังกะราห์ และ น้ำเสียอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มี ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงอยู่ในระดับที่ต่ำ การวัดความเข้มข้นของไอออนของทองแดง ที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ภายหลังจากทดลอง จะทำการวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ

1.1 ตัวเซลล์ ประกอบด้วย

1.1.1 ท่อพลาสติกพีวีซี มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 นิ้ว ยาว 1 ฟุต

1.1.2 ขั้วอิเล็กโทรด

1.1.2.1 ขั้วแคโทด ทำจากโลหะทองแดงกลวง มีขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ยาว 0.5 เซนติเมตร

1.1.2.2 ขั้วแอโนด ทำจากท่อสแตนเลส มีขนาดเส้น

ผ่าศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร

1.2 ชุดจ่ายกระแสไฟฟ้า ประกอบด้วย

1.2.1 ตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า (Slide Regulator ของ Matunaga) รับ

กระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 15 แอมแปร์ 240 โวลต์

1.2.2 Breaker (EA 52 G ของ Regis) รับกระแสไฟฟ้าได้ 50 แอมแปร์ 250 โวลต์

1.2.3 ตัวไดโอด (รับกระแสไฟฟ้าได้ 40 แอมแปร์ 120 โวลต์) 4 ตัว

1.2.4 ตัวเก็บประจุ (13000 UF, 150 W VDC) 2 ตัว

1.2.5 ตัววัดกระแสไฟฟ้า และ ตัววัดศักย์ไฟฟ้า (EDM-82 ของ Escort) รับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 20 แอมแปร์)

1.2.6 คำนวณกระแสไฟฟ้า

2. ระบบการหมุน ประกอบด้วย

2.1 ฟันเฟือง

2.2 มอเตอร์ (EFOU-KT ของ Hitachi) output 1/2 HP, 220 V, 50 Hz, AMP

2.7, rpm 1450

2.3 แบร์ริง (ตัวยึดแกนท่อนสแตนเลส และหมุนท่อนสแตนเลส)

3. คำนวณกระแสไฟฟ้า ประกอบด้วย

3.1 สายไฟ (300 V, 70 ° c.)

3.2 แผ่นสปริง

3.3 แผ่นสแตนเลส

4. ตัวต้านทานกระแสไฟฟ้า (5W,1kΩ.J และ 7W,4.7kΩ.J) นำมาลดศักย์ไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ เพื่อความปลอดภัยในการจัดเตรียมชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าก่อนการทดลอง

5. ไชควง

6. ครอบบอมน้ำกลั่น

7. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 2 ลิตร 1 ใบ ขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวนมาก ขนาด 100 มิลลิลิตร 1 ใบ

8. ถังผสมขนาด 20 มิลลิลิตร 1 ใบ

9. ถาดอลูมิเนียม 6 ใบ

10. แผ่นอลูมิเนียม

11. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร 4 ใบ ขนาด 50 มิลลิลิตร 2 ใบ

12. กระจกนาฬิกา

13. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช มิเตอร์ 713 ของ Metrohm)

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 14. ปีเปิดขนาด 1, 2 และ 5 มิลลิลิตร อย่างละ 1 อันนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง 15. กรวยพลาสติก 1 อัน ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. ครอบบอมน้ำกลั่นขนาด 100 มิลลิลิตร 1 ใบ

17. แท่งแก้วคน 1 อัน

18. เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือน้ำเสีย ภายหลังทำ
การทดลอง Atomic Absorption Spectrophotometer (AA-680 ของ Shimadzu)
19. เครื่องชั่งละเอียด (205 A ของ Precisa) ไม้ชั่งสารทองแดงซัลเฟต
20. เครื่องชั่งหยาบรุ่น (TR-6101 ของ Denver) ไม้ชั่งโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็น
ขั้วแคโทด
21. เครื่องย่อยสารละลาย High Performance Microwave Digestion Unit (mls 1200 ของ
Mega)

3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำเสียสังเคราะห์ ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ของ Carlo) ที่มีความเข้มข้นของ
ไอออนของทองแดง 100 และ 1000 พีพีเอ็ม
2. น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ ที่ได้จากมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารธนบุรี ภาควิชาเคมี ($\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 +$ น้ำยาเงา ที่ผสมกับ $\text{NiSO}_4 + \text{NiCl}_2 + \text{H}_3\text{BO}_3 +$ น้ำยา
เงา) ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 100 และ 1000 พีพีเอ็ม
3. กรดไนตริก (HNO_3 65% ของ Merck)
4. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF 40% ของ Merck)
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 30% ของ Merck)
6. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4 96% ของ Carlo) เข้มข้น และที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์
7. สารละลายมาตรฐานของทองแดง (สารละลายทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ของ Merck)
8. น้ำกลั่น (เพื่อใช้เจือจางสารละลาย ปรับปริมาตร และล้างตัวเซลล์)
9. น้ำประปา (เพื่อใช้ล้างตัวเซลล์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. การทดสอบเครื่องมือ

1.1 เมื่อประกอบชุดตัวเซลล์เข้ากับชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว โดยภายในตัวเซลล์มีโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด และน้ำเสียสังเคราะห์

1.2 เปิดสวิตซ์ให้มอเตอร์หมุนตัวเซลล์ พร้อมกับสับ Breaker ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน มากน้อยขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้จากการปรับตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย

1.3 สังเกตดูว่ามีกระแสไฟฟ้า เกิดขึ้นภายในวงจรของเครื่องปฏิกรณ์หรือไม่ โดยสังเกตจากตัวเลขที่ปรากฏขึ้นบนหน้าจอของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า ถ้ามีตัวเลขปรากฏขึ้น แสดงว่า เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในวงจร

2. การจัดเตรียมตัวแปรต่างๆ ก่อนการทดลอง

2.1 การเตรียมศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการให้แน่นอน

เมื่อต้องการศึกษาอิทธิพลของ ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการลดลงของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย โดยก่อนการทดลองทุกครั้งต้องหาศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการให้แน่นอนดังนี้

2.1.1 ต่ วงจรไฟฟ้าของตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า Breaker ตัวไดโอด และตัวเก็บประจุตามลำดับ เข้ากับเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า

2.1.2 สับวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหล ทำการตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการ โดยสังเกตจากค่าตัวเลขบนหน้าปัดของเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า

2.1.3 สับ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งปิด ในขณะที่ตัวแปลงศักย์ไฟฟ้ายังคงมีศักย์ไฟฟ้าที่ได้ตั้งค่าไว้

2.1.4 ลดศักย์ไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุจนเหลือ 0 โวลต์ โดยใช้ตัวต้านทานขนาด $7W, 4.7k\Omega$ และ $5W, 1k\Omega$ ตามลำดับ เพื่อความปลอดภัยในการจัดเตรียมชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าก่อนการทดลอง

2.1.5 ถอดวงจรออกจากเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า แล้วต่ วงจรเข้ากับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า และตัวเซลล์ ทำให้การทดลองในแต่ละครั้งจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอน

2.2 การเตรียมกระแสไฟฟ้าที่ต้องการให้แน่นอน

เมื่อต้องการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นภายในวงจรของ ตัวเซลล์ ที่มีผลต่อการลดลงของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย และเมื่อต้องการทดสอบประสิทธิภาพของ เครื่องปฏิกรณ์

2.2.1 ต่อวงจรไฟฟ้าของตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า ตัวไดโอด และตัวเก็บ ประจุ

2.2.2 ต่อวงจรขั้วบวกของตัวเก็บประจุ เข้ากับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า และต่อวงจรจากเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าเข้ากับแผ่นสปริงที่สัมผัสกับแกนท่อสเตนเลส ซึ่งทำหน้าที่ เป็นขั้วแอโนด

2.2.3 ต่อวงจรขั้วลบของตัวเก็บประจุ เข้ากับแผ่นสปริงที่สัมผัสกับ แผ่นวงแหวนสเตนเลสซึ่งเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วแคโทด (โลหะทองแดงกลวง) ภายใน เซลล์

2.2.4 ถ้าภายในเซลล์มีขั้วแคโทด และ น้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อสับ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดจะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าไหล ซึ่งสามารถจะปรับให้มีกระแสไฟฟ้าไหล ในวงจรตามความต้องการได้ โดยการปรับตัวแปลงศักย์ไฟฟ้า

2.3 การเตรียมชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าก่อนการทดลอง

เมื่อตั้งศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการให้แน่นอนแล้วจากข้อ 2.1 จะทำการจัดชุดกระแสไฟฟ้าเพื่อ ทดลอง ดังนี้

2.3.1 สับ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งปิด

2.3.2 ถอดวงจรระหว่างตัวเก็บประจุ และ เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าออก (ในขณะนั้นเครื่องแปลงศักย์ไฟฟ้ายังคงทำงานอยู่ และมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอนที่ได้ตั้งค่าเอาไว้ แล้ว)

2.3.3 ต่อวงจรจากขั้วบวก ของตัวเก็บประจุเข้ากับเครื่องวัดกระแส ไฟฟ้า และต่อวงจรจากเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าเข้ากับแผ่นสปริงที่สัมผัสกับแกนท่อสเตนเลส ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

2.3.4 ต่อวงจรขั้วลบของตัวเก็บประจุ เข้ากับแผ่นสปริงที่สัมผัสกับ แผ่นวงแหวนสเตนเลสซึ่งเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วแคโทด (โลหะทองแดงกลวง)ภายในเซลล์

2.3.5 ถ้าภายในเซลล์มีขั้วแคโทด และ น้ำเสียสังเคราะห์ เซลล์จะอยู่ในสภาพพร้อมทดลองเพียงแค่อับ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดเท่านั้น

2.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 100 และ 1000 พีพีเอ็ม

2.4.1 ชั่งทองแดงซัลเฟตมา 2.3592 และ 23.5918 กรัม ตามลำดับ

2.4.2 ละลายด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร เทลงใน
ถึงผสม

2.4.3 เตรียมน้ำกลั่น 2 ลิตรอีก 2 ขวด เทผสมลงในถึงผสมจะได้
สารละลายรวม 6 ลิตร เขย่าผสมให้เข้ากัน จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง
ไอออน 100 และ 1000 พีพีเอ็ม ตามลำดับ

2.5 การเตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรม ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 100 และ 1000 พีพีเอ็ม ตามลำดับ

2.5.1 ปิบน้ำเสียอุตสาหกรรม มา 116.6 และ 1166 มิลลิลิตร ใส่ใน
ขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร

2.5.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 2 ลิตร เทลงใน
ถึงผสม

2.5.3 เตรียมน้ำกลั่น 2 ลิตรอีก 2 ขวด เทผสมลงในถึงผสมจะ
ได้สารละลายรวม 6 ลิตร เขย่าผสมให้เข้ากัน จะได้น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของไอออน
ของทองแดง 100 และ 1000 พีพีเอ็ม ตามลำดับ

2.6 การเตรียมขั้วแคโทดก่อนการทดลอง

2.6.1 นำขั้วแคโทดที่ทำจากโลหะทองแดงกลวง ในจำนวนที่
ต้องการมาล้าง โดยแช่ในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 3 โมลาร์เป็นเวลาประมาณ 15 นาที

2.6.2 แล้วนำมาล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่น นำไปวางเรียงกันบนถาด
อลูมิเนียมที่หุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียม และกระดาษซับน้ำ

2.6.3 ทำให้แห้งโดยนำไปผึ่งแดด

2.6.4 นำไปชั่งน้ำหนักเป็นน้ำหนักของขั้วแคโทดก่อนทดลอง (ทำ
ในขั้นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ เมื่อทราบสภาวะที่แน่นอนของตัวแปรต่างๆ แล้ว) นี้ด้านการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารเผยแพร่ทางวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การเตรียมค่าความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก่อนการทดลอง

2.7.1 เติมกรดซัลฟูริก(H_2SO_4) เข้มข้น ลงในถังผสมที่มีสารละลายของไอออนของทองแดงที่เตรียมไว้แล้ว

2.7.2 เติมจนได้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ตามที่ต้องการโดยวัดจากเครื่อง (พีเอช มิเตอร์ 713 ของ Metrohm)

2.8 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 3 โมลาร์

2.8.1 ปีเปตสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นมา 338.2 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร

2.8.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 2 ลิตร จะได้สารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 3 โมลาร์

2.9 การย่อน้ำเสียอุตสาหกรรม ก่อนนำไปวัดหาปริมาณไอออนของทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ระยะเวลาต่างๆ (ทำเช่นเดียวกันทุกครั้งกับการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ)

2.9.1 ปีเปตน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่ระยะเวลาหนึ่งๆ มาครั้งละ 5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดย่อย 3 ขวด

2.9.2 ปีเปตกรดไนตริก (HNO_3) 65% จำนวน 8 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดย่อยทั้ง 3 ขวด ขวดละ 6 มิลลิลิตร

2.9.3 ปีเปตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% จำนวน 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดย่อยทั้ง 3 ขวด ขวดละ 2 มิลลิลิตร

2.9.4 ปีเปตกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 40% จำนวน 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดย่อยทั้ง 3 ขวด ขวดละ 2 มิลลิลิตร

2.9.10 ปิดฝาขวดย่อยทั้ง 3 ขวด ให้สนิท นำไปย่อยด้วยเครื่อง Microwave Digestion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากร้าน้ำเสียสังเคราะห์

3.1 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม ที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย

เมื่อกำหนดสภาวะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

- ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 2000, 2500, 3000 ลูก ตามลำดับ
- ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสีย 1000 พีพีเอ็ม
- ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 1.0
- ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที
- ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 15 และ 30 นาที ตามลำดับ

มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.1.1 จัดเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4

3.1.2 เติมน้ำละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงในน้ำเสียในข้อ 3.1.1 ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 1.0 (พีเอช 1.0) โดยวัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (พีเอชมิเตอร์ 713 ของ Metrohm)

3.1.3 เปิดน้ำเสียออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อนำไปทดสอบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเท่ากับ 1000 พีพีเอ็ม จริงหรือไม่)

3.1.4 เทสารละลายที่ผสมเสร็จแล้วนี้ลงในเซลล์

3.1.5 นำโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 2000 ลูก ที่ได้จัดเตรียมไว้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6 เติลงในเซลล์

3.1.6 เปิดมอเตอร์ให้เซลล์หมุน เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี

3.1.7 เตรียมศักย์ไฟฟ้าที่จะให้แก่เซลล์ให้แน่นอนที่ 25 โวลต์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1

3.1.8 จัดชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบเพื่อการทดลอง ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.3

3.1.9 เปิดสวิตช์มอเตอร์พร้อมกับสับสวิตช์ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด กำหนดให้เป็นการทดลอง ณ เวลาเริ่มต้น (0 วินาที)

3.1.10 เมื่อทดลองครบ 15 นาที ปิดสวิทช์มอเตอร์ให้เซลล์หยุดหมุน เปิดน้ำเสียออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อทดสอบดูว่าเมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 15 นาที จะเหลือความเข้มข้นของไอออนของทองแดง ในน้ำเสียเท่าไร) โดยตลอดการทดลองทุกๆ 5 นาทีจะหยุดหมุนเซลล์ และเปิดวาล์วเพื่อคลาย ความดันที่เกิดจากแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ โดยคลายจุกยางที่ฝาเปิดด้านบน

3.1.11 ปิดสวิทช์ Breaker ถ่าน้ำเสีย และลูกโลหะทองแดงออกให้หมด ล้างภายในเซลล์ ด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง แล้วตามด้วยน้ำกลั่นอีกหนึ่งครั้ง ครั้งละ 10 นาที

3.1.12 ล้างลูกโลหะทองแดงด้วยน้ำประปา ตามด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด นำไปจัดเตรียมขั้ว แคโทดก่อนการทดลอง ตั้งชั้นตอนที่ได้อีกแล้วมาไว้ในหัวข้อ 2.6 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองครั้งต่อไป

3.1.13 นำน้ำเสียที่ปีเปิดออกมาในช่วงเวลาต่างๆ (ช่วงเวลาละ 3 ซ้ำ) ไปปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดปริมาตรของไอออนของทองแดง ที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.1.14 นำผลการทดลองที่ได้ จากการวัดปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วย เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทั้ง 3 ซ้ำ ในแต่ละช่วงเวลา นำมาเทียบความเข้มข้น ย้อนกลับ ก็จะทราบปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย นำผลการทดลองที่ได้ทั้ง 3 ซ้ำ ในแต่ละช่วงเวลามาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.1.15 ทำการทดลองที่ใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 2000 ลูกเป็นขั้วแคโทด อีก 2 ซ้ำ โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.1.1-3.1.14

3.1.16 นำค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ ทั้ง 3 ซ้ำ การทดลอง (โลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก) มาหาค่าเฉลี่ยรวม ก็จะได้ค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.1.17 เริ่มทำการทดลองเป็นเวลา 30 นาที โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.1.1-3.1.16 แต่เปลี่ยนระยะเวลาที่ทำการทดลองจาก 15 นาที เป็น 30 นาที

3.1.18 จากนั้นทำการทดลอง โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้ว แคโทดจาก 2000 ลูก เป็น 2500 และ 3000 ลูก ตามลำดับ และทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.1.1-3.1.17

3.1.19 นำผลการทดลอง ที่เป็นค่าเฉลี่ยรวมของชุดโลหะทองแดงกลวงแต่ละชุด ในช่วง ระยะเวลา 15 และ 30 นาที มาเปรียบเทียบ และ หาข้อสรุปว่าควรจะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออน ของทองแดงในน้ำเสีย เมื่อเวลาในการทดลองผ่านไปเท่าใด จึงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออน ของทองแดงออกจากน้ำเสียได้ดีที่สุด

3.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง

เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

- ปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 2000 ลูก
 - ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสีย 1000 และ 100 พีพีเอ็ม
- ตามลำดับ

- ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7
- ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที
- ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 180 นาที

มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.2.1 จัดเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4

3.2.2 เติมน้ำละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงในน้ำเสียในข้อ 3.2.1 ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 (พีเอช 0.7) โดยวัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

3.2.3 บีบน้ำเสียออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อนำไปทดสอบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเท่ากับ 1000 พีพีเอ็ม จริงหรือไม่)

3.2.4 ทดสอบละลายที่ผสมเสร็จแล้วนี้ลงในเซลล์

3.2.5 นำโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 2000 ลูก ที่ได้จัดเตรียมไว้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6 เติลงในเซลล์

3.2.6 เปิดมอเตอร์ให้เซลล์หมุน เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี

3.2.7 เตรียมศักย์ไฟฟ้าที่จะให้แก่เซลล์ให้แน่นอนที่ 25 โวลต์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1

3.2.8 จัดชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบเพื่อการทดลอง ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.3

3.2.9 บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสีย เป็นอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนการทดลอง

3.2.10 เปิดสวิตช์มอเตอร์พร้อมกับสับสวิตช์ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด กำหนดให้เป็นการทดลอง ณ เวลาเริ่มต้น (0 วินาที)

3.2.11 เมื่อครบทุกๆ 30 นาที ปิดสวิตช์มอเตอร์ให้เซลล์หยุดหมุน เปิดน้ำเสียออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อทดสอบดูว่าเมื่อทำการทดลองผ่านไปทุกๆ 30 นาที จะเหลือความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียเท่าไร) ขณะนั้น Breaker ยังคงอยู่ในตำแหน่งเปิด นั่นคือยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรอยู่ จากนั้นเปิดสวิตช์ให้มอเตอร์หมุนตัวเซลล์อีกครั้ง (ตลอดการทดลองทุกๆ 5 นาทีจะหยุดหมุนเซลล์ และเปิดวาล์ว เพื่อคลายความดันที่เกิดจากแก๊สภายในเซลล์ โดยคลายจุกยางที่ฝาเปิดด้านบน)

3.2.12 เมื่อทำการทดลองครบ 180 นาที บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสียภายในเซลล์เป็น อุณหภูมิหลังการทดลอง ปิดวงจรไฟฟ้าโดยปิดสวิตช์ Breaker ถ่าน้ำเสีย และโลหะทองแดงออกจากเซลล์ ดังภายในเซลล์ด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที

3.2.13 ล้างโลหะทองแดงกลวงให้สะอาดด้วยน้ำประปาตามด้วยน้ำกลั่น นำไปจัดเตรียม ขั้วแคโทดก่อนการทดลอง ดังขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.6 เพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป

3.2.14 นำน้ำเสียที่ปีเปตออกมาในช่วงเวลาต่างๆ (ช่วงเวลาละ 3 ซ้ำ) ไปปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดปริมาณของไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.2.15 นำผลการทดลองที่ได้ จากการวัดปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วย เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทั้ง 3 ซ้ำในแต่ละช่วงเวลานำมาเทียบ ความเข้มข้นย้อนกลับก็จะทราบปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย นำผลการทดลองที่ได้ทั้ง 3 ซ้ำ ในแต่ละช่วงเวลามาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณ ไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.2.16 ทำการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม อีก 2 ซ้ำ โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.2.1-3.2.15

3.2.17 นำค่าเฉลี่ยของปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ ทั้ง 3 ซ้ำทำการทดลอง (น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม) มาหาค่าเฉลี่ยรวม ก็จะได้ค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.2.18 ทำการทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 100 พีพีเอ็ม โดย ทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.2.1-3.2.17 เพียงแต่เปลี่ยนจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม เป็น 100 พีพีเอ็ม

3.2.19 นำผลการทดลอง ที่เป็นค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ใน น้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ ของน้ำเสีย ทั้ง 2 ความเข้มข้น มาเปรียบเทียบกัน เพื่อนำมาดูว่า ควรจะทำการ ทดลองเป็นระยะเวลาสั้นเท่าใดจึงจะเหมาะสม

3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

- ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก
- ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสีย 1000 พีพีเอ็ม
- ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 4.5 (ไม่ใส่กรด), 3.0, 1.0 และ 0.7 ตามลำดับ
- ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที
- ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 30 นาที

มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.3.1 จัดเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4

3.3.2 วัดความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสีย ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (น้ำเสียจะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นประมาณ 4.5)

3.3.3 บีบ่น้ำเสียออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อทดสอบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเท่ากับ 1000 พีพีเอ็ม จริงหรือไม่)

3.3.4 เทสารละลายที่ผสมเสร็จแล้วนี้ลงในเซลล์

3.3.5 นำโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก ที่ได้จัดเตรียมไว้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6 เผลงในเซลล์

3.3.6 เปิดมอเตอร์ให้เซลล์หมุนเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี

3.3.7 เตรียมศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการให้แน่นอนที่ 25 โวลต์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1

3.3.8 จัดชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบเพื่อการทดลอง ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.3

3.2.9 บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสีย เป็นอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนการทดลอง

3.3.10 เปิดสวิตช์มอเตอร์พร้อมสับสวิตช์ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด กำหนดให้

เอกสารเป็นการทดลอง ณ เวลาเริ่มต้น (0 วินาที) งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.11 เมื่อครบ 30 นาที ปิดสวิตช์มอเตอร์ให้เซลล์หยุดหมุน บีบน้ำเสีย ออกมา 0.5 มิลลิลิตรจำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด(3 ซ้ำ) (เพื่อทดสอบดูว่าในระยะเวลา 30 นาทีจะเหลือความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในสารละลายเท่าไร) ขณะนั้น Breaker ยังคงอยู่ในตำแหน่งเปิด นั่นคือยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรอยู่ (ตลอดการทดลองทุกๆ 5 นาทีจะหยุดหมุนเซลล์ และเปิดวาล์วเพื่อคลายความดัน ที่เกิดจากแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ โดยคลายจุกยางที่ฝาเปิดด้านหน้า) บันทึกปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรของเซลล์

3.3.12 ปิดวงจรไฟฟ้า โดยปิดสวิตช์ Breaker บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสียภายในเซลล์เป็นอุณหภูมิหลังการทดลอง ถ่าน้ำเสีย และโลหะทองแดงออกจากเซลล์ ล้างภายในเซลล์ด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที

3.3.13 ล้างโลหะทองแดงกลวงให้สะอาดด้วยน้ำประปาตามด้วยน้ำกลั่น นำไปจัดเตรียม ขั้วแคโทดก่อนการทดลอง ดังขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.6 เพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป

3.3.14 นำน้ำเสียที่บีบออกมาในช่วงเวลาต่างๆ (ช่วงเวลาละ 3 ซ้ำ) ไปปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดปริมาณของไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.3.15 นำผลการทดลอง ที่ได้จากการวัดปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในสารละลาย ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทั้ง 3 ซ้ำในแต่ละช่วงเวลานำมาเทียบความเข้มข้นย้อนกลับ ก็จะทราบปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย นำผลการทดลองที่ได้ ทั้ง 3 ซ้ำในแต่ละช่วงเวลามาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.3.16 ทำการทดลองที่ใช้น้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นประมาณ 4.5 อีก 2 ซ้ำ โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.3.1-3.3.15

3.3.17 นำค่าเฉลี่ยของปริมาณ ไอออนของทองแดง ที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ ทั้ง 3 ซ้ำทำการทดลอง (ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นประมาณ 4.5) มาหาค่าเฉลี่ยรวม ก็จะได้ค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.3.18 ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ไปเป็น 3.0, 1.0 และ 0.7 ตามลำดับ โดยการเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ลงในน้ำเสียที่จัดเตรียมไว้ เหมือนในข้อที่ 3.3.1 จนกระทั่งได้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ตามที่ต้องการซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.3.1-3.3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่เป็นการค้า
 3.3.19 นำผลการทดลอง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยรวมของค่าความเป็นกรด-ด่างแต่ละชุดมา
 เปรียบเทียบกันดูว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเท่าใดที่ทำให้ไอออนของทองแดงถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย
 ได้ดีที่สุด

3.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า

เมื่อกำหนดสภาวะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

- ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก
- ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสีย 1000 พีพีเอ็ม
- กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงจร 8, 13 และ 19 แอมแปร์
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7
- ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที
- ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.4.1 จัดเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4

3.4.2 เติมน้ำละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงในน้ำเสีย ให้น้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 (พีเอช 0.7) วัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

3.4.3 ป้อนน้ำเสียออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อนำไปทดสอบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น เท่ากับ 1000 พีพีเอ็ม จริงหรือไม่)

3.4.4 เทน้ำเสียที่ผสมเสร็จแล้วนี้ลงในเซลล์

3.4.5 นำโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก ที่ได้จัดเตรียมไว้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6 เติลงในเซลล์

3.4.6 เปิดมอเตอร์ให้เซลล์หมุนเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี

3.4.7 บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสีย เป็นอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนการทดลอง

3.4.8 เตรียมให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ต้องการจะให้เกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ให้แน่นอนที่ 8 แอมแปร์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2

3.4.9 ขณะเปิดสวิตช์มอเตอร์พร้อมสวิตช์ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด จะกำหนดให้เป็นการทดลอง ณ เวลาเริ่มต้น (0 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.10 เมื่อครบ 30 นาที ปิดสวิทช์มอเตอร์ให้เซลล์หยุดหมุน เปิดน้ำเสีย ออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด(3 ซ้ำ) (เพื่อทดสอบดูว่าเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที จะเหลือความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในสารละลายเท่าไร) ขณะนั้น Breaker ยังคงอยู่ในตำแหน่งเปิด นั่นคือยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรอยู่ (ตลอดการทดลอง ทุกๆ 5 นาทีจะหยุดหมุนเซลล์ และเปิดวาล์วเพื่อคลายความดันที่เกิดจากแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์โดยคลายจุกยางที่ฝาเปิดด้านหน้า)

3.4.11 เมื่อทำการทดลองครบ 60 นาที บันทึกศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ และอุณหภูมิของน้ำเสียภายในเซลล์ เป็นอุณหภูมิหลังการทดลอง

3.4.12 ปิดวงจรไฟฟ้า โดยปิดสวิทช์ Breaker ถ่าน้ำทิ้ง และโลหะทองแดงออกจากเซลล์ ล้างภายในเซลล์ด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที

3.4.13 ล้างโลหะทองแดงกลวงให้สะอาดด้วยน้ำประปาดำเนินตามด้วยน้ำกลั่น นำไปจัดเตรียม ขั้วแคโทดก่อนการทดลอง ดังขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.6 เพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป

3.4.14 นำน้ำเสียที่ปีเปิดออกมาในช่วงเวลาต่างๆ (ช่วงเวลาระยะ 3 ชั่วโมง) ไปปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดปริมาณของไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.4.15 นำผลการทดลองที่ได้ จากการวัดปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสีย ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทั้ง 3 ชั่วโมงในแต่ละช่วงเวลานำมาเทียบความเข้มข้นย้อนกลับ ก็จะทราบปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย นำผลการทดลองที่ได้ทั้ง 3 ชั่วโมงในแต่ละช่วงเวลามาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้อัตราเฉลี่ยของปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.4.16 ทำการทดลองโดยให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ต้องการจะให้เกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ให้แน่นอนที่ 8 แอมแปร์ อีก 2 ชั่วโมง โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.4.1-3.4.15

3.4.17 นำค่าเฉลี่ยของปริมาณ ไอออนของทองแดง ที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ ทั้ง 3 ชั่วโมงการทดลอง (กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร 8 แอมแปร์) มาหาค่าเฉลี่ยรวม ก็จะได้อัตราเฉลี่ยรวมของปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในสารละลายที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.4.18 ทำการทดลอง โดยเปลี่ยนให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในวงจร 13 และ 19 แอมแปร์ ตามลำดับ โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.4.1-3.4.17

3.4.19 นำผลการทดลอง ที่เป็นค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ในแต่ละชุด มาเปรียบเทียบกันดูว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรเท่าใด ที่ทำให้ไอออนของทองแดงถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้ดีที่สุด

3.5 ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด

เมื่อกำหนดสภาวะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

- ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 500, 2000, 4000, 6000, 8000 และ 10000 ลูก ตามลำดับ

- ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสีย 1000 พีพีเอ็ม

- ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

- ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

- ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.5.1 จัดเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4

3.5.2 เติมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น ลงในน้ำเสียให้น้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 (พีเอช 0.7) วัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

3.5.3 เปิดน้ำเสียออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อนำไปทดสอบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเท่ากับ 1000 พีพีเอ็ม จริงหรือไม่)

3.5.4 เเทน้ำเสียที่ผสมเสร็จแล้วนี้ลงในเซลล์

3.5.5 นำโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 500 ลูก ที่ได้จัดเตรียมไว้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6 เเทลงในเซลล์

3.5.6 เปิดมอเตอร์ให้เซลล์หมุนเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี

3.5.7 เตรียมศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการให้แน่นอนที่ 25 โวลต์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1

3.5.8 จัดชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบเพื่อการทดลอง ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.3

3.5.9 บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสียภายในเซลล์ เป็นอุณหภูมิก่อนการทดลอง

3.5.10 เปิดสวิตช์มอเตอร์พร้อมสวิตช์ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด กำหนดให้เป็นการทดลอง ณ เวลาเริ่มต้น (0 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงบนสื่อออนไลน์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.11 เมื่อครบทุกๆ 30 นาที ปิดสวิตช์มอเตอร์ให้เซลล์หยุดหมุน เปิดน้ำเสีย ออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อทดสอบดูว่าเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที จะเหลือความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียเท่าไร) ขณะนั้น Breaker ยังคงอยู่ในตำแหน่งเปิด นั่นคือยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรอยู่ จากนั้นเปิดสวิตช์ให้มอเตอร์หมุนตัวเซลล์อีกครั้ง (ตลอดการทดลอง ทุกๆ 5 นาที จะหยุดหมุนเซลล์ และเปิดวาล์วเพื่อคลายความดันที่เกิดจากแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์โดยคลายจุกยางที่ฝาเปิดด้านหน้า)

3.5.12 เมื่อครบ 60 นาที ปิดมอเตอร์ให้เซลล์หยุดหมุน บันทึกปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ และอุณหภูมิของน้ำเสียภายในเซลล์ เป็นอุณหภูมิหลังการทดลอง

3.5.13 ปิดวงจรไฟฟ้า โดยปิดสวิตช์ Breaker ถ่าน้ำเสีย และโลหะทองแดงออกจากเซลล์ ล้างภายในเซลล์ด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที

3.5.14 ล้างโลหะทองแดงกลวงให้สะอาดด้วยน้ำประปาค้างด้วยน้ำกลั่น นำไปจัดเตรียมขวดแคโทดก่อนการทดลอง ดังขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.6 เพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป

3.5.15 นำน้ำเสียที่ปีบตออกมากในช่วงเวลาต่างๆ (ช่วงเวลาละ 3 ซ้ำ) ไปปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดปริมาณของไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.5.16 นำผลการทดลองที่ได้ จากการวัดปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทั้ง 3 ซ้ำในแต่ละช่วงเวลานำมาเทียบความเข้มข้นย้อนกลับ ก็จะทราบปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย นำผลการทดลองที่ได้ทั้ง 3 ซ้ำในแต่ละช่วงเวลามาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.5.17 ทำการทดลองที่ใช้โลหะทองแดงกลวง 500 ลูก เป็นขั้วแคโทด อีก 2 ซ้ำ โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.5.1-3.5.16

3.5.18 นำค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนของทองแดง ที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ ทั้ง 3 ซ้ำทำการทดลอง (โลหะทองแดงกลวง 500 ลูก) มาหาค่าเฉลี่ยรวม ก็จะได้ค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

3.5.19 ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลง จำนวนโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด จาก 500 ลูก เป็น 2000, 4000, 6000, 8000 และ 10000 ลูก ตามลำดับ โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 3.5.1-3.5.18

3.5.20 นำผลการทดลอง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยรวมของชุดโลหะทองแดงกลวงแต่ละชุดมาเปรียบเทียบกัน ว่าจำนวนโลหะทองแดงกลวงเท่าใดที่ทำให้ไอออนของทองแดงถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้ดีที่สุด

4. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ ที่มีต่อการกำจัดไอออนของ ทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

- ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก
- ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสีย 100 พีพีเอ็ม
- กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงจร 19 แอมแปร์
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7
- ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที
- ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 4.1 จัดเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 100 พีพีเอ็ม ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4
- 4.2 เติมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงในน้ำเสีย ให้น้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 (พีเอช 0.7) วัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง
- 4.3 บีบคาน้ำเสียออกมา 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อนำไปทดสอบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม จริงหรือไม่)
- 4.4 เทน้ำเสียที่ผสมเสร็จแล้วนี้ลงในเซลล์
- 4.5 นำโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก ที่ได้จัดเตรียมไว้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6 เติลงในเซลล์
- 4.6 เปิดมอเตอร์ให้เซลล์หมุนเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี
- 4.7 บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสีย เป็นอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนการทดลอง
- 4.8 เตรียมให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องการจะให้เกิดขึ้น ในวงจรของเซลล์ให้แน่นอนที่ 19 แอมแปร์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2
- 4.9 ขณะเปิดสวิตช์มอเตอร์พร้อมสวิตช์ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด จะกำหนดให้เป็นการทดลอง ณ เวลาเริ่มต้น (0 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 เมื่อครบ 30 นาที ปิดสวิทช์มอเตอร์ให้เซลล์หยุดหมุน เปิดน้ำเสียออกมา 5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร 3 ขวด(3 ซ้ำ) (เพื่อทดสอบดูว่าในระยะเวลา30นาที จะเหลือความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียเท่าไร) ขณะนั้น Breaker ยังคงอยู่ในตำแหน่งเปิดนั่นคือยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรอยู่ (ตลอดการทดลอง ทุกๆ 5 นาที จะหยุดหมุนเซลล์ และเปิดวาล์วเพื่อคลายความดันที่เกิดจากแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์โดยคลายจุกยางที่ฝาเปิดด้านบน) ทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้เมื่อครบ 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

4.11 ปิดวงจรไฟฟ้า โดยปิดสวิทช์ Breaker บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสียในเซลล์ เป็นอุณหภูมิหลังการทดลอง ถ่ายน้ำทิ้ง และ โลหะทองแดงออกจากเซลล์ ล้างภายในเซลล์ด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที

4.12 ล้างโลหะทองแดงกลวงให้สะอาดด้วยน้ำประปาตามด้วยน้ำกลั่น นำไปผึ่งแดดให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนักหาค่าหนักของขั้วแคโทดหลังการทดลอง เพื่อต้องการทราบเปอร์เซ็นต์การนำไอออนของทองแดง จากน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ในรูปโลหะทองแดง (Recovery)

4.13 จากนั้นนำโลหะทองแดงกลวงไปจัดเตรียม ขั้วแคโทดก่อนการทดลอง ดังขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.6 เพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป

4.14 นำน้ำเสียที่บีบเปิดออกมาในช่วงเวลาต่างๆ (ช่วงเวลาละ 3 ซ้ำ) ไปปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดปริมาณของไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

4.15 นำผลการทดลองที่ได้ จากการวัดปริมาณ ไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทั้ง 3 ซ้ำในแต่ละช่วงเวลานำมาเทียบความเข้มข้นย้อนกลับ ก็จะทราบปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย นำผลการทดลองที่ได้ทั้ง 3 ซ้ำในแต่ละช่วงเวลามาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ

4.16 ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 4.1-4.14 อีก 2 ซ้ำ

4.17 นำค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนของทองแดง ที่มีอยู่ในที่ช่วงเวลาต่างๆ ทั้ง 3 ซ้ำ การทดลอง มาหาค่าเฉลี่ยรวม ก็จะได้ค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในที่ช่วงเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ ที่มีต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากร้าน้ำเสียอุตสาหกรรม

เมื่อกำหนดสภาวะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

- ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก
- ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสีย 1000 และ 100 พีพีเอ็ม

ตามลำดับ

- กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงจร 19 แอมแปร์
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7
- ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที
- ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

5.1 เตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรมให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็มตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.5

5.2 เติมน้ำละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงในน้ำเสีย ให้น้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 (พีเอช 0.7) วัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

5.3 ปิดน้ำเสียออกมา 5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดย่อยสารละลาย 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อนำไปทดสอบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเท่ากับ 1000 พีพีเอ็มจริงหรือไม่)

5.4 เทน้ำเสียที่ผสมเสร็จแล้วนี้ลงในเซลล์

5.5 นำโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก ที่ได้จัดเตรียมไว้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6 เติลงในเซลล์

5.6 เปิดมอเตอร์ให้เซลล์หมุนเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี

5.7 บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสีย เป็นอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนการทดลอง

5.8 เตรียมให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่โครงการจะให้เกิดขึ้น ในวงจรของเซลล์ให้แน่นอนที่ 19 แอมแปร์ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2

5.9 ขณะเปิดสวิตช์มอเตอร์พร้อมสวิตช์ Breaker ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด จะกำหนดให้

เอกสารเป็นการทดลอง ณ เวลาเริ่มต้น (0 วินาที) งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10 เมื่อครบ 30 นาที ปิดสวิทช์มอเตอร์ให้เซลล์หยุดหมุน เปิดน้ำเสีย ออกมา 5 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ใส่ในขวดย่อยสารละลาย 3 ขวด (3 ซ้ำ) (เพื่อทดสอบว่าเมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 30 นาที จะเหลือความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียเท่าไร) ขณะนั้น Breaker ยังคงอยู่ในตำแหน่งเปิด นั่นคือยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร (ตลอดการทดลองทุกๆ 5 นาทีจะหยุดหมุนเซลล์ และเปิดวาล์วเพื่อคลายความดันที่เกิดจากแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์โดยคลายจุกยางที่ฝาเปิดด้านบน) ทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้เมื่อครบ 45 และ 60 นาที

5.11 ปิดวงจรไฟฟ้า โดยปิดสวิทช์ Breaker บันทึกอุณหภูมิของน้ำเสียภายในเซลล์ เป็นอุณหภูมิหลังการทดลอง ถ่ายน้ำทิ้ง และโลหะทองแดงออกจากเซลล์ ล้างภายในเซลล์ด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง และ น้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที

5.12 ล้างโลหะทองแดงกลวงให้สะอาดด้วยน้ำประปาตามด้วยน้ำกลั่น นำไปผึ่งแดดให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนักหาค่าหนักของขั้วแคโทดหลังการทดลอง เพื่อต้องการทราบเปอร์เซ็นต์การนำไอออนของทองแดง จากน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ในรูปโลหะทองแดง (Recovery)

5.13 จากนั้นนำโลหะทองแดงกลวง ไปจัดเตรียมขั้วแคโทดก่อนการทดลอง ดังขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.6 เพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป

5.14 น้ำเสียที่ปีเปิดออกมาในช่วงเวลาต่างๆ (ช่วงเวลาระยะ 3 ชั่วโมง) นำไปย่อยด้วยเครื่อง Microwave Digestion ดังขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.9 แล้วใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปีเปิดสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้วนี้ออกมา 5 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดปริมาณของไอออนของทองแดง ที่มีอยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

5.15 นำผลการทดลองที่ได้ จากการวัดปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทั้ง 3 ชั่วโมง ในแต่ละช่วงเวลานำมาเทียบความเข้มข้นย้อนกลับก็จะทราบปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย นำผลการทดลองที่ได้ทั้ง 3 ชั่วโมงในแต่ละช่วงเวลามาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนของทองแดงที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 5.1-5.15 อีก 2 ชั่วโมง

5.16 นำค่าเฉลี่ยของปริมาณไอออนของทองแดง ที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่างๆ ทั้ง 3 ชั่วโมงการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยรวม ก็จะได้ค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณไอออนของทองแดงในน้ำเสีย

5.17 ทดลองกับน้ำเสียอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 100

ทีพีเอ็ม โดยทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนที่ 5.1-5.17 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สรุปและรายงานผล

บทที่ 4

ผลการทดลอง และ การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาวัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด และตัวนำกระแสไฟฟ้า

4.1.1 วัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด

4.1.1.1 ขั้วแคโทด

จะใช้โลหะทองแดงกลวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ยาว 0.5 เซนติเมตรเป็นขั้วแคโทดเนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าสูง (60.0 เมตรต่อโสมห์.ตาราง มิลลิเมตร) รองจากโลหะเงิน (Ag) ที่มีค่าการนำไฟฟ้า (62.5 เมตรต่อโสมห์.ตาราง มิลลิเมตร) นอกจากนี้ยังหาได้ง่าย และมีราคาถูก

4.1.1.2 ขั้วแอโนด

จะใช้ท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร เป็นขั้วแอโนด

4.1.2 วัสดุที่เหมาะสมจะใช้เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์

วัสดุที่เหมาะสมคือ แผ่นสแตนเลส

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากราน้ำเสียสังเคราะห์

4.2.1 ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดงในน้ำเสียเมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 2000, 2500 และ 3000 ลูกตามลำดับ

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 1000 พีพีเอ็ม

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์

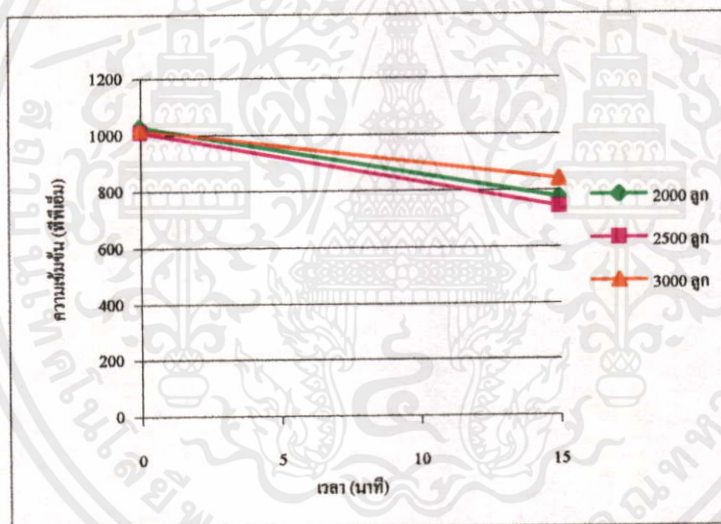
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 15 และ 30 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงระยะเวลาที่เหมาะสม ที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดง
ในน้ำเสีย

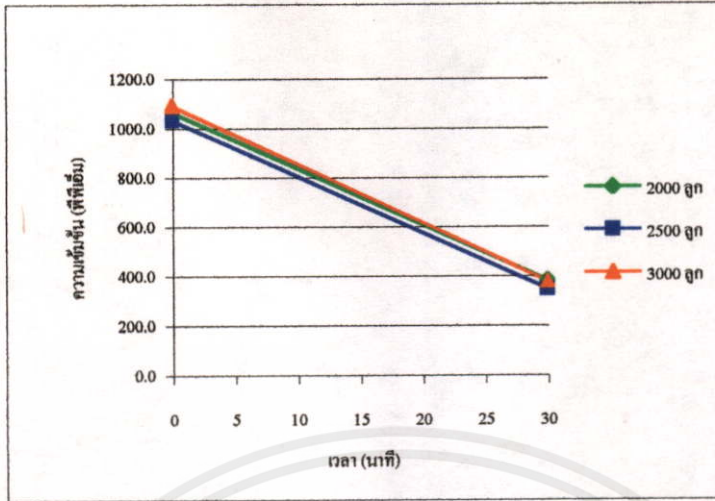
ปริมาณโลหะทองแดงกลวง (ลูก)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			
	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาที)			
	15 นาที		30 นาที	
	เริ่มต้น	15	เริ่มต้น	30
2000	1027.5	775.5	1067.0	381.5
2500	1009.0	742.3	1035.3	348.1
3000	1017.0	840.1	1091.5	379.2

ระยะเวลาที่เหมาะสมจะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดงในน้ำเสียคือ 30
นาที



รูปที่ 4.1 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของทองแดง
ไอออนในน้ำเสีย เมื่อทดลองเป็นเวลา 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของทองแดง ไอออนในน้ำเสีย เมื่อทดลองเป็นเวลา 30 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง

เมื่อกำหนดสภาวะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 2000 ลูก

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 และ 68.8 พีพีเอ็ม

ตามลำดับ

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 180 นาที

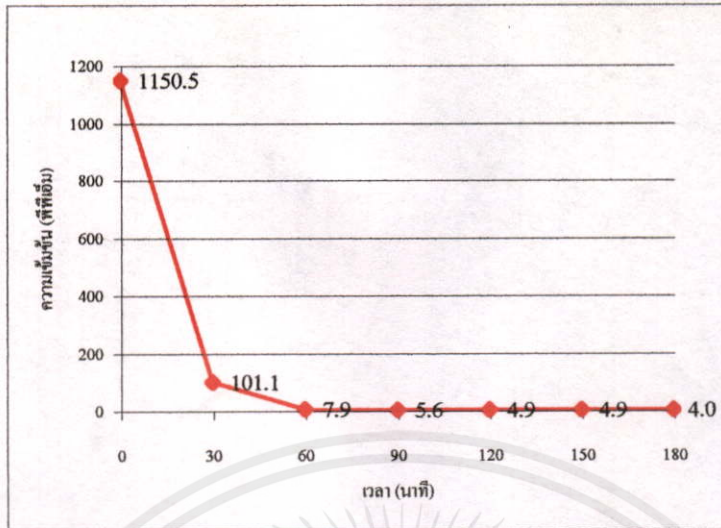
4.2.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย

1150.5 พีพีเอ็ม

ตารางที่ 4.2 แสดงระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)
0	1150.5
30	101.1
60	7.9
90	5.6
120	4.9
150	4.9
180	4.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



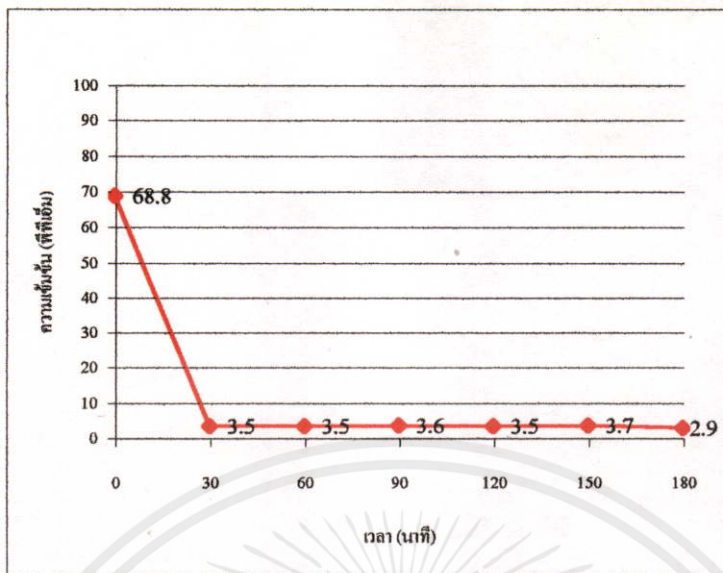
รูปที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม

4.2.2.2 น้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม

ตารางที่ 4.3 แสดงระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม

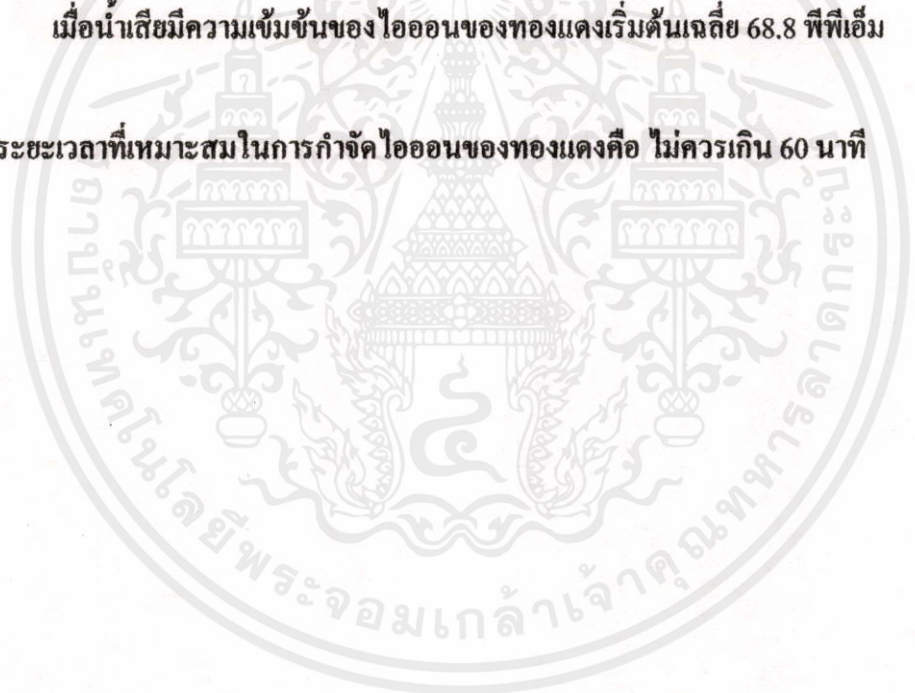
ระยะเวลา (นาทื)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)
0	68.8
30	3.5
60	3.5
90	3.6
120	3.5
150	3.7
180	2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัด ไอออนของทองแดงคือ ไม่ควรเกิน 60 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 1000 พีพีเอ็ม

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 4.5 (ไม่ใส่กรด), 3.0, 1.0 และ 0.7 ตามลำดับ

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

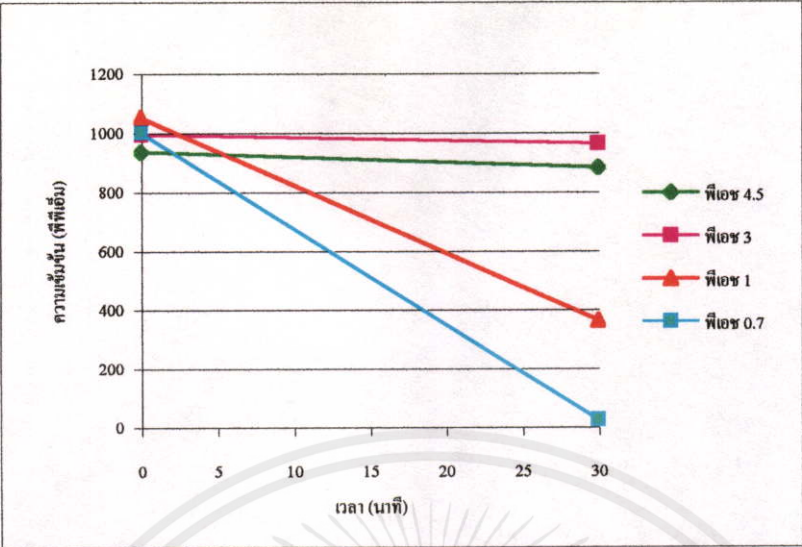
ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 30 นาที

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการศึกษากิจกรรมของความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสีย

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)	
	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาที)	
	เริ่มต้น	30
เริ่มต้น (ประมาณ 4.5)	935.9	882.9
3	995.6	965.2
1	1052.0	366.1
0.7	1002.0	26.2

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการทดลองคือ พีเอช 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัด ไอออนของทองแดงออกจากรากน้ำเสียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า

เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 1000 พีพีเอ็ม

กระแสไฟฟ้าในวงจร 8, 13 และ 19 แอมแปร์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

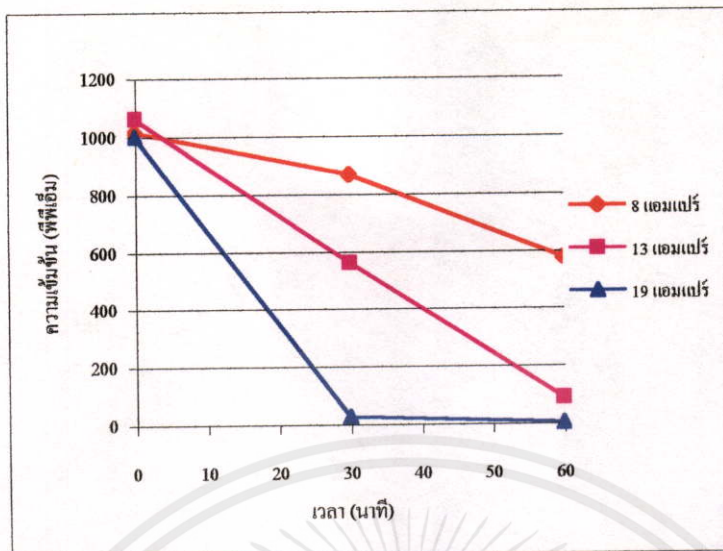
ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจร ของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย

ปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นในวงจร (แอมแปร์)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)		
	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาที)		
	เริ่มต้น	30	60
8	1015.4	868.3	579.5
13	1062.3	563.6	90.5
19	1002	26.2	4.3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำให้ไอออนของทองแดงถูกกำจัดออกจากน้ำเสียมากที่สุดคือ 19.0 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้าที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด

เมื่อกำหนดสภาวะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 500, 2000, 4000, 6000
8000 และ 10000 ลูก ตามลำดับ

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 1000 พีพีเอ็ม
ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

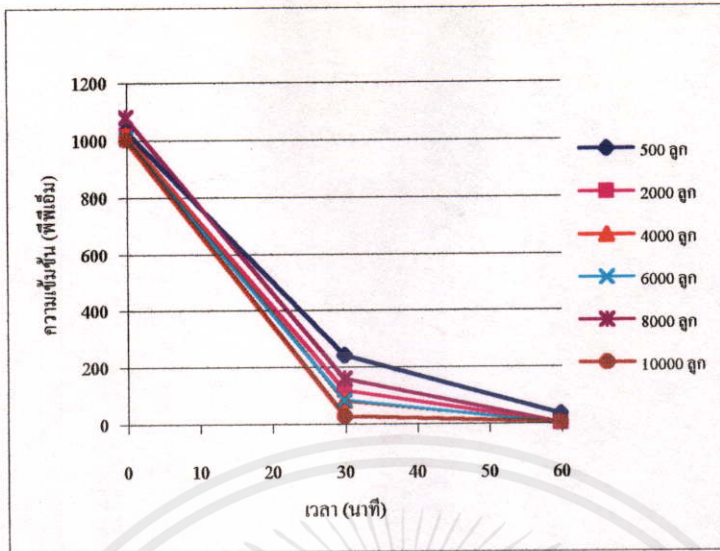
ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการศึกษายัทธิพลของปริมาณโลหะทองแดงกลวง ที่มีผลต่อ
การกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย

ปริมาณโลหะทองแดง กลวง (ลูก)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)		
	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาที)		
	เริ่มต้น	30	60
500	1034.5	242.1	34.4
2000	1017.9	117.4	2.5
4000	1021.7	83.0	1.3
6000	1006.6	83.5	1.1
8000	1078.7	158.8	1.3
10000	1002.0	26.2	4.3

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ทำให้ไอออนของทองแดง ถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย
ได้มากที่สุดคือ 10000 ลูก (สังเกตในช่วง 30 นาทีแรก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ โลหะทองแดงกลวง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก
 ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยในน้ำเสียสังเคราะห์
 1002.0 และ 117.3 พีพีเอ็ม และ น้ำเสียอุตสาหกรรม 871.5 และ 99.97 พีพีเอ็ม
 ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 19 แอมแปร์
 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7
 ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที
 ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

4.3.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย สังเคราะห์

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจาก
น้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นเริ่มต้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของทองแดง (พีพีเอ็ม)		
	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาที)		
	30	45	60
1002.0	26.2	4.3	4.3
117.3	0.65	0.60	0.68

น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม

มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเฉลี่ยเหลืออยู่ 4.3 พีพีเอ็ม

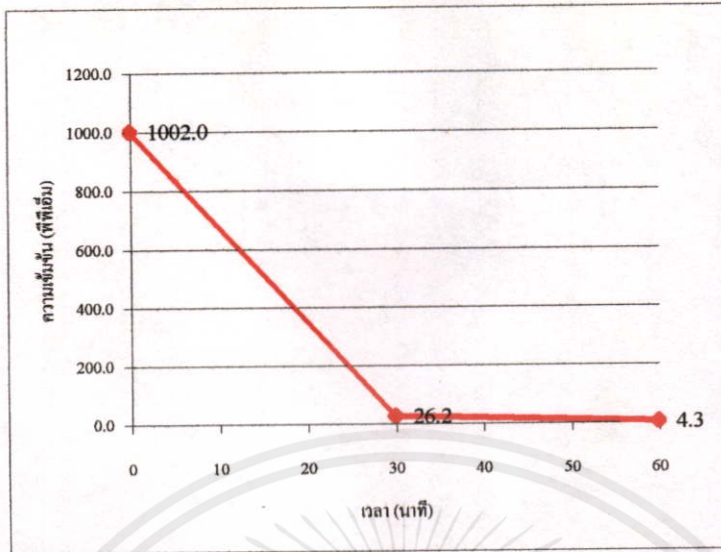
ประสิทธิภาพของการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.59

โลหะทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดคิดเป็นร้อยละ 90.20

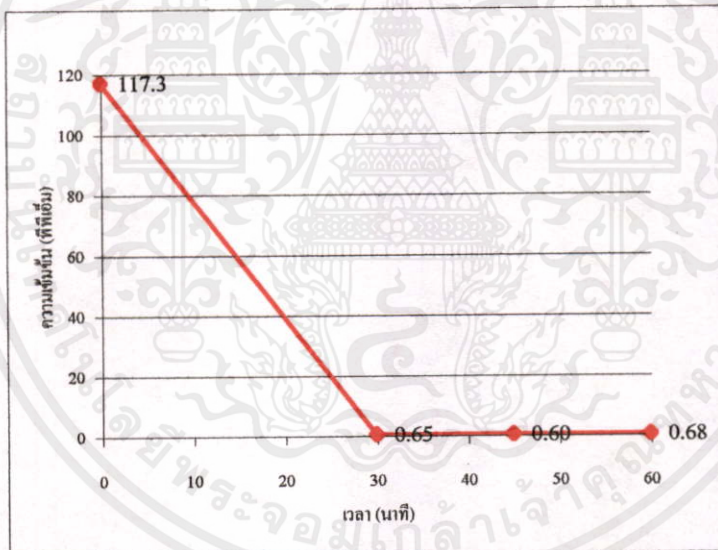
น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม

มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเฉลี่ยเหลืออยู่ 0.7 พีพีเอ็ม

ประสิทธิภาพของการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.42



รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย
สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม



รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย
สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสีย อุตสาหกรรม

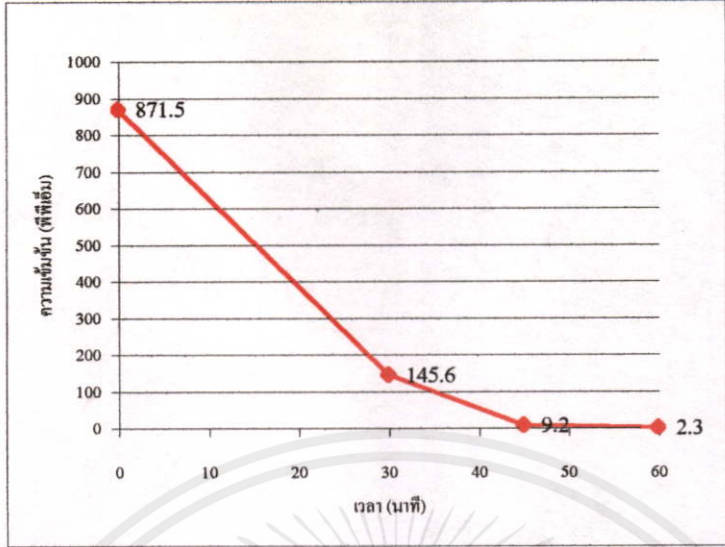
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสียอุตสาหกรรม

ความเข้มข้นเริ่มต้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของทองแดง (พีพีเอ็ม)		
	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาท)		
	30	45	60
871.5	145.6	9.2	2.3
99.97	0.93	0.76	0.75

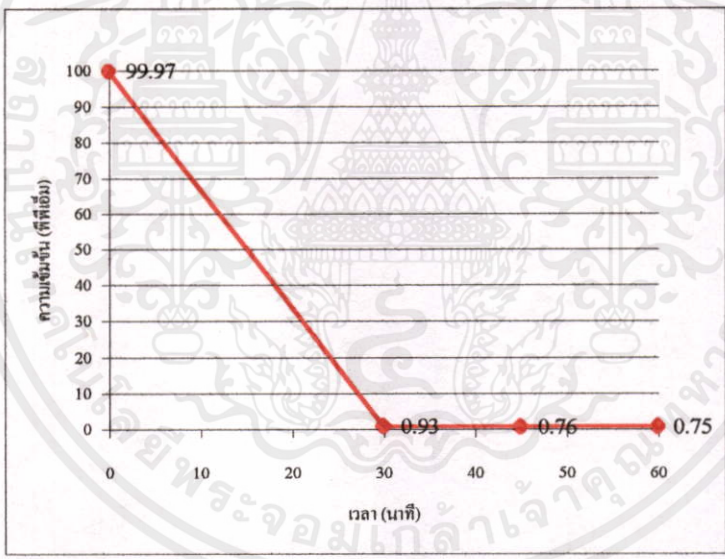
น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเฉลี่ยเหลืออยู่ 2.3 พีพีเอ็ม ประสิทธิภาพของการกำจัด ไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.74 โลหะทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดคิดเป็นร้อยละ 67.11

น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเฉลี่ยเหลืออยู่ 0.75 พีพีเอ็ม ประสิทธิภาพของการกำจัด ไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียอุตสาหกรรม มีความเข้มน้ของ ไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 ฟิฟิเอ็ม



รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียอุตสาหกรรม มีความเข้มน้ของ ไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 ฟิฟิเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์ที่จัดสร้างขึ้นนี้ ได้สร้างขึ้นโดยอาศัยพื้นฐานของเซลล์ชนิดที่มีขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ เรียกได้ว่าเป็นเซลล์ที่มีการหมุนของขั้วอิเล็กโทโรด ภายในเซลล์จะเป็นส่วนของขั้วอิเล็กโทโรด (ขั้วแคโทด และ ขั้วแอโนด) และ น้ำเสีย

2. เซลล์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะแตกต่างกับเซลล์ที่มีการเคลื่อนที่ของขั้วแคโทดแบบอื่นๆ ตรงที่รูปแบบโครงสร้าง และ กลไกบางประการ ดังนี้

2.1 Eco Cell [16]

ภายในเซลล์จะมีขั้วอิเล็กโทโรดอยู่ในทรงกระบอกที่หนึ่ง โดยเซลล์จะแบ่งเป็นส่วนๆ โดยมีแกนหมุนเป็นขั้วแคโทด

2.2 Impact Rod Reactor [16]

ภายในเซลล์มีขั้วอิเล็กโทโรดที่มีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวตั้ง โดยที่ขั้วอิเล็กโทโรดติดกับส่วนที่หมุนได้

2.3 Moving Particle Electrode Reactor [16]

ตัวเซลล์จะอยู่นิ่ง ภายในเซลล์ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทโรดโดยขั้วแคโทด และขั้วแอโนดอยู่ที่ปลายคนละด้านของแกนหมุน และมีขั้วแคโทดทำจากโลหะขนาดเล็กจำนวนมากเป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

2.4 Vertically Moving Partical Bed Electrode [18]

ตัวเซลล์เป็นรูปทรงกระบอกหมุนได้ มีระยะห่างระหว่างขั้วแอโนด และแคโทดน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Vertically Moving Partial Bed Reactor [19]

ตัวเซลล์จะหมุนได้ ภายในเซลล์ประกอบด้วยขั้วแคโทคขนาดเล็กจำนวนมาก ขั้วแอโนควางเป็นแนวอยู่ระหว่างตัวเซลล์

ส่วนเซลล์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่หมุนได้ ขั้วแคโทคทำด้วยโลหะทองแดงกลวง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ยาว 0.5 เซนติเมตร ขั้วแอโนค ทำด้วยท่อสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร และทำหน้าที่เป็นแกนหมุนของตัวเซลล์

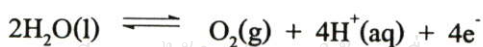
3. การออกแบบเซลล์ให้สามารถหมุนได้ และมีขั้วแคโทคขนาดเล็ก และกลวงมีประโยชน์ดังนี้

3.1 เซลล์ที่หมุนได้ช่วยป้องกันการจับตัวของโลหะเป็นก้อน ตรงผิวบริเวณใดบริเวณหนึ่งของขั้วแคโทค เป็นการกระจายการเกาะของโลหะอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ได้โลหะทองแดงที่บริสุทธิ์ขึ้น [19] นอกจากนี้ยังช่วยลดปรากฏการณ์การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.) ทำให้มีอัตราการส่งผ่านมวล หรือ การเคลื่อนที่ของไอออนในน้ำเสียดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสียดียิ่งขึ้น

3.2 ขั้วแคโทคที่มีขนาดเล็ก และกลวงทำให้มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรหรือพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าขั้วแคโทคแบบแผ่น (Plate Electrode) การที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า ทำให้ความหนาแน่นของกระแสมีค่าน้อยกว่า [15] เป็นการช่วยลดปรากฏการณ์การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากรน้ำเสียดียิ่งขึ้น

4. ในการทดลองทุกๆ การทดลองจะมีแก๊สเกิดขึ้นภายในเซลล์ เนื่องจากปรากฏการณ์การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.) การเกิดศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะมีผลทำให้เกิดแก๊สที่ขั้วเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสของสารละลายทองแดงซัลเฟต ดังนี้ [12]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนค

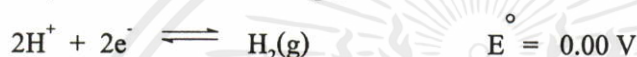
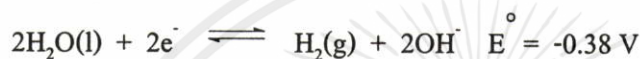


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทค เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากปฏิกิริยาจะเห็นว่าที่ขั้วแอโนดมีแก๊สออกซิเจน (O_2) เกิดขึ้น ขณะเดียวกันที่ขั้วแคโทดจะมีแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เกิดขึ้น โดยในช่วงแรกของการทดลองพบว่าปริมาณแก๊สอยู่เพียงเล็กน้อย และจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เพราะในช่วงแรกของการทดลองแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์มีเพียงแก๊สออกซิเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด ขณะที่แก๊สไฮโดรเจนยังไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนของทองแดงเกิดเป็นโลหะทองแดงเกาะที่ขั้วแคโทดเกิดขึ้นก่อน เพราะมีค่า E° สูงกว่า แต่เมื่อเวลาผ่านไปแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จะมีทั้งแก๊สออกซิเจน และไฮโดรเจนซึ่งสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดดังนี้



จะเห็นได้ว่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของทองแดงมีค่าเป็นบวกมากที่สุด ดังนั้น ไอออนของทองแดงจึงเกิดปฏิกิริยาได้ก่อน เกิดเป็นโลหะทองแดงเกาะที่ขั้วแคโทด (โลหะทองแดงกลวง) ขณะที่ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนยังไม่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ในช่วงแรกของการทดลองจึงพบว่าแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์คือ แก๊สออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเวลาผ่านไปไอออนของทองแดงในน้ำเสียลดลงเรื่อยๆ แนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจะเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้แก๊สที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จึงมีทั้งแก๊สออกซิเจนจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด และแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด ผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mass', M. และคณะ [20] ที่ทำการศึกษาการเกาะของทองแดงเมื่อมีแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นพบว่าแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกาะของไอออนของทองแดงในน้ำเสีย ซึ่งไอออนของทองแดงในน้ำเสียจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีแก๊สออกซิเจนมากขึ้น แสดงว่าเมื่อเวลาผ่านไปแก๊สออกซิเจนภายในเซลล์จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เช่นเดียวกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้

5. ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ที่มีต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

5.1 ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดง

เมื่อทำการทดลอง 30 นาที แล้วเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดง พบว่าไอออนของทองแดงในน้ำเสียจะลดลงในปริมาณที่มากกว่าทำการทดลองเพียง 15 นาที ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ข้อที่ 1. (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.) ที่กล่าวว่า “มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แอโนดหรือแคโทดในขณะที่เกิดอิเล็กโทรไลซิส จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์”

หมายความว่า ปฏิกริยาภายในเซลล์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย มีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และระยะเวลาของการปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เป็นกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และระยะเวลาที่ให้กระแสไหลผ่านเซลล์ไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซลล์ไฟฟ้า ในระยะเวลาที่นานกว่า ปฏิกริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดขึ้นมากกว่าหรือไอออนของทองแดงจะเกิดปฏิกริยากลายเป็นโลหะทองแดงเกาะที่ขั้วแคโทดมากกว่า

5.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง

จากผลการศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง โดยศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 100 และ 1000 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 180 นาที พบว่าระยะเวลาดังแต่เริ่มต้นการทดลองจนถึงเวลา 60 นาที ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียลดลงอย่างรวดเร็ว เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน หลังจากนั้นความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียจะลดลงอย่างช้าๆ เห็นความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงไม่ควรเกิน 60 นาที เพราะการทำการทดลองเกิน 60 นาที ไม่คุ้มค่ากับพลังงาน และ เวลาที่เสียไป

5.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

จากผลการทดลอง เมื่อทำให้น้ำเสียสังเคราะห์ มีความเป็นกรดมากขึ้น (พีเอชต่ำลง) โดยการเติมกรดซัลฟูริก ไอออนของทองแดงจะถูกกำจัดออกจากรน้ำเสีย กลายเป็นโลหะทองแดงเกาะที่ขั้วแคโทดมากขึ้น เนื่องจากกรดซัลฟูริกจะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ได้เป็นอนุภาคเล็กๆ (H^+ และ SO_4^{2-}) อนุภาคเหล่านี้เป็นตัวทำให้มีปริมาณของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายมากขึ้น [5] (มีการให้และรับอิเล็กตรอนกันมากขึ้น) ทำให้เกิดปฏิกริยาเคมีที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองมากขึ้น ไอออนของทองแดงจึงถูกกำจัดออกจากรน้ำเสียได้มากขึ้น เราเรียกกรดซัลฟูริกว่า เป็นตัวให้ความนำไฟฟ้าหรือตัวอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

5.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า

เมื่อทำการทดลองให้กระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้ามากขึ้น ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียจะลดลงมากขึ้น ซึ่งอธิบายได้โดยใช้กฎข้อที่ 1. ของฟาราเดย์ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.)
ไม่ว่า “มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แอโนดหรือแคโทดในขณะที่เกิดอิเล็กโทรไลซิสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์” ปฏิกริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วน

สัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านน้ำเสีย เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้ำเสียมากขึ้น ไอออนของทองแดงในน้ำเสียจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็น โลหะทองแดงเข้าเกาะที่ขั้วแคโทดมากขึ้น

5.5 ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโลหะทองแดงกลวงความเข้มข้นของทองแดงไอออนในน้ำเสียยังคง อธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณโลหะทองแดงกลวงคือ การเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วแคโทดต่อหน่วยปริมาตร หรือการเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับไอออนของทองแดงในน้ำเสียให้มากขึ้น การที่มีพื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของกระแสมีค่าน้อยลง [15] ช่วยลดปรากฏการณ์การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเกินตัว เพราะว่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะมีค่าน้อยลงเมื่อความหนาแน่นของกระแสลดลง ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียดียิ่งขึ้น โดยสังเกตได้ว่า เมื่อเพิ่มจำนวนโลหะทองแดงกลวง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านน้ำเสียจะเพิ่มขึ้น นั่นคือมีปฏิกิริยาการให้ และรับอิเล็กตรอนเร็วขึ้น ดังนั้นไอออนของทองแดงในน้ำเสียจึงเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นโลหะทองแดง เข้าเกาะที่ขั้วแคโทดหรือโลหะทองแดงกลวงมากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนโลหะทองแดงกลวง(ขั้วแคโทด) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Esref,A. [21] ที่กล่าวว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วแคโทดจะสามารถลดความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในสารละลายให้ลงไปอยู่ในระดับที่ต่ำได้ดียิ่งขึ้น และจากหลักการของ Eco-Cell [16] ที่กล่าวว่า การที่ขั้วแคโทดมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วแคโทด ทำให้มีอัตราการส่งผ่านมวลมากกว่าขั้วแคโทดที่มีผิวเรียบถึง 50 เท่า จากผลการวิจัยของ Esref.Avci และหลักการของ Eco-Cell แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วแคโทด เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะออกจากน้ำเสีย

6. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ ที่มีต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย เมื่อทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 และ 1002.0 พีพีเอ็ม เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเหลืออยู่เฉลี่ย 0.86 และ 4.1 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ส่วนการทดสอบกับน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 และ 871.5 พีพีเอ็ม เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่ามีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเหลืออยู่เฉลี่ย 0.75 และ 2.3 พีพีเอ็ม ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อทดสอบกับน้ำเสีย ทั้งจากน้ำเสียสังเคราะห์ และ น้ำเสียอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 100 พีพีเอ็ม ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับช่วงความเข้มข้นของการกำจัดของทองแดง ที่ออกมาจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม คือ 0.74 - 75 พีพีเอ็ม ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.2 พบว่าไอออนของทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง อยู่ในมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด (มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และ นิคม

อุตสาหกรรม ตามประกาศของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และ สิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) [22] และ กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) [23] ที่กำหนดว่า ทองแดงในน้ำทิ้ง ต้องไม่มากกว่า 2.0 พีพีเอ็ม (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้สามารถนำหลักการทางเคมีไฟฟ้า มาสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน เพื่อนำมาใช้กำจัดไอออนของทองแดงออกจากร้าน้ำเสีย โดยเลือกใช้เซลล์ชนิดที่มีขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ภายในเซลล์ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของขั้วอิเล็กโทรด (ขั้วแคโทด และ ขั้วแอโนด) และส่วนของน้ำเสีย ในส่วนของขั้วอิเล็กโทรดนั้น ขั้วแคโทดเป็นโลหะทองแดงกลวง ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ยาว 0.5 เซนติเมตร จำนวน 10000 ลูก ขั้วแอโนดเป็นท่อโลหะสแตนเลส ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร ตัวเซลล์จะต่ออยู่กับระบบการหมุนที่ประกอบด้วย ฟันเฟือง สายพาน และ มอเตอร์ เพื่อหมุนตัวเซลล์ให้มีการไหลวนของขั้วแคโทด และ น้ำเสีย

2. นำเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น มาศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากร้าน้ำเสีย โดยทำการศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ให้ผลดังนี้

2.1 ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาการลดลงของไอออนของทองแดง
ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะเริ่มศึกษาคือ 30 นาทีขึ้นไป

2.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
ระยะเวลาที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 60 นาที

2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ทำให้ไอออนของทองแดงถูกกำจัดได้มากที่สุดคือ 0.7 (พีเอช 0.7)

2.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า

ปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ทำให้ไอออนของทองแดงถูกกำจัดได้มากที่สุดคือ 19 แอมแปร์

2.5 ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด

ปริมาณโลหะทองแดงกลวง ที่ทำให้ไอออนของทองแดงถูกกำจัดได้มากที่สุดคือ 10000

ถูก

3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง

3.1 น้ำเสียสังเคราะห์

3.1.1 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0

พีพีเอ็ม

3.1.1.1 มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเฉลี่ยเหลืออยู่ 4.3

พีพีเอ็ม

3.1.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็น ร้อยละ

99.59

3.1.1.3 น้ำหนักทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดคิดเป็นร้อยละ 90.20

3.1.2 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3

พีพีเอ็ม

3.1.2.1 มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเฉลี่ยเหลืออยู่ 0.7

พีพีเอ็ม

3.1.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็น ร้อยละ

99.42

3.2 น้ำเสียอุตสาหกรรม

3.2.1 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5

พีพีเอ็ม

3.2.1.1 มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเฉลี่ยเหลืออยู่ 2.3

พีพีเอ็ม

3.2.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็น ร้อยละ

99.74

3.2.1.3 น้ำหนักทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดคิดเป็นร้อยละ 67.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97

พีพีเอ็ม

3.2.2.1 มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเฉลี่ยเหลืออยู่ 0.75

พีพีเอ็ม

3.2.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็น ร้อยละ

99.25

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนาการออกแบบเซลล์ให้มีทางระบาย หรือคลายความดันของแก๊ส ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แบบอัด โนมัติ โดยไม่ต้องหยุดหมุนเซลล์
2. ควรมีการพัฒนาให้เป็นเซลล์แบบต่อเนื่อง คือมีเซลล์หลายเซลล์ต่อกันในลักษณะอนุกรม เพื่อให้การกำจัดไอออนของทองแดง มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากเซลล์แรกสามารถกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียได้ต่ำกว่า 10 พีพีเอ็ม และเมื่อผ่านเข้าสู่เซลล์ถัดมา น่าจะสามารถกำจัดไอออนของทองแดงจนอยู่ในมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด ซึ่งทำได้ในเวลาเดียวกัน ดังนั้น เมื่อมีน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ผ่านเข้ามา น้ำทิ้งภายหลังการบำบัด น่าจะมีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงไม่เกิน 2 พีพีเอ็ม ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กฎหมายกำหนดไว้ แล้วจึงนำเซลล์แบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นนี้ มาศึกษาอัตราการกำจัดไอออนของทองแดงต่อชั่วโมงต่อไป
3. จากการศึกษาของ Mass', M. และคณะ [20] พบว่าอัตราเร็วของการหมุน (Rotatio Speed) มีผลต่อการเกิดแก๊สออกซิเจน ถ้าเพิ่มอัตราเร็วของการหมุน แก๊สออกซิเจนก็จะเกิดมากยิ่งขึ้นความเข้มข้นของไอออนของทองแดงก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้อัตราเร็วของการหมุนต่ำจะต้องใช้เวลานานจึงจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงลดลงมาอยู่ในระดับที่เราต้องการจากผลดังกล่าวอธิบายได้ว่า การเพิ่มอัตราเร็วของการหมุนตัวเซลล์ (Rotation Speed) เป็นการลดปรากฏการณ์การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.) เป็นการเพิ่มการส่งผ่านมวล (Mass Transport) หรือการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเนื่องจากการพา (Convection) ซึ่งเป็นขบวนการที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของขั้วอิเล็กโทรด (ในงานวิจัยนี้คือ การเคลื่อนที่ของโลหะทองแดงกลวง) และการเคลื่อนที่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.) ดังนั้นเมื่อไอออนเคลื่อนที่ในสารละลายได้ดีขึ้น ก็จะมีแก๊สออกซิเจนเกิดมากขึ้นที่ขั้วแอโนด ขณะเดียวกันก็จะมีทองแดงไอออนในสารละลาย เกิดปฏิกิริยากลายเป็นโลหะทองแดงเข้าเกาะที่ขั้วแคโทด (โลหะทองแดงกลวง) มากขึ้น

ด้วย สรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราเร็วของการหมุนเซลล์ ทำให้เกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด และมีโลหะทองแดงเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด มากกว่าเซลล์ที่มีอัตราเร็วของการหมุนต่ำ ดังนั้นการวิจัยในอนาคต ควรมีการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วของการหมุนตัวเซลล์ซึ่งอาจทำให้ได้ผลการทดลองที่ดียิ่งขึ้น

4. ควรนำเครื่องปฏิกรณ์ที่จัดสร้างขึ้น มากำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยค่าตัวแปร ที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด จะแตกต่างกันไป ซึ่งควรมีการศึกษาต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทิพย์ ชัยวิริยกุล. “การนำโลหะนิกเกิลในน้ำเสียจากการชุบโลหะกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2536.
- [2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. ข้อมูลโรงงาน. กรุงเทพฯ :ม.ท.ป.
- [3] Nemerror, N.L. **Industrial Water Pollution, Origin, Characteristics and Treatment.**
: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1978.
- [4] สุดใจ จำปา. “การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ.” เอกสารประกอบการอบรมเจ้าหน้าที่ของโรงงานชุบโลหะจากกรมอุตสาหกรรมในเขตกรุงเทพมหานคร. 2524.
- [5] อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : ภาพพิมพ์. ม.ป.ป.
- [6] Tay, J.H. “Waste Minimization and Recycling in Electroplating Workshop.”
Nanyang Technological Institute. 1986.
- [7] เกศสุชา พูลคำ. “การกำจัดโลหะหนักโดยการใส่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขานอ้อย และ ผักตบชวา.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2536.
- [8] ทิพย์ ชัยวิริยกุล. “การนำโลหะนิกเกิลในน้ำเสียจากการชุบโลหะกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2536.
- [9] Forstner, U. and Wittmann, G.T.W. **Metal Pollution in the Aquatic Environment.** 2nd ed.
Berlin : Springer-Verlag. 1981.
- [10] ปรีชา พหลเทพ. เคมีฟิสิกส์ 2 (Physical Chemistry 2). พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ :
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2534.
- [11] อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ :
สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534.
- [12] คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์สาขาเคมีตามโครงการปรับปรุงหลักสูตร
วิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย. 2522. เคมีเล่ม 2. กรุงเทพฯ :
อักษรเจริญทัศน์.
- [13] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. หลักเคมี 2 (Principles of Chemistry), ทฤษฎี โครงสร้าง และปฏิกิริยา
(Theories Structure Reaction). พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : โอเคียนสโตร์. 2526.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

- [14] ธวัชชัย ศรีวิบูลย์ และสมบูรณ์ แก้วปั้นทอง. **ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 2 (Analytical Chemistry Laboratory 2)**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2537.
- [15] อรุณี คงศักดิ์ไพศาล. **เอกสารประกอบคำบรรยายวิชาเคมีวิเคราะห์ 2**. กรุงเทพฯ : ม.ป.ท. 2540.
- [16] Pletcher, D. and Walsh, F.C. **Industrial Electrochemistry**. 2nd ed. n.p. : Unicersity Press Cambridge. 1993.
- [17] Legrand, J. et.al. “Copper Recovery from Dilute Solutions in the Falling-Film Cell.” **Journal of Applied Electrochemistry**. Vol. 16, 1986. pp. 365-373.
- [18] Bergmann, H. et.al. “Experimental and Theoretical Studies on a New Type of Electrochemical Reactor for Waste-Water Treatment.” **Chemical Engineering and Processing**. Vol. 31, 1992. pp.
- [19] Rittel. et.al. “The Vertically Moving Partical Bed Reactor a New Cell Concept in the Field of Electrochemical Process Water Treatment.” **Fachhochschule Anhalt, FB. Elektrotechnik, Bernburger Strabe**. n.p. pp. 52-57.
- [20] Mass', M. et.al. “Copper Removal from Aerated Solution Containing Various Metal Ions Using an undevided Rotating Cylinder Electrode Reactor.” **Journal of Applied Electrochemistry**. Vol. 25, 1995. pp. 340-346.
- [21] Esref, A. “Electrolytic Recovery of Copper from Dilute Solutions Considering Environmental Measure.” **Journal of Applied Electrochemistry**. Vol. 18, 1988. pp. 288-291
- [22] กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม. 2539. **กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายนํ้าทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : ม.ป.ท.
- [23] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2539. **กำหนดคุณลักษณะของนํ้าทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน**. กรุงเทพฯ : ม.ป.ท.
- [24] Grant&Hackh's. **Chemical Dictionary**. 5th ed. Newyork : McGraw-Hill. 1988.
- [25] Oxford University Press. 1990. **A Concise Dictionary of Chemistry**. Oxford : Guildford and King's Lynn.
- [26] สาโรช บุญยกิจสมบัติ. “การบำบัดนํ้าเสียโดยวิธีทางเคมีในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดกลางและเล็ก.” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**. 2535.

- [27] อารี ชาญबंधิตนันท์. “การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ซีเมนต์ผ่านลิแกนด์กำจัดสารตะกั่วในน้ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2536.
- [28] เฮเลน อารมย์ดี. ชูบโลหะ. ม.ป.ท. : กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2535.
- [29] สนิชา คงสุวรรณ และคณะ. “การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์ บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [30] วัชร ขนิษฐบุตร. ม.ป.ป. “การบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ตามหลักสูตร 213009.” กรุงเทพฯ : กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. เอกสารประกอบการฝึกอบรม.
- [31] คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์สาขาเคมีตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย. 2522. เคมีเล่ม 1. กรุงเทพฯ : อักษรเจริญทัศน์.
- [32] Kolthoss, I.N and Elving, P.J. **Treatise on Analytical Chemistry Part II; Analytical Chemistry of the Elements Vol. 3.** London : n.p. 1961.
- [33] McGraw-Hill. 1997. **Encyclopedia of Science & Technology.** 8th ed. R.R. Donnelley & Sons.
- [34] Considine, D.M. **Van Nostrand’s Scientific Encyclopedia.** 8th ed. International Thomson. 1995.
- [35] ฝ่ายห้องทดลองของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน). ให้สัมภาษณ์, 28 ตุลาคม 2542. ชัยกฤษณ์ รัชพิทยากุล ผู้สัมภาษณ์. คำใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลอง

ก. ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ที่มีต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากร้าน้ำเสีย สังกะระห์

1. ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง

เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 2000 ลูก

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยในน้ำเสีย 1150.5 และ 68.8

พีพีเอ็ม ตามลำดับ

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5 พีพีเอ็ม
 1.1.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 49.5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
 ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5
 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาท)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1025.0*	1059.0	1068.0	1063.5
30	103.6	93.2	97.8	98.2
60	5.7*	9.5	9.8	9.7
90	1.6	14.8	20.8	17.8
120	5.6*	0.8	1.8	1.3
150	4.3	2.5	27.7*	3.4
180	1.9	2.9	4.3*	2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 44.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.2 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5
พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1141.0	1190.0	1171.0	1167.3
30	123.8	128.1	120.2	124.0
60	13.0*	7.3	8.2	7.8
90	6.8	5.4	8.7	7.0
120	4.5	4.7	11.8*	4.6
150	6.1	4.7*	7.0	6.6
180	12.8	13.1	11.2	12.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 30.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 45.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.3 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5
พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1122.0	1100.0	1179.0	1133.7
30	107	104.1	101.0	104.0
60	7.5	5.8*	8.2	7.9
90	4.2	3.9*	4.1	4.2
120	6.1*	8.5	9.1	8.8
150	4.4	6.7*	4.9	4.7
180	5.3	5.8	6.9*	5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.4 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1150.5
พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1063.5*	1167.3	1133.7	1150.5
30	98.2	124.0*	104.0	101.1
60	9.7*	7.8	7.9	7.9
90	17.8*	7.0	4.2	5.6
120	1.3	4.6	8.8	4.9
150	3.4	6.6	4.7	4.9
180	2.4	12.4*	5.6	4.0

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม

1.2.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 44.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.5 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม
ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	82.8*	68.5	66.7	67.6
30	7.9*	2.2	1.4	1.8
60	5.9	16.7	1.1	3.5
90	4.8	6.4	2.6	4.6
120	3.9	1.9*	3.4	3.4
150	3.7	4.0	2.4	2.4
180	0.6	2.0	1.7	1.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 45.3 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.6 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม
ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	66.4	73.7	69.8	70
30	6.3*	5.0	5.3	5.2
60	6.2*	1.9	3.3	2.6
90	2.0	2.9	4.7*	2.5
120	3.3	2.7	3.8	3.3
150	2.3	2.1	2.5	2.3
180	3.2	2.8*	3.1	3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 45.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.7 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม
ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	172.5*	147.1	150.3	148.7
30	20.1	19.1	6.4*	19.6
60	2.7	4.5	3.4	3.5
90	1.0	1.0	2.8	1.9
120	1.8	1.7*	1.3	1.3
150	4.0	2.6*	3.8	3.9
180	2.3	2.9	10.1*	2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.8 แสดงผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 68.8 พีพีเอ็ม
เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	67.6	70.0	148.7*	68.8
30	1.8	5.2	19.6*	3.5
60	3.5	2.6*	3.5	3.5
90	4.6	2.5	1.9*	3.6
120	3.7	3.3	1.3*	3.5
150	3.4	2.3*	3.9	3.7
180	1.4	3.2	2.6	2.9

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

เมื่อกำหนดสภาวะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 1000 พีพีเอ็ม

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 4.5 (ไม่ใส่กรด), 3.0, 1.0 และ 0.7 ตามลำดับ

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 30 นาที

2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 (ไม่ใส่กรดซัลฟูริก)

2.1.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 3.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 30.7 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.9 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 (ไม่ใส่กรดซัลฟูริก) ในการทดลอง ครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	932.2	935.7	915.8*	934
30	805.4*	884.2	874.2	879.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 3.3 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 30.7 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.10 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ
ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 (ไม่ใช่กรดซัลฟูริก)
ในการทดลอง ครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	938.3	933.4	941.3	937.7
30	886.9	903.2*	886.2	886.6

2.1.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 3.0 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 25.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 27.8 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.11 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ
ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 (ไม่ใช่กรดซัลฟูริก)
ในการทดลอง ครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	926.8*	953.1	941.4	947.3
30	916.1*	968.6	954.6	961.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.12 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 (ไม่ใช่กรดซัลฟูริก) เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	934.0	937.7	947.3*	935.9
30	879.2	886.6	961.6*	882.9

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

2.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.0

2.2.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 3.0 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 30.4 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.13 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.0 ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาท)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	994.6	990.8	1023.0*	992.7
30	1000.0*	961.2	963.7	962.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 3.4 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 30.3 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.14 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ
ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.0 ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	944.3	961.8	1014.0	973.4
30	964.1*	968.8	967.0	967.9

2.2.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 3.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 29.3 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.15 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ
ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.0 ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1056	988.9	950.2	998.4
30	836.0*	960.7	988.4	974.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.16 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.0 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาทีก)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	992.7	973.4*	998.4	995.6
30	962.5	967.9	974.6*	965.2

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง 1.0

2.3.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 16.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 33.9 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.17 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 1.0 ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	980.9*	1053.0	1057.0	1055.0
30	359.8	350.2	354.2	354.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 17.3 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 30.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 35.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.18 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ
ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 1.0 ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	943.4*	1015.0	1013.0	1014.0
30	271.6*	269.6	268.8	270.0

2.3.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 16.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 31.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.19 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ
ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 1.0 ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1049.0	1049.0	1077.0*	1049.0
30	378.6	361.8	392.1	377.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.20 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 1.0 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1055.0	1014.0*	1049.0	1052.0
30	354.7	270.0*	377.5	366.1

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

2.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7

2.4.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 19.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.9 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.21 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1013.0	998.3	991.3	1000.9
30	50.0	44.6	36.8	43.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 18.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.22 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ
ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1008.0	968.3*	1017.0	1012.5
30	26.3	29.0*	26.1	26.2

2.4.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.23 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ
ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	961.8*	985.8	999.3	992.6
30	29.3*	25.7	26.7	26.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.24 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของ ทองแดง เมื่อน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 0.7 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1000.9	1012.5	992.6	1002.0
30	43.8*	26.2	26.2	26.2

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า

เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 1000 พีพีเอ็ม

กระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 8, 13 และ 19 แอมแปร์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

3.1 กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ (ศักย์ไฟฟ้า 25 โวลต์)

3.1.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.9 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.25 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1013.0	998.3	991.3	1000.9
30	50.0	44.6	36.8	43.8
60	2.8	4.2	0.9	2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.26 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1008.0	968.3*	1017.0	1012.5
30	26.3	29.0*	26.1	26.2
60	3.3	7.1	5.6	5.3

3.1.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.27 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	961.8*	985.8	999.3	992.6
30	29.3*	25.7	26.7	26.2
60	3.9	5.4	4.3	4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.28 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1000.9	1012.5	992.6	1002.0
30	43.8*	26.2	26.2	26.2
60	2.6*	5.3	4.5	4.1

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

3.2 กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ (ศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์)

3.2.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 31.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 34.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.29 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาท)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1096.0	1095.0	1105.0*	1095.5
30	562.2	566.0	537.2*	564.1
60	106.1	97.5	98.4	98.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 32.1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.30 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1064.0	1067.0	1051.0*	1065.5
30	658.2	608.1*	646.8	652.5
60	204.2	181.7	171.6	185.8

3.2.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 31.4 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.31 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1080.0*	1064.0	1054.0	1059.0
30	569.1	564.1	555.8	563.0
60	88.8	83.9	76.1	82.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.32 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 13.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม) ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	1	2	3	
	0	1095.5*	1065.5	
30	564.1	652.5*	563.0	563.6
60	98	185.8*	82.9	90.5

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

3.3 กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ (ศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์)

3.3.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 30.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 31.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.33 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาท)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1007.0	1019.0	953.7*	1013.0
30	954.3	807.4	765.9	842.5
60	573.5	585.7	566.6	575.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 30.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.34 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1001.0	1034.0	1018.0	1017.7
30	771.1	763.2	742.4	758.9
60	589.4	528.6	577.8	583.6

3.3.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 30.1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.35 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1034.0	1053.0	1019.0	1035.3
30	930.3	891.0	860.6	894.0
60	669.2	658.5	631.8*	663.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.36 แสดงผลการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 8.0 แอมแปร์ ในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1013.0	1017.7	1035.3*	1015.4
30	842.5	758.9*	894.0	868.3
60	575.3	583.6	663.9*	579.5

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด

เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 500, 2000, 4000, 6000, 8000 และ 10000 ลูก ตามลำดับ

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 1000 พีพีเอ็ม ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ 25 โวลต์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

4.1 500 ลูก

4.1.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 15 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 32.7 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.37 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 500 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1032.0	1065.0*	1034.0	1033.0
30	312.4	344.5	350.4	347.5
60	59.5	77.0*	60.0	59.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 15.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 33.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.38 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 500 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1019.0	993.9	1031.0	1014.6
30	244.8*	236.4	237.6	237.0
60	35.2	34	37.6*	34.6

4.1.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 14.9 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 31.9 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.39 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 500 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1055.0	1084.0	1029.0	1056.0
30	240.6*	247.2	247.0	247.1
60	42.1*	35.2	33.1	34.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.40 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 500 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาทีก)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1033.0	1014.6	1056.0	1034.5
30	347.5*	237.0	247.1	242.1
60	59.8*	34.6	34.2	34.4

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

4.2 2000 ลูก

4.2.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 16.0 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.7 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.41 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	991.1	1012.0	1079.0*	1001.6
30	103.9	98.8*	105.1	104.5
60	1.9	1.6	3.7*	1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 15.7 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.42 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1020.0	1017.0	1022.0	1019.7
30	115.4	113.8*	115.3	115.4
60	1.3	2.5	3.8	2.5

4.2.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 15.9 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 41.4 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.43 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1016.0	1016.0	1094*	1016.0
30	128.4	132.4	136.0	132.3
60	2.3	4.1*	2.6	2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.44 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 2000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาทีก)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม) ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	1	2	3	
	0	1001.6*	1019.7	
30	104.5	115.4	132.3	117.4
60	1.8*	2.5	2.5	2.5

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

4.3 4000 ลูก

4.3.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 16.1 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.45 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 4000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม) หมายเลขตัวอย่าง			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	1	2	3	
	0	1013.0		
30	73.5	74.2	72.2	73.3
60	0.6	2.2	1.5	1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 16.2 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.1 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.46 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 4000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1026.0	1031.0	1034.0	1030.3
30	85.1*	80.4	80.9	80.7
60	0.6	1.3	1.6	1.2

4.3.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 15.9 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 25.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.4 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.47 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 4000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1053.0	1086.0	1091.0	1076.7
30	92.0	95.5	97.9	95.1
60	0.6	3.1	2.0	1.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.48 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 4000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1013.0	1030.3	1076.7*	1021.7
30	73.3	80.7	95.1	83.0
60	1.4	1.2	1.9*	1.3

หมายเหตุ เครื่องหมาย " * " หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

4.4 6000 ลูก

4.4.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 16.4 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.49 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 6000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1022.0	1019.0	1059.0*	1020.5
30	87.9	63.0	92.5	81.1
60	1.4	3.4*	0.4	0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 17.8 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.1 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.50 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 6000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1019.0	990.3	1075.0*	1004.7
30	97.5*	90.3	92.7	91.5
60	2.6	2.5	1.7*	2.6

4.4.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 17.2 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 37.8 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.51 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 6000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1020.0	996.7	1049.0*	1008.4
30	78.0	76.0	80.0	78.0
60	1.3	1.3	1.2*	1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.52 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 6000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1020.5*	1004.7	1008.4	1006.6
30	81.1	91.5	78.0	83.5
60	0.9	2.6*	1.3	1.1

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

4.5 8000 ลูก

4.5.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 17.8 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 37.4 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.53 แสดงผลการศึกษาปริมาณ โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 8000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาท)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1022.0*	1055.0	1042.0	1048.5
30	174.1	166.5	147.2	162.6
60	3.7*	1.8	1.1	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.8 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.54 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 8000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาท)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1104.0	1062*	1125.0	1114.5
30	162.6	159.2	143.2	155.0
60	0.9	1.2	3.2*	1.1

4.5.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 18.4 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 37.9 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.55 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 8000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาท)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1095.0	1072.0	1052.0	1073.0
30	105.5	110.9	87.7*	108.2
60	2.8	2.7	2.4*	2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.56 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 8000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1048.5	1114.5	1073.0	1078.7
30	162.6	155.0	108.2*	158.8
60	1.5	1.1	2.8*	1.3

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้น ไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

4.6 10000 ลูก

4.6.1 การทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 19.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.9 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.57 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณ โลหะทองแดงกลวง 10000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาท)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1013.0	998.3	991.3	1000.9
30	50.0	44.6	36.8	43.8
60	2.8	4.2	0.9	2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 การทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 18.5 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.58 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 10000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1008.0	968.3*	1017.0	1012.5
30	26.3	29.0*	26.1	26.2
60	3.3	7.1	5.6	5.3

4.6.3 การทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 19.0 แอมแปร์

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.59 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 10000 ลูก ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	961.8*	985.8	999.3	992.6
30	29.3*	25.7	26.7	26.2
60	3.9	5.4	4.3	4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.60 แสดงผลการศึกษาปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 10000 ลูก เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1000.9	1012.5	992.6	1002.0
30	43.8*	26.2	26.2	26.2
60	2.6*	5.3	4.5	4.1

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง คำนับไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ข. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์
เมื่อกำหนดสภาวะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้**

ปริมาณโลหะทองแดงกลางที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 และ 117.3 พีพีเอ็ม

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 19 แอมแปร์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

1. น้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม

1.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.9 องศาเซลเซียส

**ตารางที่ ก.61 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย
มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม
ในการทดลอง ครั้งที่ 1**

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1013.0	998.3	991.3	1000.9
30	50.0	44.6	36.8	43.8
45				
60	2.8	4.2	0.9	2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.62 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม ในการทดลอง ครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	1008.0	968.3*	1017.0	1012.5
30	26.3	29.0*	26.1	26.2
45				
60	3.3	7.1	5.6	5.3

1.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 39.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.63 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม ในการทดลอง ครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	961.8	985.8	999.3	992.6
30	29.3*	25.7	26.7	26.2
45				
60	3.9	5.4	4.3	4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น" อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.64 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	1000.9	1012.5	992.6	1002.0
30	43.8*	26.2	26.2	26.2
45				
60	2.6	5.3	4.5	4.1

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. น้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม

2.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 25.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 34.0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.65 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	120.6	117.4	110.4	116.1
30	6.5	3.2*	8.4	7.5
45	6.7	2.7	20.7*	4.7
60	5.6	4.1	2.8	4.2

2.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.1 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 34.5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.66 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	118.5	114.3	122.6	118.5
30	0.65	0.81*	0.67	0.66
45	1.41	1.35	0.55	1.10
60	0.78	0.54	0.68	0.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า โดยไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 25.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 36.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.67 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	106.4	108.0	109.6	108
30	0.57	0.7	1.75*	0.63
45	0.61	0.52*	0.59	0.60
60	0.56*	0.67	0.68	0.68

2.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.68 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	116.1	118.5	108.0*	117.3
30	7.5*	0.66	0.63	0.65
45	4.7*	1.10*	0.60	0.60
60	4.2*	0.67	0.68	0.68

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่น่ามาคิดค่าเฉลี่ย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรม
เมื่อกำหนดสถานะของตัวแปรในการทดลองไว้ดังนี้

ปริมาณโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด 10000 ลูก

ความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 และ 99.97 พีพีเอ็ม

ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า 19 แอมแปร์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) 0.7

ความเร็วรอบของการหมุนตัวเซลล์ 10.5 รอบต่อนาที

ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 60 นาที

1. น้ำเสียอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5
พีพีเอ็ม

1.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 29.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.8 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.69 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย
มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม
ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	825.7*	862.2	874.4	868.5
30	145.0	177.8*	142.8	143.9
45	8.67*	9.07*	8.71	8.70
60	4.12*	3.75	3.44	3.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 38.5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.70 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	834.6	836.6	828.2*	835.6
30	132	135.6	148.2*	133.8
45	9.46*	9.72	9.7	9.71
60	2.7	1.46	2.02	2.05

1.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 36.1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.71 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	909.8	900.3*	911.0	910.4
30	175.2*	157.6	160.4	159.0
45	3.52	4.45	1.85*	3.99
60	1.15	1.35	1.80*	1.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.72 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	868.5	835.6	910.4	871.5
30	143.9	133.8	159.00	145.60
45	8.70	9.71	3.99*	9.21
60	3.60	2.05	1.25	2.30

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. น้ำเสียอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม

2.1 การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิก่อนทดลอง 26.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 34.2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.73 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	105.6	105.3	106.1*	105.5
30	0.81*	0.92	0.94	0.93
45	0.84	0.99	0.76	0.86
60	0.81	0.80	1.15*	0.81

2.2 การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิก่อนทดลอง 27.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 35.1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.74 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด ไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 2

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	100.0	98.6	98.5	98.6
30	1.04	0.76*	0.95	0.92
45	1.02*	1.48	1.39	1.44
60	1.13*	0.65	0.73	0.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์และสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2.3 การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิก่อนทดลอง 28.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลังทดลอง 34.5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.75 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม ในการทดลองครั้งที่ 3

ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
	หมายเลขตัวอย่าง			
	1	2	3	
0	94.1*	98.9	95.9	95.9
30	0.52	1.73*	0.76	0.64
45	1.71*	0.67	0.62	0.65
60	1.16*	1.00	1.04	1.02

2.4 ค่าเฉลี่ยรวมจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ตารางที่ ก.76 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง เมื่อน้ำเสีย มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 99.97 พีพีเอ็ม เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง

ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของไอออนของทองแดง (พีพีเอ็ม)			ค่าเฉลี่ย รวม (พีพีเอ็ม)
	ปริมาณครั้งที่ทำการทดลอง			
	1	2	3	
0	105.5	98.6	95.9	100.0
30	0.93	0.92	0.64*	0.93
45	0.86	1.44*	0.65	0.76
60	0.81	0.69	1.02*	0.75

หมายเหตุ เครื่องหมาย "*" หมายถึง ค่านั้นไม่น่ามาคิดค่าเฉลี่ย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณค่าต่าง ๆ

1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

1.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม

ทองแดง 63.5 มิลลิกรัม มีอยู่ในทองแดงซัลเฟต	=	249.68	มิลลิกรัม
" 1000 "	=	$\frac{249.68 \times 1000}{63.5}$	มิลลิกรัม
	=	3931.968	มิลลิกรัม
	=	3.93196	กรัม
ต้องการเตรียมน้ำเสียมีปริมาตร 6 ลิตร ดังนั้น			
สารละลายปริมาตร 1 ลิตร ต้องชั่งทองแดงซัลเฟต	=	3.93196	กรัม
" 6 ลิตร "	=	3.93196×6	กรัม
	=	23.5914	กรัม

ดังนั้นต้องชั่งทองแดงซัลเฟตมา 23.5914 กรัม มาละลายในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ก็จะได้ความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 3000 พีพีเอ็ม เทลงในถังผสม แล้วตามด้วยน้ำกลั่นอีก 4 ลิตร เหย้าให้เข้ากัน จะได้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม

1.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม

ทองแดง 63.5 มิลลิกรัม มีอยู่ในทองแดงซัลเฟต	=	249.68	มิลลิกรัม
" 100 "	=	$\frac{249.68 \times 100}{63.5}$	มิลลิกรัม
	=	393.1968	มิลลิกรัม
	=	0.39319	กรัม
ต้องการเตรียมน้ำเสียมีปริมาตร 6 ลิตร ดังนั้น			
สารละลายปริมาตร 1 ลิตร ต้องชั่งทองแดงซัลเฟต	=	0.39319	กรัม
" 6 ลิตร "	=	0.39319×6	กรัม
	=	2.35914	กรัม

ดังนั้นต้องชั่งทองแดงซัลเฟตมา 2.35914 กรัม มาละลายในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ก็จะมีค่าความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 300 พีพีเอ็ม เทลงในถังผสม แล้วตามด้วยน้ำกลั่นอีก 4 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง เริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม

2. การเตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรมหุบเคลือบผิวด้วยโลหะ

2.1 การเตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรม ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม

น้ำเสียอุตสาหกรรม มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 5146 พีพีเอ็ม

น้ำเสีย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	1000	มิลลิกรัม
"	6000	"	"	=	$\frac{6000 \times 1000}{1000}$	มิลลิกรัม
ถ้าทองแดง	5146	มิลลิกรัม	ในน้ำเสีย	=	1000	มิลลิลิตร
"	6000	มิลลิกรัม	"	=	$\frac{6000 \times 1000}{5146}$	มิลลิลิตร
				=	1165.954	มิลลิลิตร

ดังนั้นนำน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีไอออนของทองแดงอยู่ 5146 พีพีเอ็ม มา 1165.9 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เทลงในถังผสมแล้วตามด้วยน้ำกลั่นอีก 4 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม

2.2 การเตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรม ให้มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม

น้ำเสีย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	100	มิลลิกรัม
"	6000	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{6000 \times 100}{1000}$	มิลลิกรัม
				=	600	มิลลิกรัม
ถ้าทองแดง	5146	มิลลิกรัม	ในน้ำเสีย	=	1000	มิลลิลิตร
"	600	มิลลิกรัม	"	=	$\frac{600 \times 1000}{5146}$	มิลลิลิตร
				=	116.59	มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร 5146 รังที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นนำน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีไอออนของทองแดงอยู่ 5146 พีพีเอ็ม มา 116.59 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เติลงในถังผสมแล้วตามด้วยน้ำกลั่นอีก 4 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีไอออนของทองแดง 100 พีพีเอ็ม

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานของทองแดง เพื่อใช้เทียบหาปริมาณของไอออนของทองแดงจากการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ

สารละลายมาตรฐานของทองแดงสำหรับใช้กับเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม

3.1 สารละลายมาตรฐานของทองแดง ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 0.5 พีพีเอ็ม

สารละลาย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	0.5	มิลลิกรัม
"	100	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{0.5 \times 100}{1000}$	มิลลิกรัม
				=	0.05	มิลลิกรัม
ถ้าทองแดง	1000	มิลลิกรัม	ในสารละลาย	=	1000	มิลลิลิตร
"	0.05	มิลลิกรัม	"	=	$\frac{0.05 \times 1000}{1000}$	มิลลิลิตร
				=	0.05	มิลลิลิตร

ดังนั้นนำสารละลายมาตรฐานของทองแดง ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม มา 0.05 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานของทองแดงที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 0.5 พีพีเอ็ม

3.2 สารละลายมาตรฐานของทองแดงที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1, 5, 10 และ 15 พีพีเอ็ม

มีวิธีคำนวณเช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐานของทองแดง ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 0.5 พีพีเอ็ม สรุปได้ว่านำสารละลายมาตรฐานของทองแดงที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม มา 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานของทองแดงที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1, 5, 10 และ 15 พีพีเอ็ม ตามลำดับ

4. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ และ น้ำเสียอุตสาหกรรม ที่ผ่านการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ ก่อนนำไปวัดหาปริมาณความเข้มข้นของไอออนของทองแดง ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

4.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่างๆ

ปริมาตรของน้ำเสียที่นำขึ้นมาจากการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ เท่ากับ 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงนำไปวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

สารละลาย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	1000	มิลลิกรัม
"	0.5	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{1000 \times 0.5}{1000}$	มิลลิกรัม
				=	0.5	มิลลิกรัม
สารละลาย	50	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	0.5	มิลลิกรัม
"	1000	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{1000 \times 0.5}{50}$	มิลลิกรัม
				=	10	มิลลิกรัม

ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนของทองแดงก่อนนำไปวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer จะมีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงประมาณ 10 พีพีเอ็ม ซึ่งอยู่ในช่วงความเข้มข้นมาตรฐานที่เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer สามารถวัดได้ (0.1 ถึง 15 พีพีเอ็ม)

4.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่างๆ

ปริมาตรของน้ำเสียที่นำขึ้นมาจากการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ เท่ากับ 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงนำไปวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	สารละลาย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	100	มิลลิกรัม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น	"	5	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{100 \times 5}{1000}$	มิลลิกรัม
					=	0.5	มิลลิกรัม

สารละลาย	50	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	0.5	มิลลิกรัม
"	1000	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{1000 \times 0.5}{50}$	มิลลิกรัม
				=	10	มิลลิกรัม

ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนของทองแดงก่อนนำไปวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer จะมีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงประมาณ 10 พีพีเอ็ม ซึ่งอยู่ในช่วงความเข้มข้นมาตรฐานที่เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer สามารถวัดได้ (0.1 ถึง 15 พีพีเอ็ม)

4.3 การเตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรม เมื่อทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่างๆ

ปริมาตรของน้ำเสียที่นำขึ้นมาจากการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ มีปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดย่อย นำไปผ่านขบวนการย่อย แล้วใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น บีบเปิดสารละลายออกมา 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นจึงนำไปวัดหาปริมาณความเข้มข้นของไอออนของทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

สารละลาย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	1000	มิลลิกรัม
"	5	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{5 \times 1000}{1000}$	มิลลิกรัม
				=	5	มิลลิกรัม
สารละลาย	50	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	5	มิลลิกรัม
"	1000	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{5 \times 1000}{50}$	มิลลิกรัม
				=	100	มิลลิกรัม
สารละลาย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	100	มิลลิกรัม
"	5	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{5 \times 100}{1000}$	มิลลิกรัม
				=	0.5	มิลลิกรัม
สารละลาย	50	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	0.5	มิลลิกรัม
"	1000	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{0.5 \times 1000}{50}$	มิลลิกรัม
				=	10	มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการที่ก่อให้เกิดประโยชน์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น"อีกทั้งห้าม 1000 มิลลิกรัม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ไม่ใช่

ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนของทองแดงก่อนนำไปวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer จะมีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงประมาณ 10 พีพีเอ็ม ซึ่งอยู่ในช่วงความเข้มข้นมาตรฐานที่เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer สามารถวัดได้ (0.1 ถึง 15 พีพีเอ็ม)

4.4 การเตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรม เมื่อทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่างๆ

มีวิธีการเตรียม และ วิธีการคำนวณเหมือนกับ การเตรียมน้ำเสีย เมื่อทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่างๆ

5. การคำนวณความเข้มข้นย้อนกลับจากผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer เพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอน

5.1 การคำนวณเมื่อทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม

ปริมาตรของน้ำเสียที่นำขึ้นมาจากการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ เท่ากับ 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงนำไปวัดหาปริมาณความเข้มข้นของไอออนของทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ยกตัวอย่างเมื่อเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer คำนวณความเข้มข้นของไอออนของทองแดงที่ระยะเวลา 60 นาที เทียบกับมาตรฐานจะอ่านค่าได้เท่ากับ 2 พีพีเอ็ม

สารละลาย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	2	มิลลิกรัม
"	50	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{50 \times 2}{1000}$	มิลลิกรัม
				=	0.1	มิลลิกรัม
สารละลาย	0.5	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	0.1	มิลลิกรัม
"	1000	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{1000 \times 0.1}{0.5}$	มิลลิกรัม
				=	200	มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ดังนั้นความเข้มข้นที่แน่นอนของไอออนของทองแดง เมื่อทำการทดลองผ่านไป 60 นาที
 ไม่ว่าจะวัดใควงทั้งสิ้น ลึกทั้งหมบให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 มีค่าเท่ากับ 200 พีพีเอ็ม ทุกๆ การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไอออนของ
 ทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่างๆก็จะมีวิธีการคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนแบบเดียวกัน

5.2 การคำนวณเมื่อทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง เริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม ทุกๆ การทดลอง ที่ระยะเวลาต่างๆ

มีวิธีการคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนแบบเดียวกับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม เพียงแต่ปริมาตรของน้ำเสียที่นำขึ้นมาจากการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ จะเท่ากับ 5 มิลลิลิตร

5.3 การคำนวณเมื่อทดลองกับน้ำเสียอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม

ปริมาตรของน้ำเสียที่นำขึ้นมาจากการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ เท่ากับ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นเปิดน้ำเสียออกมา 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงนำไปวัดหาปริมาณความเข้มข้นของไอออนของทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ยกตัวอย่างเมื่อเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer คำนวณความเข้มข้นของไอออนของทองแดงที่ระยะเวลา 60 นาที เทียบกับมาตรฐานจะอ่านค่าได้เท่ากับ 2 พีพีเอ็ม

สารละลาย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	2	มิลลิกรัม
"	50	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{50 \times 2}{1000}$	มิลลิกรัม
				=	0.1	มิลลิกรัม
สารละลาย	5	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	0.1	มิลลิกรัม
"	50	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{50 \times 0.1}{5}$	มิลลิกรัม
				=	1.0	มิลลิกรัม
สารละลาย	5	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	1.0	มิลลิกรัม
"	1000	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{1000 \times 1.0}{5}$	มิลลิกรัม
				=	200	มิลลิกรัม

ดังนั้นความเข้มข้นที่แน่นอนของไอออนของทองแดง เมื่อทำการทดลองผ่านไป 60 นาที มีค่าเท่ากับ 200 พีพีเอ็ม ทุกๆ การทดลองกับน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 1000 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่างๆก็จะมีวิธีการคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนแบบเดียวกัน

5.4 การคำนวณเมื่อทดลองกับน้ำเสียอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม

ปริมาตรของน้ำเสียที่นำขึ้นมาจากการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ เท่ากับ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงนำไปวัดหาปริมาณความเข้มข้นของไอออนของทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ยกตัวอย่างเมื่อเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer คำนวณความเข้มข้นของไอออนของทองแดงที่ระยะเวลา 60 นาที เทียบกับมาตรฐานจะอ่านค่าได้เท่ากับ 2 พีพีเอ็ม

สารละลาย	1000	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	2	มิลลิกรัม
"	50	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{50 \times 2}{1000}$	มิลลิกรัม
				=	0.1	มิลลิกรัม
สารละลาย	5	มิลลิลิตร	มีทองแดง	=	0.1	มิลลิกรัม
"	1000	มิลลิลิตร	"	=	$\frac{1000 \times 0.1}{5}$	มิลลิกรัม
				=	20	มิลลิกรัม

ดังนั้นความเข้มข้นที่แน่นอนของไอออนของทองแดง เมื่อทำการทดลองผ่านไป 60 นาที มีค่าเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ทุกๆ การทดลองกับน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดง 100 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาต่างๆ ก็จะมีวิธีการคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนแบบเดียวกัน

6. การเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่มีความเข้มข้น 3 โมลาร์ จำนวน 2 ลิตร เพื่อนำมาทำความสะอาดโลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ภายหลังทำการทดลองเสร็จสิ้นในแต่ละการทดลองเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกคือ 95 % หมายถึง สารละลายที่มีมวล 100 กรัม จะมีกรดซัลฟูริก 95 กรัม ค่าความถ่วงจำเพาะ 1.83 กรัม หมายถึง สารละลาย 1 มิลลิลิตร จะมีมวลกรดซัลฟูริก 1.83 กรัม

สารละลาย	100	กรัม	จะมีมวลกรดซัลฟูริก	=	95	กรัม
"	1.83	กรัม	"	=	$\frac{95 \times 1.83}{100}$	กรัม
				=	1.7385	กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร 100 ครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย 1 มิลลิลิตร มีมวลกรดซัลฟูริก = 1.7385 กรัม
มวล โมเลกุลของกรดซัลฟูริก 98 กรัมต่อโมล

สารละลาย 1 มิลลิลิตร มีโมลของกรดซัลฟูริก = $\frac{1.7385}{98}$ โมล
" 1000 มิลลิลิตร " = $\frac{1000 \times 1.7385}{98}$
= 17.74 โมล

ถ้าต้องการเตรียมกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 3 โมลาร์ จำนวน 2 ลิตร

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นกรดซัลฟูริก = 3 โมล
" 2000 มิลลิลิตร " = $\frac{2000 \times 3}{1000}$ โมล
= 6 โมล

ถ้าต้องการเตรียมกรดซัลฟูริก 17.74 โมล ในสารละลาย = 1000 มิลลิลิตร
" 6 โมล " = $\frac{6 \times 1000}{17.74}$ มิลลิลิตร
= 338.2 มิลลิลิตร

ดังนั้นปีเปิดสารละลายกรดซัลฟูริกมา 338.2 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 3 โมลาร์

7. การคำนวณประสิทธิภาพของการกำจัดไอออนของทองแดงในน้ำเสียคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

7.1 น้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม

คิดจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเริ่มต้นที่แท้จริงจากผลการทดลอง เมื่อทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 1002.0 พีพีเอ็ม เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 60 นาที มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงในน้ำเสียเหลือเฉลี่ยเท่ากับ 4.1 พีพีเอ็ม แสดงว่ามีไอออนของทองแดงหายไป 997.9 พีพีเอ็ม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การหายไปของไอออนของทองแดงได้ดังนี้

ไอออนของทองแดง 1002.0 พีพีเอ็ม คิดเป็น = 100 %
997.9 พีพีเอ็ม = $\frac{997.9 \times 100}{1002.0}$ %
= 99.59 %

ดังนั้นประสิทธิภาพของการบำบัดไอออนของทองแดงจะเท่ากับ 99.59 เปอร์เซ็นต์

7.2 วิธีคำนวณประสิทธิภาพของการบำบัดไอออนของทองแดง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 117.3 พีพีเอ็ม และ น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 และ 99.97 พีพีเอ็ม

เหมือนกับวิธีคำนวณประสิทธิภาพของการบำบัดไอออนของทองแดง ของน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม โดยทั้งหมดคิดจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเริ่มต้นที่แท้จริงจากผลการทดลอง

8. การคำนวณประสิทธิภาพของการนำไอออนของทองแดงในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ ในรูปโลหะทองแดงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

คิดจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเริ่มต้นที่แท้จริงจากผลการทดลอง

8.1 เมื่อทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม

ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1002.0 พีพีเอ็ม

สารละลาย	1	ลิตร	มีทองแดง	=	1002.0	มิลลิกรัม
"	6	ลิตร	"	=	$\frac{6 \times 1002.0}{1}$	มิลลิกรัม
				=	6012	มิลลิกรัม
				=	6.012	กรัม
ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ ไอออนของทองแดงเมื่อสิ้นสุดการทดลอง					4.1	พีพีเอ็ม
สารละลาย	1	ลิตร	มีทองแดง	=	4.1	มิลลิกรัม
"	6	ลิตร	"	=	$\frac{6 \times 4.1}{1}$	มิลลิกรัม
				=	25	มิลลิกรัม
				=	0.025	กรัม

ดังนั้นปริมาณ ไอออนของทองแดงที่หายไปหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็น โลหะทองแดง เข้าเกาะที่โลหะทองแดงกลวง ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ตามทฤษฎีมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร 5.987 กรัม

จากผลการทดลองปริมาณทองแดงที่เกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็น โลหะทองแดงเข้าเกาะที่โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 5.4 กรัม

น้ำหนักของทองแดง	5.987	กรัม	คิดเป็น	=	100	%
"	5.4	กรัม	"	=	$\frac{5.4 \times 100}{5.987}$	%
				=	90.20	%

ดังนั้นประสิทธิภาพการนำไอออนของทองแดงในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่คิดเป็น 90.20 %

8.2 เมื่อทดสอบกับน้ำเสียอุตสาหกรรม ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม

ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 871.5 พีพีเอ็ม

สารละลาย	1	ลิตร	มีทองแดง	=	871.5	มิลลิกรัม
"	6	ลิตร	"	=	$\frac{6 \times 871.5}{1}$	มิลลิกรัม
				=	5229	มิลลิกรัม
				=	5.229	กรัม

ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 2.3 พีพีเอ็ม

สารละลาย	1	ลิตร	มีทองแดง	=	2.3	มิลลิกรัม
"	6	ลิตร	"	=	$\frac{6 \times 2.3}{1}$	มิลลิกรัม
				=	13.8	มิลลิกรัม
				=	0.0138	กรัม

ดังนั้นปริมาณไอออนของทองแดงที่หายไปหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นโลหะทองแดงเข้าเกาะที่โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ตามทฤษฎีมีค่าเท่ากับ

$$= 5.229 - 0.0138 \quad \text{กรัม}$$

$$= 5.2152 \quad \text{กรัม}$$

จากผลการทดลองปริมาณทองแดงที่เกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นโลหะทองแดงเข้าเกาะที่โลหะทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขั้วแคโทด มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 กรัม

น้ำหนักของทองแดง	5.2152	กรัม	คิดเป็น	=	100	%
"	3.5	กรัม	"	=	$\frac{3.5 \times 100}{5.2152}$	%
				=	67.11	%

เอกสารนี้เป็น ดังนั้นประสิทธิภาพการนำไอออนของทองแดงในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ คิดเป็น 67.11 %

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

คำจำกัดความ

1. “โรงงานอุตสาหกรรม” หมายถึง โรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน
2. “น้ำเสีย” หมายถึง ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น
3. “น้ำทิ้ง” หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการ โรงงานอุตสาหกรรม ที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคณงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ [22]
4. “โลหะหนัก” หมายถึง โลหะที่มีน้ำหนักจำเพาะ (Specific Gravity) มากกว่า 4 มีน้ำหนักอะตอม (Atomic Mass) สูง มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 กลุ่มของโลหะหนักอยู่ภายในคาบที่ 4-7 ครึ่งล่างของตารางธาตุ เรียกโลหะกลุ่มนี้ว่ากลุ่มโลหะทรานซิชัน (Transition Metals) โดยปกติโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ สะท้อนแสงได้ดี คุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนักคือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ทำให้สามารถรวมตัวกับสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูป สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักโดยทั่วไปจะมีสี ซึ่งละลายน้ำแล้วมีฤทธิ์เป็นได้ทั้งกรดอ่อนและเบสอ่อน โลหะหนักอาจเป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์ก็ได้ การที่โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าในรูปโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะหนักเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนอยู่ในดิน น้ำ อากาศ และอาหาร แล้วเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าสู่สมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้ กลุ่มโลหะเหล่านี้จึงเป็นสาเหตุของมลพิษที่มีต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งมาจากหลายแหล่งเช่น ตะกั่วที่อยู่ในน้ำมันเบนซิน น้ำเสียจากอุตสาหกรรม และการชะไอออนของโลหะหนักออกมาจากดินลงสู่ทะเลสาบและ แม่น้ำ โดยอิทธิพลของฝนกรด [7], [24], [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

1. การกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 [22]

1.1 โลหะหนักทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (มิลลิกรัม/1 หรือ พีพีเอ็ม)

1.2 ความเป็นกรด และ ด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และ ไม่มากกว่า 9.0

1.3 อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 °c

1.4 สีต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

1.5 กลิ่นต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

2. การกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง จากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และ นิคมอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และ สิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) [23]

2.1 โลหะหนักทองแดง (Cu) ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (มิลลิกรัม/1 หรือ พีพีเอ็ม)

2.2 ค่าความเป็นกรด และ ด่าง (pH Value) ระหว่าง 5.5 ถึง 9.0

2.3 อุณหภูมิ (Temperature) ของน้ำทิ้งที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะไม่เกิน 40 °c

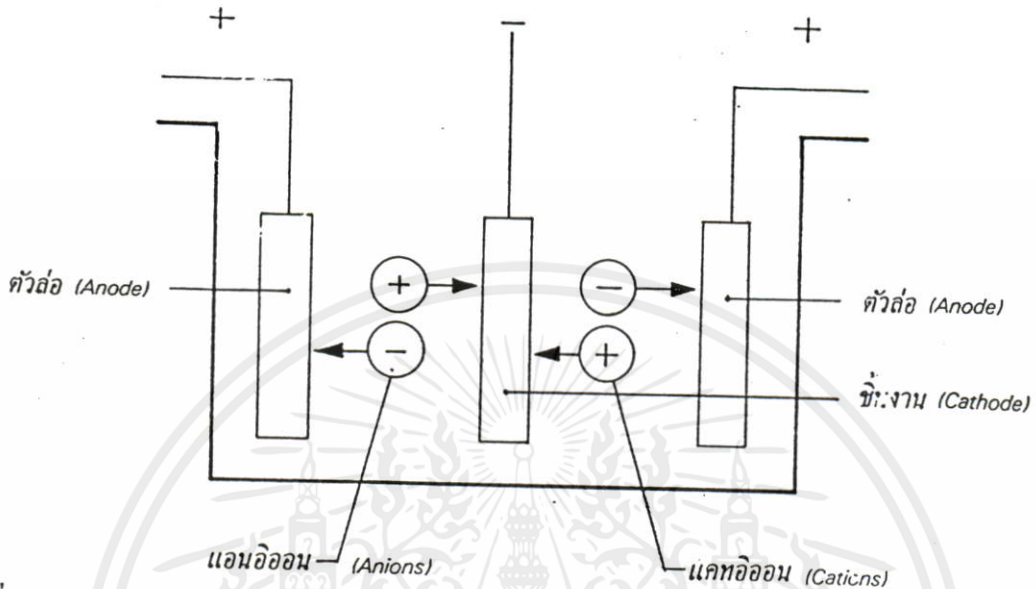
2.4 สี หรือ กลิ่น (Color or Odor) เมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะแล้วไม่เป็นที่พึง

รังเกียจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

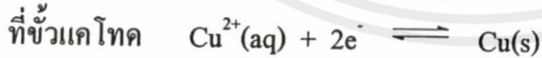
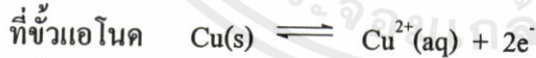
ภาคผนวก ค.

หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)



รูปที่ ค.1 แสดงการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

จากรูปจะเห็นว่าโลหะที่ใช้เคลือบทำหน้าที่เป็นแอโนด (Anode) หรือตัวล่อ เป็นขั้วบวก ส่วนโลหะที่ถูกเคลือบทำหน้าที่เป็นแคโทด (Cathode) หรือขั้วจางาน เป็นขั้วลบ สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะต้องมีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบเช่น ในการชุบโลหะทองแดงบนแผ่นสังกะสีจะต้องมีแอโนดหรือตัวล่อเป็นโลหะทองแดง แคโทดหรือขั้วจางานเป็นโลหะสังกะสี สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีไอออนของทองแดงละลายในสารละลาย (ใช้สารละลายของทองแดงซัลเฟต) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาจะเกิดดังต่อไปนี้



อธิบายได้ว่า เมื่อทองแดงซัลเฟตละลายน้ำ จะแยกสลายออกเป็นไอออน 2 ส่วนคือ ไอออนทองแดง (Cu^{2+}) มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก และ ซัลเฟต (SO_4^{2-}) มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ไอออนของทองแดงที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก จะวิ่งเข้าหาขั้วแคโทด (Cathode) หรือขั้วจางาน ซึ่งเป็นขั้วลบ เกิดเป็นผงสีแดงเกาะติดอยู่บนแผ่นสังกะสี ส่วนไอออนของซัลเฟตที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ จะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด (Anode) หรือตัวล่อ ซึ่งเป็นขั้วบวก ทำปฏิกิริยากับขั้วแอโนดซึ่งเป็นโลหะทองแดง ทำให้ทองแดงละลายออกมาเกิดเป็นทองแดงซัลเฟตแทนที่ทองแดงซัลเฟตตัวก่อนที่หมดไป ทองแดงซัลเฟตตัวหลังนี้จะแยกสลายออกเป็น 2 ส่วนอีกคือ ไอออนทองแดง (Cu^{2+}) และ ไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไอออนทองแดงจะวิ่งไป

ขั้วลบเกาะติดอยู่ที่ขั้วลบ ไอออนซัลเฟตจะวิ่งไปที่ขั้วบวก ทำปฏิกิริยากับขั้วบวกกลายเป็นทองแดงซัลเฟตขึ้นมาแทนที่อีก ปฏิกิริยาจะหมุนเวียนเช่นนี้ตลอดไป เท่าที่ยังคงให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน [5]

ขั้นตอนการชุบโลหะ

รูปแบบขั้นตอนในการชุบโลหะอย่างง่ายประกอบไปด้วย การเตรียมชิ้นงานซึ่งหมายถึง การขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาด และความเรียบตามต้องการ จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดเพื่อ กำจัดไขมัน จากนั้นนำไปจุ่มกรดเพื่อกัดเอาสนิมออกแล้วนำชิ้นงานไปชุบในน้ำยา ซึ่งควบคุม สภาพการชุบตามกำหนด หลังจากเสร็จแล้วนำไปอบแห้ง สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดง ในรูป



รูปที่ ๓.๒ แสดงขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย

ความซับซ้อนของขั้นตอนในการชุบจะขึ้นอยู่กับชนิดโลหะที่เป็นวัตถุชุบ และชนิดของ วัสดุโลหะที่ต้องการ โดยวัตถุชุบส่วนมากจะเป็นเหล็ก เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขัดชิ้นงานก่อนชุบ

แบ่งออกเป็นการขัดหยาบ และการขัดละเอียด โดยการขัดหยาบเป็นการขัดขั้นแรก โดยขัดเอารอยขูดขีดเล็กๆหรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ลวดขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อเพื่อลบรอยจากการขัดหยาบทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ลวดขัดที่มีทรายละเอียดเบอร์ 280 ขึ้นไป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานเล็กมากๆ อาจขัดโดยการใช้อย่างหนุ่นซึ่งมีหินขัดบรรจุภายใน

การกำจัดไขมัน

ทำได้โดยการใช้วิธีดังต่อไปนี้

- กำจัดโดยไอระเหยไตรคลอโรเอทิลีน (Vapour Degreasing) โดยนำชิ้นงานจุ่มในถังบรรจุไตรคลอโรเอทิลีน มีการให้ความร้อนจนถึง 86 องศา จะกลายเป็นไอน้ำกระทบกับท่อขดทำความเย็นบริเวณปากขอบถัง และชิ้นงาน ไอจะกลั่นตัวบนผิวงาน และทำการชำระล้างไขมัน หรือน้ำมันลงสู่ถัง
- กำจัดโดยใช้ค้างร้อน (Soak Clean) แช่ชิ้นงานในถังเหล็ก หรือสแตนเลสที่บรรจุด้วยค้าง และมีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่

การทำความสะอาดด้วยกรดหรือจุ่มเงา (Pickling and Dipping)

เป็นการกัดสนิมเหล็ก เหล็กกล้า ออกไซด์ของทองแดง นิกเกิล และทองแดงผสมอื่น โดยใช้ความเข้มข้นของกรดกำมะถันประมาณ 5-10% หรืออาจใช้กรดเกลือ ในอัตราส่วน 1:5 โดยปริมาตร (กรด 1 ส่วนต่อน้ำ 5 ส่วน) ในขั้นตอนนี้จะต้องระวังไอกรดระเหย โดยต้องมีการดูดไอพิษไปกำจัด [26]

การชุบทองแดงในอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ [5]

การชุบทองแดงมีประโยชน์ในการชุบเคลือบผิวชิ้นแรกของโลหะเดิม ก่อนที่จะนำไปชุบด้วยโลหะชนิดอื่นเช่น ใช้ชุบบนงานที่มีรอยบัดกรี และชุบบนสังกะสีผสม ก่อนที่จะนำไปชุบนิกเกิล เพราะถ้าหากนำชิ้นงานที่มีรอยบัดกรี หรืองานที่มีสังกะสีผสมอยู่ สังกะสีจะละลายในน้ำยานิกเกิลทันที แต่ถ้าหากนำชิ้นงานไปชุบทองแดงแบบค้างก่อน แล้วไปชุบด้วยทองแดงแบบกรด และชุบด้วยนิกเกิลตามลำดับ ก็จะทำให้ชิ้นงานนั้นดูสวยงามและทนทาน สามารถนำไปชุบในขั้นต่อไปได้ นอกจากนี้หากต้องการให้ชิ้นงานมีความสามารถในการนำไฟฟ้า ก็สามารถนำมาชุบทองแดง เนื่องจากโลหะทองแดงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง (60 m/ohm.mm^2)

การชุบทองแดงแบ่งเป็น 2 ประเภท

1. การชุบทองแดงแบบต่าง

การชุบทองแดงแบบต่างจะมีกำลังการเคลือบผิวดีมากและการเกาะจับผิวแน่น เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ไม่สามารถนำไปชุบในน้ำยาที่มีสภาพเป็นกรดได้ในทันที ต้องชุบทองแดงแบบต่าง รองพื้นชั้นแรกก่อน แล้วจึงนำไปชุบในทองแดงแบบกรดหรือโลหะอื่นๆ ต่อไป ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่ทำด้วยสังกะสีหล่อ (Zinc Diecasting) เป็นต้น

การชุบทองแดงแบบต่างแบ่งออกเป็น 4 ประเภท

1.1 แบบสไตรค์ (Strike Bath)

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

1.1.1 คอปเปอร์ไซยาไนด์	30 กรัม/ลิตร
1.1.2 โซเดียมไซยาไนด์	48 กรัม/ลิตร
1.1.3 โซเดียมคาร์บอเนต	15 กรัม/ลิตร
1.1.4 อุณหภูมิ	40-60 องศาเซลเซียส
1.1.5 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	10-30 แอมแปร์/ตารางฟุต
1.1.6 อัตราส่วนของขั้วบวกต่อขั้วลบ	3 : 1
1.1.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้า	6 โวลต์

1.2 แบบร็อคเชล (Rochelle Bath)

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

1.2.1 คอปเปอร์ไซยาไนด์	25 กรัม/ลิตร
1.2.2 โซเดียมไซยาไนด์	35 กรัม/ลิตร
1.2.3 ร็อคเชลซ็อล	45 กรัม/ลิตร
1.2.4 โซเดียมคาร์บอเนต	30 กรัม/ลิตร
1.2.5 ค่า pH	12.5
1.2.6 อุณหภูมิ	50-60 องศาเซลเซียส
1.2.7 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	2-5 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้นับด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

1.3 แบบมีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Bath)

ประกอบด้วยสภาวะการชুবดังนี้

1.3.1 คอปเปอร์ไซยาไนด์	75 กรัม/ลิตร
1.3.2 โซเดียมไซยาไนด์	93 กรัม/ลิตร
1.3.3 หรือ โปแตสเซียมไซยาไนด์	115 กรัม/ลิตร
1.3.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์	30 กรัม/ลิตร
1.3.5 อุณหภูมิ	60 องศาเซลเซียส
1.3.6 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	10-60 แอมแปร์/ตารางฟุต
1.3.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้า	0.75-4 โวลต์

1.4 แบบไพโรฟอสเฟต (Pyrophosphate)

ประกอบด้วยสภาวะการชুবดังนี้

1.4.1 คอปเปอร์ไพโรฟอสเฟต	80-105 กรัม/ลิตร
1.4.2 โปแตสเซียมไพโรฟอสเฟต	290-370 กรัม/ลิตร
1.4.3 แอมโมเนีย	2-4 มิลลิลิตร/ลิตร
1.4.4 น้ำยา SP 66	2-3 มิลลิลิตร/ลิตร
1.4.5 น้ำยา SP 67	0.2-0.3 มิลลิลิตร/ลิตร
1.4.6 อุณหภูมิ	50-60 องศาเซลเซียส
1.4.7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	2-6 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร
1.4.8 ค่า pH	8.6-9.0

ตัวอย่างการผสมน้ำยาชুবทองแดงแบบต่าง

1. ใส่ไน้ในถังประมาณครึ่งถัง แล้วให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส
2. ใส่โปแตสเซียมไพโรฟอสเฟต และกวนน้ำยาให้ละลายจนหมด
3. ใส่คอปเปอร์ไพโรฟอสเฟต กวนให้ละลายจนหมด
4. กรองน้ำยาให้สะอาด
5. ใส่แอมโมเนีย
6. ใส่น้ำยา SP 66
7. เติมน้ำให้ครบตามปริมาตรที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การชุบทองแดงแบบกรด (ทองแดงเงา)

การชุบรองพื้นด้วยทองแดงแบบกรด จะได้ผิวทองแดงที่เคลือบเรียบและเป็นเงางาม และชุบให้หนาได้ตามต้องการ มีกำลังการเคลือบดี ผิวชุบที่ได้จะเป็นทองแดงบริสุทธิ์ และมีความเหนียว โดยเฉพาะใช้ชุบบน Zinc Die Casting ที่ผ่านการชุบทองแดงแบบค่างมาแล้ว และต้องการความคงทนมากๆ การควบคุมน้ำยาก็ง่าย ด้วยเหตุนี้ทำให้การชุบทองแดงแบบกรดใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ชุบรองพื้นก่อนชุบนิเกิล และ โครเมียมบนชิ้นงานเหล็ก บนชิ้นงานสังกะสีหล่อ และชุบบนพลาสติก จะใช้สารละลายที่ประกอบด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต กรดกำมะถัน และน้ำยาเงา (Brightener) ในการชุบใช้ตัวล่อ (Anode) ที่เป็นฟอสฟอไรซ์คอปเปอร์ (Phosphorized Copper Anode) ที่มีส่วนผสมของฟอสฟอรัสอยู่ในเนื้อทองแดง ทำให้ผิวที่ชุบทองแดงเรียบและเป็นเงางาม ตัวล่อชนิดนี้ไม่ละลายลงในน้ำยาชุบ ที่เป็นเหตุให้อัตราส่วนเปลี่ยนแปลงไป และไม่เกิดตะกอนของทองแดงในถังของน้ำยา

ผลดีของการชุบทองแดงแบบกรด

1. เมื่อชุบทองแดงแบบกรดแล้ว ไม่ต้องนำไปขัด เพราะในน้ำยาชุบมีน้ำยาเงาทำให้ชิ้นงานเงาเอง
2. ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดไซยาไนด์ในการชุบทองแดงแบบค่าง
3. สามารถชุบให้เงาได้ไม่ว่าจะใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงหรือต่ำ
4. ได้ความหนาที่เร็วกว่าการชุบทองแดงแบบค่าง และได้ผิวที่เรียบเป็นเงา
5. เหมาะสำหรับชุบแผ่นปรินต์ ชนิดเจาะรู โดยชุบผ่านรูที่เจาะ
6. การบำรุงรักษาง่าย และเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการบำรุงรักษาน้ำยาทองแดงแบบค่าง

การชุบทองแดงแบบกรดแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามส่วนผสมของน้ำยาเงา

1. สูตรของ Levco EX

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

- | | |
|--|---------------------------|
| 1.1 คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) | 200-250 กรัม/ลิตร |
| 1.2 กรดกำมะถัน (H_2SO_4) | 45-75 กรัม/ลิตร |
| 1.3 คลอไรด์ไอออน (Cl^-) | 15-80 มิลลิกรัม/ลิตร |
| 1.4 น้ำยาเงา Levco EX | 1-4 มิลลิกรัม/ลิตร |
| 1.5 ตัวล่อฟอสฟอไรซ์คอปเปอร์ | |
| 1.6 อุณหภูมิ | 20-32 องศาเซลเซียส |
| 1.7 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า | 2-6 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ นำไป 1-4 มิลลิกรัม/ลิตร การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 กวนน้ำยาด้วยลมขณะทำการชุป

2. สูตรของ UBAC

2.1 คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	180-240 กรัม/ลิตร
2.2 กรดกำมะถัน (H_2SO_4)	24-33 มิลลิลิตร/ลิตร
2.3 น้ำยาเงา UBAC # 1A	1.5-2.5 มิลลิลิตร/ลิตร
2.4 คลอไรด์ไอออน (Cl^-)	20-80 มิลลิลิตร/ลิตร
2.5 กรดเกลือ (HCl) เข้มข้น	0.05-0.20 มิลลิลิตร/ลิตร
2.6 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	3-6 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร
2.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้า	3-8 โวลต์
2.8 อุณหภูมิ	24-40 องศาเซลเซียส
2.9 ตัวล่อฟอสฟอไรซ์คอปเปอร์	
2.10 ถุงใส่ตัวล่อใช้ผ้าทนกรด	
2.11 กวนน้ำยาด้วยลมขณะทำการชุป	

ตัวอย่างการผสมน้ำยาชุบทองแดงแบบกรด

1. ใส่น้ำกลั่นหรือน้ำที่ผ่านการกรองประมาณ 2/3 ของความจุของถัง ให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส
2. ใส่คอปเปอร์ซัลเฟตทีละน้อย กวนน้ำยาตลอดเวลาเพื่อให้คอปเปอร์ซัลเฟตละลายจนหมด
3. ใส่ผงถ่าน (Activated Carbon) 2 กรัมต่อน้ำยา 1 ลิตร กวนน้ำยาตลอดเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
4. กรองน้ำยาให้สะอาด
5. ใส่กรดกำมะถันอย่างช้าๆ และกวนน้ำยาตลอดเวลาเพื่อให้กรดกำมะถันผสมเข้ากับน้ำยา
6. เติมน้ำยาเงา Levco EX 2.5 มิลลิลิตร/ลิตร
7. เติมน้ำให้เต็มตามปริมาตรที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

สาเหตุที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

สาเหตุที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี เกิดเนื่องจากปรากฏการณ์หนึ่งหรือมากกว่าของสามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์

1. ศักย์โอห์ม (Ohm Potential, IR drop)
2. ปรากฏการณ์การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization)
3. ปรากฏการณ์การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overvoltage or Kinetic Polarization)

Polarization)

1. ศักย์โอห์ม (Ohmic Potential, IR drop)

ผลคูณของความต้านทาน (R) ของเซลล์ในหน่วยโอห์ม (Ω) และกระแส (I) ในหน่วยแอมแปร์ (A) เรียกว่า ศักย์โอห์ม (Ohmic Potential) หรือ IR drop ของเซลล์ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านเซลล์ซึ่งมีความต้านทาน (R) จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงเท่ากับ $-IR$ โวลต์ ในการเกิดกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ในเซลล์อิเล็กโทรไลติกซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้า R โอห์ม เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี เท่ากับ $-IR$ โวลต์ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีต้องปรับปรุงโดยการเพิ่มค่า $-IR$ ในสมการดังต่อไปนี้

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - IR$$

2. ปรากฏการณ์การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization)

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ไฟฟ้า แล้วมีผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เปลี่ยนไป มีค่าไม่เท่ากับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี เรียกว่า โพลาริเซชัน ในช่วงที่กระแสภายในเซลล์ยังมีค่าน้อยๆ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้ายังคงเป็นเส้นตรง แต่เมื่อกระแสมีค่ามากขึ้น จะมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ของโพลาริเซชันขึ้น ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไม่สัมพันธ์กับกระแสแบบเป็นเส้นตรง ในเซลล์อิเล็กโทรไลติก ที่มีการเกิดโพลาริเซชัน ส่วนบนของเคอร์พจะเบี่ยงเบนออกจากแกนของกระแส ด้วยเหตุนี้จึงต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ โพลาริเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ถ้าการเกิดโพลาริเซชันมีค่ามากจน

ทำให้กระแสไม่มีความสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าเลย เรียกสภาวะเช่นนี้ว่า การเกิดโพลาริเซชัน

อย่างสมบูรณ์ แฟลคเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดโพลาริเซชันคือ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบของขั้ว ส่วนประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิ อัตราเร็วของการคนสารละลาย ขนาดของ กระแส และ สถานะทางกายภาพของสปีชีส์ต่างๆ ในสารละลาย

สำหรับปรากฏการณ์การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization) อธิบายได้ดังนี้ เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วอย่างรวดเร็วและผันกลับได้ ความเข้มข้นของสปีชีส์ที่เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าตามสมการของเนิร์นสต์ (Nernst Equation) เช่น มีขั้วแคดเมียมจุ่มอยู่ในสารละลายของ Cd^{2+}

$$E = E^{\circ}Cd - \frac{0.059}{2} \log \frac{1}{[Cd^{2+}]}$$

ค่าศักย์ไฟฟ้า (E) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Cd^{2+} ในสารละลาย ถ้าศักย์ไฟฟ้าของขั้ว ทำให้แคดเมียมไอออนเกิดปฏิกิริยารีดักชัน แคดเมียมไอออนจะเปลี่ยนรูปเป็นโลหะแคดเมียมเข้า เกาะที่ขั้ว ถ้าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วมีค่าเท่ากับอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของ ไอออนเข้าหาขั้ว ก็จะไม่เกิดความแตกต่างระหว่างระหว่างความเข้มข้น นั่นคือไม่เกิดปรากฏการณ์ ที่เรียกว่า โพลาริเซชัน แต่ในความเป็นจริงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วจะเกิดขึ้นรวดเร็วมก เร็วกว่าการ เคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้ว จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของ Cd^{2+} ที่ผิวของขั้ว และในสารละลาย ไอออนในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะเคลื่อนที่สู่ผิวของขั้วซึ่งมีความ เข้มข้นต่ำกว่า แต่อัตราการเคลื่อนที่ช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้ว จึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วเกิดการ เปลี่ยนแปลงจากค่าทางทฤษฎี ถ้าเป็นอิเล็กโทรไลต์ชนิดกึ่งเฉลล์จะต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าที่ คำนวณได้ตามทฤษฎี (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นสามารถทำ ให้ลดลงได้ โดยทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเข้าสู่ผิวของขั้วเพิ่มขึ้นหรือลด ความแตกต่างของความเข้มข้นที่ผิวของขั้วและในสารละลาย ซึ่งทำได้โดยการคนสารละลายหรือ ทำให้มีการเคลื่อนที่ของสารละลาย จากการทดลองพบว่าโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นจะ เกิดได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

2.1 ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์

ถ้าความเข้มข้นของไอออนที่สนใจมีค่าน้อย จะทำให้ผลที่เกิดจากโพลาริเซชันเนื่องจาก ความเข้มข้นมีค่าน้อยด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมดในสารละลาย

ถ้ามีสารละลายอิเล็กโทรไลต์จำนวนมากในสารละลาย จะช่วยป้องกันการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น เพราะสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะช่วยทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วเนื่องจากแรงดึงดูดของประจุ

2.3 การคนสารละลาย

จะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้ เพราะทำให้ไอออนที่ผิวของขั้วและในสารละลายไม่แตกต่างกัน

2.4 ขนาดของขั้ว

ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว ถ้าขั้วมีพื้นที่ผิวมากการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วมีค่ามาก ทำให้ลดการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้

3. ปรากฏการณ์การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overvoltage or Kinetic Polarization)

ในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างค่าที่ได้ตามทฤษฎีและค่าที่ได้ตามความเป็นจริงเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว เกิดขึ้นจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วทั้งสองของเซลล์เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์มากกว่าปกติ เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จึงถูกควบคุมด้วยขบวนการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วซึ่งแตกต่างจากการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น ที่ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้ว ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ไฟฟ้าจะมีค่าน้อยขึ้นอยู่กับสมบัติของเซลล์ และสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้คือ

3.1 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ความหนาแน่นของกระแสคือ กระแสต่อพื้นที่ผิวของขั้วมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

3.2 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

3.3 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะแปรผันตามส่วนประกอบทางเคมีของขั้ว

3.4 การเกิดศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะมีผลทำให้เกิดแก๊สที่ขั้วเสมอเช่น เกิดแก๊สไฮโดรเจนที่

ขั้วแคโทด และเกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด

3.5 ขนาดของศักย์ไฟฟ้าเกินตัวขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้หลายชนิด

จึงไม่สามารถบ่งขนาดของศักย์ไฟฟ้าเกินตัวได้แน่นอน ทราบได้แต่เพียงค่าประมาณจากข้อมูลที่ได้มีการทดลองตามเอกสารอ้างอิงต่างๆ

ในการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเกิดขึ้น ต้องนำค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวนี้ไปลบออกจากค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ตามทฤษฎีด้วย นั่นคือ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - IR - E_{\text{overvoltage}} \quad [15]$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

กระบวนการบำบัดโลหะหนักวิธีการอื่นๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ

1. กระบวนการบำบัดโลหะหนักในอุตสาหกรรมทั่วไป

1.1 การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) [26]

เป็นการเปลี่ยนรูปโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง (Solid) สามารถทำได้โดยการทำอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้

1.1.1 การเติมสารเคมีเพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักโดยตรง เกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น ในการบำบัดสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) ในน้ำเสีย โดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปทำปฏิกิริยากับสังกะสีไอออนเกิดเป็นสารประกอบซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งมีการละลายน้ำต่ำ



1.1.2 การเปลี่ยนสมมูลของปฏิกิริยาเคมี (Solubility Equilibrium) โดยการเติมสารเคมีพวกคาร์บอเนตหรือไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ให้สูงขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอเนตหรือไฮดรอกไซด์ ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง เปลี่ยนมาอยู่ในรูปของตะกอนที่สามารถจับตัวได้ดี เช่น ในการบำบัดสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) ในน้ำเสียสามารถทำให้ตกตะกอนได้ในรูปไฮดรอกไซด์ดังสมการ



ที่สภาวะสมมูลค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบ $Zn(OH)_2(s)$ หาได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} K_{sp} &= [Zn^{2+}][OH^{-}]^2 \\ &= 4.5 \times 10^{-17} \end{aligned}$$

จะเห็นว่า ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์จะมีผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีไอออนโดยตรง คือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ (โดยการเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง, พีเอช) จะทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลงเพื่อรักษาสมมูล

1.1.3 การเปลี่ยนอุณหภูมิ เป็นการปรับเพื่อให้สารประกอบของโลหะหนักนั้นมีค่าความสามารถในการละลาย (K_{sp}) ใต้น้อยลง

โลหะหนักที่พบในน้ำเสียมักอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้ด้วยวิธีการตกตะกอนตามธรรมชาติหรือการกรองเพียงลำพัง การกำจัดโลหะหนักจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งเสียก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็ง (มักอยู่ในรูปของคอลลอยด์) รวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก (Floc) เพื่อให้สามารถกำจัดออกจากน้ำได้โดยวิธีการตกตะกอนตามธรรมชาติ และวิธีการกรอง โดยมีสารเคมีทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวประสานให้อนุภาคมารวมกันเป็นฟล็อก ซึ่งกระบวนการประสานคอลลอยด์นี้ เรียกว่าโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การกำจัดโลหะหนักต้องใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโคแอกกูเลชัน และ ตามด้วยวิธีการตกตะกอนตามธรรมชาติ และวิธีการกรอง [8]

1.2 กระบวนการประสานคอลลอยด์ (Coagulation)

เป็นกระบวนการที่อาศัยสารเคมีทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวประสาน ให้อนุภาคมารวมกันเป็นฟล็อก (Floc) จนมีน้ำหนักมาก และสามารถตกตะกอนได้รวดเร็ว

1.3 การตกตะกอนตามธรรมชาติ (Sedimentation)

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดของแข็งออกจากน้ำ โดยสารประกอบโลหะหนักมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำสามารถตกตะกอนได้เร็ว โดยกระบวนการนี้มักจะต่อจากกระบวนการประสานคอลลอยด์

1.4 การกรอง (Filtration)

เป็นกระบวนการกำจัดของแข็งออกจากน้ำ เนื่องจากตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็กและแขวนลอยได้ ไม่สามารถกำจัดได้โดยการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว

1.5 ออกซิเดชัน และรีดักชัน (Oxidation – Reduction)

เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีการเปลี่ยนค่าเลขประจุ เพื่อให้มีความเป็นพิษน้อยลงและสามารถกำจัดได้ง่ายขึ้นเช่น เหล็กประจุบวกสอง และ โครเมียมประจุบวกหก

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบการออกซิเดชัน การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ใช้สารคลอรีน (Cl_2) ในการกำจัด Fe^{2+} และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กระบวนการรีดักชัน

ใช้สาร Ferrous Sulfate (FeSO_4) ในการกำจัดสาร Cr^{+6}



1.6 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

เป็นกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่มีโลหะที่มีประจุบวกหรือสารประกอบที่มีประจุลบ เมื่อผ่านเรซินก็จะถูกจับไว้ในเรซิน ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดีแต่หลังจากใช้งานสักระยะ ประสิทธิภาพจะต่ำลง จะต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพ (Regeneration) ซึ่งทำให้ได้น้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหรือสารประกอบสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำไปกำจัดด้วยวิธีอื่น

1.7 รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

เป็นกระบวนการกำจัดน้ำออกจากน้ำเสีย โดยการใช้แรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อกรองแบบเยือกึ่งซึมผ่านได้ (Semipermeable Membrane) ซึ่งเยื่อนี้จะมีคุณสมบัติยอมให้น้ำ และสารบางตัวผ่านไปได้ ดังนั้นจะได้น้ำสะอาดส่วนหนึ่งและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงอีกส่วนหนึ่ง กระบวนการนี้จะต้องใช้พลังงานมาก และต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียที่ปล่อยเข้ามาด้วย [8]

1.8 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำเสียจะทำให้มลสารต่างๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุนต่างๆ ทำให้น้ำทิ้งสะอาด แต่ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว ไม่ควรกำจัดโดยการเผาเช่น เขม่าถ่านหินเป็นสารที่มีความสามารถดูดซับไอออนปรอท [27]

2. กระบวนการบำบัดโลหะหนักในอุตสาหกรรมหุบลือผิวโลหะ

2.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

เป็นกระบวนการที่ให้น้ำทิ้งไหลผ่านชั้นของเรซินสังเคราะห์ (Synthetic Resin) ซึ่งเป็นชนิดที่จับอนุพลบวก (Cation Exchange Resin) โดยเรซินจะจับอนุพลของโลหะหนักเอาไว้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ได้ผลดี ไม่เปลืองเนื้อที่ แต่ราคาแพงค่าใช้จ่ายสูง ข้อเสียของวิธีนี้คือ เมื่อเรซินจับเอาอนุพลของโลหะหนักไว้จนอิ่มตัวจะไม่สามารถจับได้อีก จึงต้องการการฟื้นฟูประสิทธิภาพ (Regeneration) ซึ่งก็จะได้โลหะหนักกลับมาอีก จำเป็นต้องใช้กรรมวิธีทางเคมีขจัดให้ความเป็นพิษไม่ให้หมดไป ซึ่งเท่ากับต้องคิดคั้งทั้ง 2 ระบบ ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

2.2 Chemical Reduction and Precipitation

วิธีนี้เป็นวิธีการทางเคมี โดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเพื่อให้เกิดเป็นตะกอน กลายเป็นสารที่ไม่มีพิษ สารเคมีที่ใช้เป็นสารที่ทำให้ตกตะกอน (Precipitant) ทำหน้าที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ให้สูงขึ้น (ค่าความเป็นด่างมากขึ้น) เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ ทำให้การละลายของโลหะในสารละลายต่ำลง เกิดเป็นตะกอนของโลหะขึ้น สารเคมีเหล่านี้ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ปูนขาว (CaO) และโซดาไฟหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มักจะเรียกรวมวิธีการนี้ว่า Neutralization ตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีดังนี้ [28]



ปูนขาว (CaO) เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนั้นยังทำให้เกิดการตกผลึกในรูปหินปูนซึ่งทำให้เกิดตะกอนสูง [26]

โซดาไฟหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารเคมีที่มีราคาแพงกว่าปูนขาวทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าปูนขาว [29] แต่เกิดอันตรายได้ง่ายกว่าการใช้ปูนขาว การใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าปูนขาว และเกิดตะกอนน้อยกว่า [26]

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Hydrate Lime, Ca(OH)_2) หรือปูนขาวผลึกน้ำ เป็นสารเคมีที่มีราคาถูกกว่าโซดาไฟ ละลายน้ำได้น้อยทำให้เกิดตะกอนในรูปหินปูน [29] เกิดตะกอนจำนวนมาก ทำให้ลำบากในการกำจัด [30]

ภาคผนวก จ.

การเกิดขึ้นได้เองของปฏิกิริยา

G (พลังงานอิสระของยิบส์), Gibbs' Free Energy เป็นพลังงานสูงสุดที่ให้โดยระบบที่สามารถนำไปเปลี่ยนเป็นงานที่มีประโยชน์ (W)

$$\text{นิยาม } G = H - TS$$

เมื่อ H คือ เอนทาลปี

T คือ อุณหภูมิ

S คือ เอนโทรปี

การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ (t) และความดัน (p) คงที่ (ΔG)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \text{สมการของยิบส์ของระบบ}$$

เมื่อ ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี

ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี

$$\text{จาก } -T\Delta S_{\text{total}} = \Delta H_{\text{system}} - T\Delta S_{\text{system}}$$

$$\Delta G_{\text{system}} = -T\Delta S_{\text{total}}$$

ถ้าเกิดขึ้นได้เอง ΔS_{total} ต้องมีเครื่องหมาย “+” นั่นคือ $\Delta G_{\text{system}} < 0$

นั่นคือ ที่อุณหภูมิ และความดันคงที่ ระบบใดก็ตามจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยตนเอง พลังงานอิสระต้องลดลง (เครื่องหมาย “-”) ถ้า ΔG เป็นบวก จะเกิดขึ้นเองไม่ได้หรือจะเกิดในทิศทางตรงกันข้าม, $\Delta G = 0$ ระบบอยู่ในสมดุล

จากนิยาม ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔG และ ปริมาณงานสูงสุด (W_{max}) ของระบบใดๆ

$$\Delta G = -W_{\text{max}}$$

งานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้าขึ้นกับปัจจัย 2 อย่าง คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอนที่ไหลผ่านวงจร และพลังงานที่มีอยู่ต่อคู่อิเล็กตรอน

$$\text{งาน} = \frac{(\text{จำนวนคู่อิเล็กตรอน}) \times \text{พลังงานที่มีอยู่}}{\text{คู่อิเล็กตรอน}}$$

จำนวนคู่อิเล็กตรอนที่ไหลผ่านคือ จำนวน โมลของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยารีดอกซ์ คูณด้วย F (จำนวนคู่อิเล็กตรอนต่อ โมลของอิเล็กตรอน)

เอกสารนี้เป็นจำนวนคู่อิเล็กตรอน $= nF$ รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่า n หาจากคู่อิเล็กตรอนของปฏิกิริยารีดอกซ์ เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่มีต่อลูกอมปี่ก็คือ emf (มีหน่วยเป็น โวลต์) ของเซลล์นั่นเอง เพราะ โวลต์ก็คือ พลังงานต่อลูกอมปี่

$$\text{พลังงานที่มีอยู่} / \text{ลูกอมปี่} = \text{emf}$$

เมื่อ emf มีค่าสูงสุด งานที่ได้ของเซลล์มีค่าสูงสุดด้วย ดังนั้นงานสูงสุดของเซลล์คือ

$$W_{\max} = n \times F \times E$$

เมื่อ W_{\max} = งานสูงสุดสำหรับเซลล์ไฟฟ้า
ดังนั้น

$$\Delta G = -nFE_{\text{cell}}$$

ตัวอย่างเช่น การทำอิเล็กโทรไลซิสของไอออนของทองแดง

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาของเซลล์



ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

$$\begin{aligned} E^{\circ}_{\text{cell}} &= E^{\circ}_{\text{cathode}} - E^{\circ}_{\text{anode}} \\ &= +0.34 - 1.23 \\ &= -0.89 \text{ V} \end{aligned}$$

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เท่ากับ -0.89 V

ตามสมการของเนินสท์

$$E_{\text{cell}} = E^{\circ}_{\text{cell}} - \frac{0.059}{n} \log \frac{[\text{P}_{\text{O}_2}]^{\frac{1}{2}} [\text{H}^{+}]^2}{[\text{Cu}^{2+}]}$$

เมื่อ P_{O_2} คือ ความดันของแก๊สออกซิเจน

$$[\text{Cu}^{2+}] = 0.1 \text{ M}$$

$$[\text{H}^{+}] = 1 \text{ M}$$

$$[\text{P}_{\text{O}_2}] = 1 \text{ atm}$$

n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเท่ากับ 2

$$\begin{aligned} E_{\text{cell}} &= -0.89 - \frac{0.059}{2} \log \frac{1}{0.1} \\ &= -0.89 - 0.03 \\ &= -0.92 \text{ V} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเซลล์อยู่ในสภาวะมาตรฐาน $E_{\text{cell}} = E^{\circ}_{\text{cell}}$

$$\text{และ } \Delta G = \Delta G^{\circ} = -nFE_{\text{cell}}$$

$$= -(4 \text{ โมล } e^{-}) (96500 \text{ จูลต่อมปีต่อ โมล } e^{-}) (-0.92 \text{ จูลต่อจูลต่อมปี})$$

$$= 355120 \text{ จูล}$$

ΔG° มีค่าเป็นบวก แสดงว่าการทำอิเล็กโทรไลซิสของไอออนของทองแดงเกิดขึ้นเองไม่ได้

สรุปได้ว่า ในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิต่ำและความดันหนึ่งๆ ΔG จะมีเครื่องหมายเป็นลบ

แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองไม่ได้ ΔG จะมีเครื่องหมายเป็นบวก และถ้าปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุล

ΔG จะเท่ากับ 0 ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E) มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นเมื่อ ΔG มีเครื่องหมาย

เป็นลบ E จะมีเครื่องหมายเป็นบวก และ ถ้า ΔG มีเครื่องหมายเป็นบวก E จะมีเครื่องหมายเป็นลบ

[31]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพผนวก ฉ.

การส่งผ่านมวล (Mass Transport)

การส่งผ่านมวลหรือการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วอิเล็กโทรด ในระบบทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical System) สามารถเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ

1. การแพร่ (Diffusion)

การแพร่ เกิดเมื่อมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนบริเวณผิวของขั้วอิเล็กโทรดกับในสารละลาย จะเกิดการแพร่ของไอออนจากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ อัตราเร็วของการแพร่ขึ้นกับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นทั้งสองแห่งเช่น ในการทำอิเล็กโทรไลซิสของไอออนที่มีประจุบวก พวกไอออนของโลหะหนัก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่บริเวณผิวของขั้วแคโทด ไอออนที่มีประจุบวกจะเปลี่ยนรูปเป็นโลหะเกาะที่ขั้วแคโทด ทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่มีประจุบวกที่บริเวณผิวขั้วแคโทดน้อยกว่าในสารละลาย ทำให้เกิดการแพร่ของไอออนที่มีประจุบวกจากในสารละลายไปยังผิวหน้าของขั้วแคโทด ยังมีความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนที่มีประจุบวกในสารละลายกับบริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมากเท่าใดก็จะยังมีการแพร่ได้รวดเร็ว การแพร่ทำให้เกิดกระแสขึ้นเรียกว่า กระแสจากการแพร่ (Diffusion Current) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออน อัตราเร็วของการแพร่ยิ่งมาก กระแสจากการแพร่ก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น

2. การไมเกรท (Migration)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออน ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้น เมื่อไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด และไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด ความเร็วของการเคลื่อนที่เข้าหาหรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าอาจเพิ่มขึ้น หรือลดลงแล้วแต่ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งทำให้การไหลของกระแสในวงจรเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วย และการที่มีไอออนหลายๆ ชนิดจำนวนมากในสารละลาย ทำให้อัตราส่วนของไอออนที่สนใจต่อประจุทั้งหมดจะลดลง และเมื่อใดที่อัตราส่วนของกระแสที่เกิดจากไอออนที่สนใจต่อประจุทั้งหมดลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ การไมเกรทชันของไอออนที่สนใจไปยังขั้วแคโทดจะไม่ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การพา (Convection)

การพา เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเนื่องจาก ความแตกต่างของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของสารละลาย และ แรงทางกลศาสตร์เช่น การใช้แท่งแม่เหล็กกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การคนสารละลาย การเขย่าสารละลาย หรือการทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีการเคลื่อนที่ หรือให้มีการเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ หรือให้มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด ทั้งหมดนี้ทำให้ไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วอิเล็กโทรดได้เร็วขึ้น

สิ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วทั้ง 3 แบบคือ อุณหภูมิ ความหนาแน่นของสารละลาย และความแรงของไอออน (Ionic Strength) [15]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรไลซิส

ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ค้นพบความสัมพันธ์แบบปริมาณวิเคราะห์ระหว่างปริมาณไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด และระยะเวลาที่ให้กระแสไหลผ่าน

ความมากน้อยของการเปลี่ยนแปลงทางเคมี มีความสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนที่มีการถ่ายเทในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ตัวอย่างเช่น การรีดิวซ์ไอออนของทองแดงให้เป็นโลหะทองแดง



หนึ่งโมลของไอออนของทองแดงทำปฏิกิริยากับสองโมลของอิเล็กตรอน เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไฟฟ้า เพราะฉะนั้นการรีดิวซ์ไอออนของทองแดงเพื่อให้ได้โลหะหนึ่งโมลจะต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าสองเท่า

ปริมาณไฟฟ้าที่จะต้องผ่านเข้าไปในเซลล์ เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน เรียกว่าหนึ่งฟาราเดย์ ดังนั้นจากสมการจะต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าสองฟาราเดย์ เพื่อให้ไอออนของทองแดงเกิดเป็นโลหะทองแดงหนัก 63.54 กรัม

ปริมาณไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb)

$$Q = It$$

Q เป็นปริมาณไฟฟ้าหน่วย คูลอมป์ (C)

I เป็นกระแสไฟฟ้าหน่วย แอมแปร์ (A)

t เป็นเวลาในหน่วย วินาที (s)

ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์ (F) เป็นผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งโมล เมื่อประจุของอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.6210×10^{-19} N_A คือ เลขอาโวกาโดร (Avogadro Number)

$$F = eN_A = (1.6210 \times 10^{-19})(6.02252 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 96,487 \text{ Cmol}^{-1}$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ = 96,487 C

น้ำหนักของสารที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด โดยการผ่านปริมาณไฟฟ้า 96,487 C เข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรไลติกเป็นน้ำหนักสมมูลของสารนั้น ซึ่งเป็นน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากไอออนของโลหะรับอิเล็กตรอนหนึ่งโมล

สรุปได้ว่า ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์จะทำให้ผลิตภัณฑ์ได้จากออกซิเดชันหรือรีดักชัน

ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสหนักเท่ากับหนึ่งกรัมสมมูลเสมอ

ดังนั้นกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสไอออนของทองแดง ถ้าผ่านปริมาณไฟฟ้าเข้าไปหนึ่งฟาราเดย์ โลหะทองแดงที่ได้จากรีดอกซ์ที่แคโทดจะมีน้ำหนัก $63.54/2 = 31.77$ กรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักกรัมสมมูลของทองแดง

ดังนั้นฟาราเดย์จึงตั้งกฎขึ้นเรียกว่า กฎอิเล็กโทรไลซิสของฟาราเดย์ (Faraday's Laws of Electrolysis) ดังนี้

1. มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แอโนดหรือแคโทด ในขณะที่เกิดอิเล็กโทรไลซิสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์

2. มวลของสารต่างๆ กัน ที่เกิดขึ้นในระหว่างการอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ [12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ.

หน้าที่ของกรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

การกำจัดไอออนของทองแดง ออกจากสารละลายจะเกิดได้ดีเมื่อสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด [14] กรดซัลฟูริกนอกจากเป็นตัวให้ความนำไฟฟ้าหรือตัวอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แล้ว ยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สารละลายมีลักษณะเป็นเบส เพราะถ้าหากเป็นเบสโมเลกุลของน้ำอาจรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดปฏิกิริยาดังนี้



ซึ่งอาจทำให้ผิวของทองแดงที่เคลือบเกิดเป็น CuO หรือตะกอนของ Cu(OH)₂ ได้ [12] ในอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ ถ้าใส่กรดซัลฟูริกน้อยเกินไปจะทำให้โลหะไปเกาะชั้นงานได้ไม่ดี ผิวชุบจะหยาบ ลดกำลังการเคลือบ แต่จะไม่ใส่กรดซัลฟูริกมากเกินไปที่กำหนดไว้เพราะจะทำให้การใช้กระแสไฟฟ้าต้องลดลง และลดกำลังการเคลือบหรือความสม่ำเสมอของผิวที่เคลือบโลหะที่เกาะที่ชิ้นงานไม่แน่นเพราะเกิดแก๊สไฮโดรเจน ผิวชุบจะหยาบ เกิดการไหม้บริเวณที่ได้รับกระแสไฟฟ้าสูงๆ [5], [10]

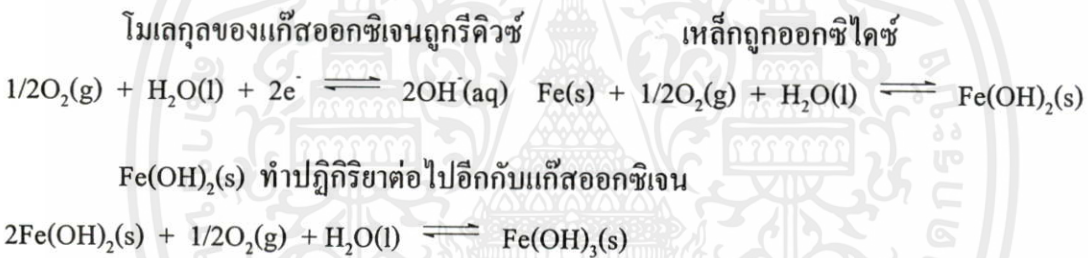
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

การชุบเคลือบผิวด้วยโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิม และการสีกร่อน

เหล็กเกิดการสีกร่อนหรือเป็นสนิม (สนิมเป็นผลของการสีกร่อน) ได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าอากาศชื้น หรือในบริเวณใกล้ทะเล หรือในย่านอุตสาหกรรมที่มีแก๊สต่างๆเช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เมื่อแก๊สเหล่านี้ละลายน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นกรด สารละลายที่เป็นกรดหรือเกลือจะไปเร่งอัตราการสีกร่อนของโลหะให้เร็วยิ่งขึ้น

น้ำบนเหล็กบริเวณรอบๆ หยกน้ำจะมีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนมาก ส่วนตรงกลางของหยกน้ำแทบไม่มีแก๊สออกซิเจนเลย เพราะฉะนั้นบริเวณรอบๆ หยกน้ำจึงเป็นพื้นที่แคโทด และแก๊สออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ที่บริเวณนี้ ส่วนตรงใจกลางของหยกน้ำจะเป็นพื้นที่แอโนด เหล็กจะถูกออกซิไดซ์ สนิมจะเกิดขึ้นรอบๆ หยกน้ำ ส่วนเหล็กตรงใจกลางของหยกน้ำจะกร่อนไป ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดังนี้



ผลผลิตสุดท้ายมีลักษณะขรุขระ และมีรูพรุนทั่วไป เรียกว่าสนิม ที่มีสีน้ำตาลแดงของ Fe(OH)₃ สนิมจึงเป็นผลผลิตสุดท้ายที่เกิดจากการสีกร่อน

จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะเห็นได้ว่า พื้นที่แอโนดเหล็กจะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe²⁺ ไอออน ส่วนพื้นที่แคโทด โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ให้เป็น OH⁻ ไอออน การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจะผ่านเหล็กที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และครบวงจร เมื่อไอออนที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีน้ำอยู่ แม้จะเป็นเพียงชั้นบางๆ ที่คลุมพื้นผิวของเหล็กอยู่ก็ตาม Fe²⁺ ไอออน เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจากแอโนดไปยังแคโทดและเกิดเป็น Fe(OH)₂ และในที่สุดก็จะเป็น Fe(OH)₃ ซึ่งเป็นที่แคโทด นอกจากนี้ถ้าสิ่งที่มีสัมผัสกับเหล็กนั้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ก็จะทำให้อัตราการสีกร่อนของโลหะเป็นไปอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น เพราะสารละลายดังกล่าวเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี

ดังนั้นการเคลือบโดยการชุบโลหะด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า จะทำให้ผิวของโลหะไม่สัมผัสกับความชื้นหรือแก๊สออกซิเจนเช่น เคลือบด้วยนิกเกิล ทองแดง เงิน ดีบุก วิธีเคลือบเช่นนี้เรียกว่ากัลวานไนซิง (Galvanizing) หรือชุบด้วยสังกะสี หรือแมกนีเซียมซึ่งเป็นโลหะที่ว่องไวกว่าเหล็ก (E^o มีค่าเป็นบวกน้อยกว่าของเหล็ก) โลหะที่ใช้เคลือบมีแนวโน้มในการให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่า

จึงบังคับให้เหล็กมีลักษณะเป็นแคโทด (ในการสีกกร่อนเหล็กเป็นแอโนด) เพราะฉะนั้นจึงป้องกันการสึกกร่อนได้ วิธีการป้องกันนี้ เรียกว่าการป้องกันแบบแคโทด (Cathodic Protection) [12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ญ.

โลหะหนักทองแดง (Copper)

ประวัติความเป็นมา

ทองแดงเป็นหนึ่งในโลหะที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์รู้จัก และอาจเป็นโลหะชนิดแรกที่มีมนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ สันนิษฐานกันว่าคืบกำเนิดของทองแดงอยู่ในบริเวณหุบเขาของแม่น้ำ Tigris และ Eufrates ได้มีการพบทองแดงในดินแดน Mesopotamia และอียิปต์ เมื่อ 4000 ปีก่อนคริสตกาล ก่อนการเกิดของราชวงศ์อียิปต์ที่อยู่ในช่วง 3200 ปีก่อนคริสตกาล โดยมีการนำ Copper Carbonate มาใช้เป็นจุลสี (Pigment) อาวุธเช่น ขวาน รวมทั้งเครื่องมือหุงต้ม คำว่า Copper มาจากภาษาละตินว่า Cuprum

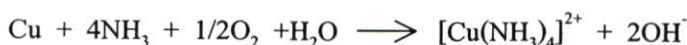
ทองแดงถูกพบทั้งในรูปอิสระ และในรูปสารประกอบของ ซัลไฟด์ (Sulfide) ออกไซด์ (Oxide) และคาร์บอเนต (Carbonate) สินแร่พื้นฐานของทองแดงคือ ชาโคไพไรต์ (Chalcopyrite), CuFeS_2 ชาโคไซต์ (Chalcocite), Cu_2S และบอร์ไนต์ (Bornite), Cu_5FeS_4 [32]

คุณสมบัติทางเคมี

ทองแดงเป็นธาตุทางเคมี มีสัญลักษณ์ Cu มีเลขอะตอม 29 มีน้ำหนักอะตอม 63.546 ในตารางธาตุทองแดงจะอยู่ระหว่างธาตุนิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) อยู่ในกลุ่มธาตุทรานซิชันแถวที่หนึ่ง และมีธาตุอยู่ในกลุ่มเดียวกัน เรียกว่ากลุ่มโลหะ Coinage คือธาตุเงิน และ ทองคำ Electronic Configuration ของทองแดงคือ $[1s^2 2s^2 2p^6 3s^2] 3d^{10} 4s^1$ หรือ $[\text{Argon}] 3d^{10} 4s^1$ อิเล็กตรอนใน 4s ทำให้ทองแดงมีสมบัติทางเคมีเหมือนธาตุโพแตสเซียม (P) ที่มี Electronic Configuration เป็น $[\text{Argon}] 4s^1$ อย่างไรก็ตามทองแดงมีรูปทรงที่ต่างกับโพแตสเซียม ทองแดงมีค่า Ionization Potential ลำดับที่หนึ่งสูงกว่าโพแตสเซียมแต่มีค่า Ionization Potential ลำดับที่สองและสามต่ำกว่าโพแตสเซียม

ตามปกติทองแดงจะไม่ทำปฏิกิริยา ไม่ละลายใน Nonoxidizing Acid เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ค่า Oxidation Potential ของปฏิกิริยาคือ -0.34 V ที่ 25 องศาเซลเซียส ทองแดงละลายใน Oxidizing Acid เช่น กรดไนตริก (HNO_3) หรือในตัวทำละลายเช่น ไทโอยูเรีย (Thiourea), $=\text{C}(\text{NH}_2)_2$ ได้สารละลายที่เสถียรคือ Cu^+ ไอออน ดังสมการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนั้น อธิบายถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ Cu^{2+} จะเกิดขึ้นเมื่อมีแก๊สออกซิเจน (O_2) และตัวทำละลายเช่น แอมโมเนีย (NH_3) ดังสมการ



ไอออนของทองแดงที่พบบ่อยๆ มี 2 รูปคือ Cu^{1+} และ Cu^{2+}

Cu^{1+} ไอออน มี Electronic Configuration เป็น $[\text{Argon}]3d^{10}$ ปกติแล้วจะไม่มีสีเพราะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มใน d-shell การที่มีสีปรากฏในสารประกอบของ Cu^{1+} เนื่องจากแสงวิสิเบิลทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจาก Cu^{1+} d Orbital ไปสู่ Orbital ที่ว่างของลิแกนด์หรือเกิดจากสีในตัวของลิแกนด์เอง สารประกอบของ Cu^{1+} ประกอบไปด้วยโมเลกุลหรือไอออน 2 หรือมากกว่า 2 จำนวนของลิแกนด์ (Coordination Number) ส่วนมากจะเท่ากับ 4 Coordination Number 2 และ 3 พบน้อย ขณะที่ Coordination Number 5 พบบ่อยมาก และ Coordination Number 6 ไม่เคยพบเลย

Cu^{2+} ไอออนมีอิเล็กตรอนใน d-shell ไม่เต็ม ทำให้สารเชิงซ้อนของ Cu^{2+} มีสี และแสดงสมบัติแม่เหล็กเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ไม่เข้าคู่ สมบัติแม่เหล็กนี้ทำให้โครงสร้างของสารเชิงซ้อนของ Cu^{2+} บิดเบี้ยวอย่างชัดเจน เกลือของ Cu^{2+} ละลายได้ดีในน้ำ และในตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เช่น เมทานอล (Methanol) และ อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

โลหะทองแดงมีสีแดงหรือชมพูแดง มีค่าความต้านทานไฟฟ้า 0.15328 โอห์มต่อเมตร-กรัม ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความนำไฟฟ้า (Specific Electrical Conductivity) 60.0 เมตรต่อโอห์ม-ตารางมิลลิเมตร มีค่าความแข็ง (Brinell Hardness, H_p) 35×10^3 นิวตันต่อตารางเมตร มีจุดหลอมเหลว (Melting Point) 1083 องศาเซลเซียส มีจุดเดือด (Boiling Point) 2595 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของโลหะทองแดงบริสุทธิ์ 8.9592 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Linear Expansion) 1.65×10^{-5} ต่อองศาเซลเซียส ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนจำเพาะของของแข็ง (Specific Heat of the Solid) 0.092 แคลอรีต่อกรัม ที่ 20 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจำเพาะของของเหลว (Specific Heat of the Liquid) 0.112 แคลอรีต่อกรัม ที่ 20 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจำเพาะในสถานะไอ (Specific Heat of the Vapor State) 0.08 แคลอรีต่อกรัม ที่ 20 องศาเซลเซียส [33]

ทองแดงในธรรมชาติมีไอโซโทป (Isotope) 2 ชนิดผสมกันคือ ^{63}Cu และ ^{65}Cu ไอโซโทปอื่นที่รู้จักกันคือ ไอโซโทปที่มีเลขมวล 60, 61, 62, 64, 66 และ 67 ไอโซโทป ^{64}Cu เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิต 12.8 ชั่วโมง [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน (Standard Electrode Potentials) ของการวิเคราะห์ที่น่าสนใจแสดงในตารางที่ ๑.1 [32]

ตารางที่ ๑.1 แสดงข้อมูลศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน (Standard Electrode Potentials) ของทองแดง

Reaction	E° , v.
$\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{+2} + 2e = \text{Cu} + 4\text{NH}_3$	-0.05
$\text{Cu}^{+2} + e = \text{Cu}^+$	0.167
$\text{CuCl}_2^- + e = \text{Cu} + 2\text{Cl}^-$	0.19
$\text{Cu}^{+2} + 2e = \text{Cu}$	0.34-18
$\text{Cu}^+ + e = \text{Cu}$	0.522
$\text{Cu}^{+2} + 2\text{I}^- + e = \text{CuI}_2^-$	0.690
$\text{Cu}^{+2} + \text{I}^- + e = \text{CuI}$	0.877

การนำทองแดงมาใช้ประโยชน์

ปัจจุบันได้มีการนำโลหะทองแดงมาเป็นส่วนผสมของสิ่งต่างๆ มากมายดังนี้

1. สิ่งก่อสร้าง (Architecture)

ท่อระบายน้ำ (Gutter) มุงหลังคา (Roofing) มุ้งลวด (Screening) ตะแกรง (Grillwork) ผ้าม่าน (Screen Cloth) เหรียญตรา (Medallion)

2. ตัวขับเคลื่อน (Automotive)

หม้อน้ำรถยนต์ (Radiator) ฝาสูบเครื่องจักร (Gasket) เครื่องสะท้อนเสียง (Reflector) แกนของเครื่องฉายรังสี (Radiator Core)

3. อุปกรณ์ทางไฟฟ้า (Electrical)

ลวดนำไฟฟ้า (Conductive-Wire Contact) มอเตอร์ (Motor) เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductor) หลอดอิเล็กตรอน (Electron Tube) ฝากรอบแบตเตอรี่ (Battery Cap) ปลอกแสงสัญญาณ (Flashlight Shell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Hardware

บัดกรีทองแดง (Soldering Copper) ลูกลอย (Ball Floate) หมุดโลหะสำหรับตอกยึด (Rivet) หน้าปัดนาฬิกา (Clock Dial) สายปั๊ม (Pump Line) โซ่ (Chain) เครื่องมือดับเพลิง (Fire Extinguishers) สกรู (Screw) อุปกรณ์ทางทะเล (Marine Hardware) สายเหล็กบีบยึด (Line Clamp) กุญแจ (Lock) บานพับ (Hinge) อุปกรณ์ที่ใช้ซ่อมท่อต่างๆ (Plumbing Accessory) ลิ้นบังคับการไหลของของเหลวหรือแก๊ส (Valve Stem)

5. อุตสาหกรรม (Industrial)

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เครื่องระเหย (Evaporator) เยื่อกระดาษ (Pulp and Paper Piping) แทงค์ (Tank) ท่อน้ำและท่อไอน้ำ (Steam and Water Piping) ตัวให้ความร้อน (Heater) เครื่องวัดรังสี (Radiator) หลอดคอนเดนเซอร์ (Condenser Tube)

6. การขนส่ง (Transportation)

ถังหล่อเย็นน้ำมัน (Oil Cooler)

7. อุปกรณ์ที่ใช้ในการรบ (Mnuitions)

หมุดติดลูกกระสุน (Firing-Pin Support Shell) ที่หุ้มลูกกระสุน (Bullet Jacket)
ปลอกสายชนวน (Fuse Cap) สายจุดระเบิดให้เกิดประกายไฟ (Primer)

8. เครื่องสำอาง (Cosmetice)

กล่องใส่ลิปสติก (Lipstick Case) ดับแป้ง (Compact)

9. อื่นๆ (Other)

ใช้เป็นขั้วแอโนด (Anode) อุปกรณ์ของขบวนการทางเคมี (Chemical Process Equipment) ที่หมุนเครื่องพิมพ์ (Printing Roll) สายเครื่องวัด (Gauge Line) รองพื้นสำหรับชุบทอง (Base for Gold Plate) เครื่องประดับตกแต่ง (Ornamesstal Trim) เครื่องประดับ (Costume Jewelry) แผงหน้าปัดวิทยุหรือโทรศัพท์ (dial)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดงกับสิ่งมีชีวิต

บทบาทของทองแดงในสิ่งมีชีวิต

1. มีบทบาทในขบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ของพืช
2. เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันในพืช
3. ใช้ในการเจริญเติบโต และขยายพันธุ์ของพืชชั้นต่ำเช่น สาหร่าย และ ฟังไกา
4. การขาดทองแดงในพืช ทำให้พืชตาย ไม่สามารถผลิตเมล็ด ลดปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง
5. ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อรา
6. ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นในขบวนการเมตาบอริซึมในสัตว์ มนุษย์ผู้ใหญ่ต้องการ 2 มิลลิกรัมต่อวัน และในร่างกายนจะมีทองแดง 100-150 มิลลิกรัม
7. ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ฮีโมโกลบินในสัตว์
8. ทำให้เกิดโรค Anemia ในสัตว์เนื่องจากมีธาตุทองแดงต่ำในอาหารสัตว์ ในสัตว์จำพวก วัว ควาย และแกะ การขาดธาตุทองแดงทำให้เกิดโรค Diarrhea Anemia
9. เกิดโรคประสาท Nervous Disorder เนื่องจากมีธาตุโมลิบดีนัมมากเกินไป ซึ่งไปยับยั้งการสะสมของทองแดงในตับ มักเกิดกับสัตว์จำพวก วัว ควาย และ แกะ
10. เกิดโรค Reclamation ในพืชเนื่องจากการขาดทองแดงอย่างรุนแรง
11. อาการการขาดธาตุทองแดงในสัตว์ จะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิด และอายุ แต่ที่ปรากฏอยู่เสมอคือ ขนของสัตว์จะซีดลง
12. ใช้เป็นอาหารเสริมให้กับสัตว์ กรณีที่สัตว์ขาดธาตุทองแดงหรือเพื่อควบคุมผลผลิตภายใน

โทษของทองแดงในสิ่งมีชีวิต

1. ดินที่มีทองแดงมากเกินไปจะเป็นพิษต่อพืช และสัตว์ตามห่วงโซ่อาหาร
2. การสะสมตัวของทองแดงในมนุษย์ทำให้เกิดอาการ อาเจียน ตะคริว และเกิดอาการชัก ถ้ามีปริมาณเท่ากับ 27 กรัม อาจทำให้เสียชีวิตได้ เรียกว่าโรค Wilson's
3. ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เนื่องจากทองแดงรวมตัวกับ Thiol ของเอนไซม์
4. การสะสมของทองแดงในสัตว์เป็นเวลานานๆ ทำให้เกิดโรคไตวาย และ โรคตีชาน [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
ค่าใช้จ่ายในงานวิทยานิพนธ์

ตารางที่ ก.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่มีทองแดงระหว่างวิธีทางเคมีไฟฟ้ากับวิธีทางเคมี

วิธีทางเคมีไฟฟ้า		วิธีทางเคมี	
รายการ	ราคา (บาท)	รายการ	ราคา (บาท)
1. เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ หมุน		1. ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่มี โลหะหนักทุกชนิด (คิดจากน้ำหนักของน้ำเสียบวก กับภาชนะที่บรรจุ (ถังบรรจุ 200 ลิตร)	4,500.- / 1 คัน.
1.1 ตัวเซลล์ไฟฟ้า	6,100.-		
1.2 ตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า	1,358.-		
1.3 ค่าจ้างแรงงาน	4,820.-		
รวมราคาค่าใช้จ่ายทั้งหมด	12,278.		
2. พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด น้ำเสียต่อการบำบัด 1 ครั้ง (ประสิทธิภาพสูงสุด) (25 โวลต์, 19 แอมแปร์, 0.475 กิโลวัตต์. ชั่วโมง)	1.425	2. ค่าขนส่ง (ค่ายานพาหนะที่บรรจุทุกภาชนะ บรรจุ 40 ถังต่อ 1 เที่ยว(ไป-กลับ))	31.75 /1 ก.ม.
* ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 3 บาทต่อ 1 หน่วย		รวมราคาค่าใช้จ่ายทั้งหมด	4531.75

หมายเหตุ ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการบำบัดไอออนของทองแดงในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี ได้จากบริษัท
บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน), GENCO [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลโรงงาน

ข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ ประเภทโรงงานหลัก 10005 ผลการสืบค้น พบจำนวนโรงงานทั้งสิ้น 112 โรงงาน

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลประเภทโรงงานอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ

ลำดับ	ชื่อโรงงาน	สถานที่ตั้ง (จังหวัด)	ประกอบกิจการ	เครื่องจักร (HP)
1	กิตติกิจ โครเมียม	ลำปาง	ชุบโลหะ	12.60
2	ง่วนเฮงการช่าง	สุโขทัย	ชุบโลหะ	48.12
3	ง่วนเฮงการช่าง	ราชบุรี (ต.บ้านโป่ง)	ชุบโลหะ	56.50
4	ง่วนเฮงการช่าง	ราชบุรี (ต.หนองอ้อ)	ชุบโลหะ	98.83
5	เจรฎาโครเมียม	นครศรีธรรมราช	ชุบโครเมียม	58.75
6	เจริญติการชุบ	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ เช่น บานพับ ประตู-หน้าต่าง ข้อต่อ ข้องอ	57.90
7	เฉลิมพรการชุบ	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	18.72
8	ช.ไทยรุ่งเรืองการช่าง	สมุทรสาคร	ชุบสังกะสี เช่น เหล็กค้ำ ยันเสาไฟฟ้า น็อต ก๊อก และประตุน้ำ	52.75
9	ชัยเจริญ	กรุงเทพฯ	ชุบโลหะ	25.73
10	ชัยโลหะการ	สมุทรปราการ	ชุบเคลือบโลหะด้วย สังกะสี	44.63
11	เชิดเกียรติ	นครสวรรค์	ชุบโลหะ	32.50
12	แชมป์โครเมียม	นครศรีธรรมราช	ชุบโครเมียม	59.75
13	ค. บุญนาค	นนทบุรี	ชุบโลหะ	172.90
14	ทัศนชัยการชุบ	สมุทรปราการ	ชุบโลหะด้วยสังกะสี	101.20

ตารางที่ ฎ.1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อโรงงาน	สถานที่ตั้ง (จังหวัด)	ประกอบกิจการ	เครื่องจักร (HP)
15	เทพกลการ โครเมี่ยม	สุราษฎร์ธานี	ชุบโลหะ	16.31
16	นางจุรี ปิยะวิชานนท์	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	70.50
17	นางสาวจารุพร จิรภัทรมงคล	สมุทรปราการ	ชุบเคลือบโลหะ	142.00
18	นางสาวทองสุข สมสะอาด	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ(Anodizing)	18.09
19	นายจำลอง นิธิรักษา	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	96.42
20	นายนิมิต สรรสุข	ลพบุรี	ชุบโครเมี่ยมชิ้นส่วน อุปกรณ์	13.10
21	นายอานนท์ พิริยะทูล เสถียร	ชลบุรี	ขัดโลหะ และชุบโครเมี่ยม	26.63
22	นายอุทัย ตันนวิจิตร	เชียงใหม่	ชุบโลหะ	29.26
23	บริษัท กวางไทย อินเตอร์เนชั่นแนล 1991 จำกัด	สมุทรปราการ	รับจ้างเคลือบผิว ผลิตภัณฑ์ทุกชนิด	176.52
24	บริษัท ที เค สยาม เพลาตติ้ง จำกัด	ชลบุรี	ชุบเคลือบผิวโลหะ และ พลาสติก	-
25	บริษัท โครมีเทค อุตสาหกรรม จำกัด	พระนครศรีอยุธยา	ชุบโครเมี่ยมบน ผลิตภัณฑ์พลาสติก	122.72
26	บริษัท จงเลิศล้ำ จำกัด	สมุทรปราการ	ชุบตัวเรือนเครื่อง ประดับต่าง ๆ	51.14
27	บริษัท แจ็คสัน พรีเมียม เมทอล เพลาตติ้ง แฟคตอรี จำกัด	นครปฐม	ชุบโลหะ	30.78
28	บริษัท ช.นวมเทิล จำกัด	สมุทรสาคร	ชุบโลหะ	157.98
29	บริษัท ชันไทย อิมเป็็กซ์ จำกัด	กรุงเทพฯ	เคลือบผิวโลหะด้วย ไคเดเนี่ยม และชุบทอง	236.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น" หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 02-254-4000

ตารางที่ ฎ.1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อโรงงาน	สถานที่ตั้ง (จังหวัด)	ประกอบกิจการ	เครื่องจักร (HP)
30	บริษัท ซิมเมอร์ เมทัล สแตนคาร์ด จำกัด	พระนครศรีอยุธยา	ชุบอลูมิเนียมเส้น ได้เดือนละ 240 ตัน	3,831.30
31	บริษัท ซุปเปอร์ไลท์ เมทเทิล ไลซ์ซิ่ง ไทย จำกัด	ปทุมธานี	เคลือบผิวเครื่องใช้ และ เครื่องเล่นจากพลาสติก ด้วยอลูมิเนียม	93.33
32	บริษัท ดี.เอ็ม.ชัยพงษ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด	สุพรรณบุรี	ชุบโลหะ	36.60
33	บริษัท ที แอนด์ ที แพคคอรี่ จำกัด	นครปฐม	ทำเครื่องเงิน ชุบเครื่อง เงิน เครื่องประดับ	154.54
34	บริษัท ทีพีดับบลิว ไค-คาสติงก์ อินคัสตรีส์ จำกัด	ปทุมธานี	เคลือบผิวอุปกรณ์ คอมพิวเตอร์ด้วยไฟฟ้า ได้ปีละ 2,400 ตาราง เมตร	1,194.99
35	บริษัท เทคโนโลยีโครม จำกัด	สมุทรสาคร	ชุบโลหะและทำ อุปกรณ์ชิ้นส่วน เครื่องจักรทุกชนิด เพื่อประกอบจำหน่าย และรับจ้างกำลังการผลิต อุปกรณ์	495.35
36	บริษัท ไทยสตีล กัลวาไนซ์ จำกัด	ฉะเชิงเทรา	ผลิตเหล็ก ชุบเหล็ก , สังกะสี	-
37	บริษัท บางปูชุบเคลือบ ผิว จำกัด	สมุทรปราการ	ชุบอลูมิเนียม	717.62
38	บริษัท บิวตี้ ออฟเวอร์ รูบี้ จำกัด	นครปฐม	ทำเครื่องประดับกาย	84.51
39	บริษัท แปซิฟิกไฟท์ จำกัด	สมุทรสาคร	เคลือบชุบเหล็กด้วย สังกะสี	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางออกจะถือว่าผิดกฎหมายและต้องดำเนินการทางกฎหมายทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฎ.1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อโรงงาน	สถานที่ตั้ง (จังหวัด)	ประกอบกิจการ	เครื่องจักร (HP)
40	บริษัท พีแอนด์พี แมนูแฟคเจอร์ จำกัด	ชลบุรี	ชุบเคลือบผิวโลหะ	109.82
41	บริษัท เพ็ญเส็ง อุตสาหกรรม จำกัด	นครปฐม	ชุบโลหะ	345.84
42	บริษัท รัตนพลโลหะ จำกัด	สมุทรสาคร	ชุบโลหะ	140.99
43	บริษัท ทีเคอร์ ออโต้ พาร์ทส์ จำกัด	พระนครศรีอยุธยา	ชุบเคลือบผิวพลาสติก	755.05
44	บริษัท สเปเชียลโกลด์ จำกัด	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	116.22
45	บริษัท สยามเทคโน อุตสาหกรรม จำกัด	ปทุมธานี	ผลิตส่วนประกอบของ อาคารจากสังกะสีและ อลูมิเนียม เช่น บานพับ มือจับ เป็นต้น และ ชุบโลหะ ได้ปีละ -	368.00
46	บริษัท สยามรอยัล ออคิด จำกัด	เชียงใหม่	คอกกล้วยไม้ชุบทอง 150,000 ชิ้น/ปี คอกกล้วยไม้ชุบ ทองแดง	51.54
47	บริษัท สันติพร กรุป จำกัด	นนทบุรี	ชุบเส้นลวด	96.00
48	บริษัท อินเตอร์เนชั่น แนล วิสิเคิลส์ จำกัด	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	1,624.26
49	บริษัท อุมวัลย์ ยูนิคอร์ป จำกัด	นครปฐม	ชุบโลหะ เช่น เครื่อง ประดับต่าง ๆ	22.57
50	บริษัท เอสซีเวอร์ด จำกัด	นครปฐม	ซ่อมผิวโลหะโดยวิธี เคลือบ และเคลือบ กระฉก	35.25

ตารางที่ ฎ.1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อโรงงาน	สถานที่ตั้ง (จังหวัด)	ประกอบกิจการ	เครื่องจักร (HP)
51	บริษัท แอปเปิ้ล เทคโนโลยี จำกัด	ชลบุรี	ชุบโลหะ	120.48
52	บริษัท 3 เอสเพลท จำกัด	นนทบุรี	ชุบโลหะ	149.17
53	บริษัท โกลเด้น มาสเตอร์ อินดัสตรีล จำกัด	นครปฐม	ชุบโลหะ	23.79
54	บริษัท โครโนส อินดัสทรี(1997) จำกัด	นครปฐม	ชุบและเคลือบผิวโลหะ	96.52
55	บริษัท ซี.เอส.พี.ฮาร์ด โครเมียม จำกัด	ชลบุรี	ชุบแข็งโลหะ	119.44
56	บริษัท ค.บุญนาค ชูบโครเมียม จำกัด	กรุงเทพฯ	ชุบโลหะ	683.44
57	บริษัท ทองพัฒนา โรงชุบ จำกัด	กรุงเทพฯ	รับจ้างชุบโลหะ	90.05
58	บริษัท ทีเคที โฮกาวา จำกัด	ชลบุรี	ชุบโลหะเคลือบผิว พลาสติก ผลิตภัณฑ์เครื่องซักผ้า และภาชนะทำจากพลาสติก	-
59	บริษัท ทีดีเค (ประเทศไทย) จำกัด	พระนครศรีอยุธยา	ผลิตชิ้นส่วนแม่เหล็กชนิดเคลือบผิว	388.48
60	บริษัท ไทยกัลวาไนซ์ สตีล จำกัด	สมุทรสาคร	ชุบเคลือบท่อเหล็กด้วยสังกะสี	-
61	บริษัท ไทยซิลิ่งบอร์ด จำกัด	สมุทรปราการ	ชุบเคลือบสีผิวอลูมิเนียม	359.55
62	บริษัท ไทยวาคัม เพลาทด์พรีนติ้ง จำกัด	กรุงเทพฯ	เคลือบผิวพลาสติกและเรซินด้วยระบบสูญญากาศ	78.30

ตารางที่ ฎ.1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อโรงงาน	สถานที่ตั้ง (จังหวัด)	ประกอบกิจการ	เครื่องจักร (HP)
63	บริษัท บางกอก สตีล โด้ตติ้ง จำกัด	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ(กัลวาไนซ์)	127.90
64	บริษัท บี วี เค แพลตติ้ง จำกัด	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	655.55
65	บริษัท เมเทค คิทามูระ (ประเทศไทย) จำกัด	พระนครศรีอยุธยา	ชุบเคลือบผิวโลหะ	-
66	บริษัท เอฟ ที เอส โปรดักส์ จำกัด	สมุทรสาคร	ชุบท่อโลหะเคลือบด้วย สังกะสี	730.00
67	บริษัท ฮาลีนา อินดัสตรีส์ (ประเทศ ไทย) จำกัด	สมุทรสาคร	ชุบเคลือบผิวโลหะและ พลาสติก	-
68	บางกอกการชุบ	สมุทรสาคร	ชุบโลหะ	122.25
69	บำรุงชุบโครเมียม	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	180.00
70	เบสท์โครเมียม	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	127.04
71	มงคลฮาร์ดโครม	ชลบุรี	ชุบแข็งโลหะ	317.60
72	ยีนกวาง	สมุทรปราการ	ชุบโลหะด้วยนิกเกิลและ โครเมียม	99.52
73	ราชบุรีโครเมียม	ราชบุรี (ต.หน้าเมือง)	ชุบโลหะ เช่น อุปกรณ์ รถยนต์	56.95
74	รุ่งเรืองการช่าง	นครปฐม	ชุบโลหะ	29.49
75	เรณูการช่าง	สระบุรี	ชุบโลหะ	5.39
76	โรงงานก้องกิจ	กรุงเทพฯ	ชุบโลหะ โครเมียม นิกเกิล	42.50
77	โรงงานสยามการช่าง	ราชบุรี	ชุบโลหะ	90.00
78	โรงงานแสงเจริญ	กรุงเทพฯ	ชุบโลหะต่าง ๆ	192.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฎ.1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อโรงงาน	สถานที่ตั้ง (จังหวัด)	ประกอบกิจการ	เครื่องจักร (HP)
79	โรงชุบ ชิป โลหะกิจ	กรุงเทพฯ	ชุบ โลหะ และ ทำผลิตภัณฑ์โลหะ เช่น ไฟแชค ห่วง กุญแจ ขอบกล่อง	416.70
80	โรงชุบ เอ.พี.เค.	สุพรรณบุรี	ชุบ โลหะ	44.15
81	โรงชุบไทยนครกู่จิก	นครราชสีมา	ชุบ โครเมียมได้เดือนละ 100 ชิ้น และชุบซิงค์ได้ เดือนละ 100 ชิ้น	120.63
82	โรงชุบไทยปิยะ	สมุทรสาคร	เคลือบโลหะ	139.17
83	โรงชุบย่งชิน	สมุทรสาคร	ชุบ โลหะ	287.07
84	ล.สยามโครเมียม	กรุงเทพฯ	ชุบ โลหะทั่วไป	49.17
85	ล.สยามโครเมียม	ชลบุรี	ชุบ โลหะ	76.00
86	วิวัฒนกิจการชุบ	นครปฐม	ชุบ โลหะ	81.80
87	วีระการช่าง	พระนครศรีอยุธยา	ชุบ โลหะ	39.88
88	ศรีเจริญการชุบ	สมุทรสาคร	ชุบ โลหะทุกชนิด	197.32
89	สายศิลป์	ลพบุรี	ชุบ โลหะ	31.65
90	สายศิลป์ชุบ โครเมียม	สระบุรี	ชุบเคลือบผิวโลหะ	12.50
91	สหกิจดีเซล	อุบลราชธานี	ชุบ โลหะ และอัด ผ้าเบรครถยนต์	29.19
92	สองพี่น้องโครเมียม	สมุทรปราการ	ชุบ โลหะ	116.00
93	สิทธิโชค	สมุทรปราการ	ชุบ โลหะด้วยสังกะสี	86.00
94	สุขสำราญชุบ โครเมียม	นนทบุรี	ชุบ โลหะ	81.29
95	สุนทรโครเมียม	กรุงเทพฯ	ชุบ โลหะ ได้ปีละ 2,400 กิโลกรัม	28.29
96	แสงอรุณการโครเมียม	อุครธานี (ต.หมากแข้ง)	ชุบ โครเมียม	18.45
97	แสงอรุณการโครเมียม	อุครธานี (ต.กุดสระ)	ชุบ โลหะ	115.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนหมายไว้ก่อน

ตารางที่ ฎ.1 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อโรงงาน	สถานที่ตั้ง (จังหวัด)	ประกอบกิจการ	เครื่องจักร (HP)
98	ห้างหุ้นส่วนจำกัด ไทยอิลีคโตร-เพลตติ้ง	สมุทรปราการ	เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะ (ชุบโลหะ)	179.18
99	ห้างหุ้นส่วนจำกัด ฟาร์อีสต์ แวกคิวอัม โคทติ้ง	นครปฐม	ชุบกาหัลยเงิน ชุบของ เด็กเล่นด้วยเครื่องชุบ สูญญากาศ	58.33
100	ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงงานจักรวาล	นครปฐม	ชุบโลหะ	23.80
101	ห้างหุ้นส่วนจำกัด ศรีทองอิลีคโตรเคมีเคิล	สมุทรปราการ	ชุบอะลูมิเนียม โครเมียมและทำเครื่อง ใช้พลาสติกต่าง ๆ	2,536.18
102	ห้างหุ้นส่วนจำกัด อนันต์โครเมียม	กรุงเทพฯ	ชุบโลหะ เช่น อุปกรณ์ รถยนต์ ได้ประมาณปี ละ 3,900 ชิ้น	21.48
103	ห้างหุ้นส่วนจำกัด ทองทวีเพลตติ้ง	สมุทรสาคร	ชุบโลหะต่าง ๆ	97.20
104	ห้างหุ้นส่วนจำกัด ไทยเมก	กรุงเทพฯ	ชุบโลหะ	1,474.41
105	ห้างหุ้นส่วนจำกัด แม่แรม ออร์คิด	เชียงใหม่	ชุบดอกกล้วยไม้ ทำเครื่องประดับ	14.17
106	ห้างหุ้นส่วนจำกัด อี.แซด.พี.	สมุทรปราการ	ชุบสังกะสี	1,141.05
107	อี.แซด.พี.	สมุทรปราการ	ชุบโลหะ	50.85
108	อุดมศิลป์การโครเมียม	อุดรธานี	ชุบโครเมียม	57.91
109	อู่ทองโครเมียม	สุพรรณบุรี	ชุบโลหะ	138.85
110	เอส.เอส. โลหะกิจ	กรุงเทพฯ	ชุบโลหะ	134.53
111	เฮียนเซียงเฮง	สมุทรสาคร	ชุบโลหะ	-
112	ราชบุรีโครเมียม	ราชบุรี (ต.เจดีย์หัก)	ชุบโลหะ	287.40

หมายเหตุ ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2542
ไม่รวมถึง โรงงานเล็กประกอบกิจการ และ โรงงานจำพวกที่ 1 [2]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายชัชถุณณ์ รัชฎพิทยากุล เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2514 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีการศึกษา 2536 และในปี พ.ศ. 2538 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ประยุกต์ (เคมีสิ่งแวดล้อม) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้