



รายงานวิจัย

เรื่อง

การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการโดยใช้เคมีไฟฟ้า  
( removal of copper from laboratorial wastewater  
by electrochemistry )

นางสาว กนกพร สุพงษ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555  
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

TD

T 585

H 43

ก 1240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในห้องสมุดเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้  
เลขหมู่.....131067.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี...2.1.พ.ศ. 2557

12603181

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการโดยใช้เคมีไฟฟ้า (removal of copper from laboratorial wastewater by electrochemistry) จัดทำขึ้นเพื่อเสนอเป็นแนวทางหนึ่งให้ผู้ปฏิบัติงาน และผู้เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการในการแก้ไขปัญหาของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ความรู้ทางเคมีพื้นฐานในเรื่องปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เพื่อแยกทองแดงออกจากน้ำเสีย ทำให้ลดปริมาณของเสียอันตราย ลดปัญหามลพิษและการปนเปื้อนของทองแดงจากห้องปฏิบัติการเคมีสู่สิ่งแวดล้อม

ทางผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อป้องกันแก้ไขปัญหามลพิษ เป็นการรักษาคุณภาพชีวิตในสถานที่ทำงานและชุมชนอย่างปลอดภัยและใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อม

รายงานการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยคำแนะนำเกี่ยวกับหลักการการเขียนรายงานการวิจัยและการใช้เครื่องมือวิเคราะห์จาก ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษณ์ นาย สุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และ นางสาว กัญญา มงคลโกชน์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานดังกล่าวที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอดโครงการวิจัยนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีของงานวิจัย ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านและบิดาผู้ล่วงลับ

กนกพร สุพงษ์

งานวิจัยเรื่อง	การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการโดยใช้เคมีไฟฟ้า
แหล่งเงิน	ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประเภทส่งเสริมนักวิจัย
ประจำปีงบประมาณ	พ.ศ. 2555 จำนวนเงิน 42,000 บาท (สี่หมื่นสองพันบาทถ้วน)
ระยะเวลาทำการวิจัย	1 ปี ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2554 - กันยายน 2555 ✓
คณะผู้วิจัย	นางสาว กนกพร สุพงษ์ สังกัดคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 02-329-8000-8099
ที่ปรึกษางานวิจัย	นาย สุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ ศึกษาวิธีการกำจัดไอออนของทองแดงจากน้ำเสียในห้องปฏิบัติการเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันร่วมกับเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยวิเคราะห์ปริมาณของไอออนทองแดงก่อนและ หลังการบำบัดด้วยเครื่องวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยความเข้มข้นของไอออนทองแดงในของเสียทางเคมีเริ่มต้น 4277 พีพีเอ็ม นำมากำจัดโดยการถูกรีดิวซ์ด้วยโลหะแมกนีเซียมหลังจากปรับสภาวะพีเอชกับ 2 ด้วยกรดซัลฟูริก (ไอออนทองแดงเป็นตัวรีดิวซ์ได้ดีกว่าไอออนแมกนีเซียม) เกิดเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงของโลหะทองแดง โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมของ Cu : Mg คือ 1 : 2 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 15 นาที โดยมีร้อยละประสิทธิภาพการกลับคืน และการกำจัดของไอออนทองแดง เท่ากับ 47.49 และ 68.79 ตามลำดับ หลังจากนั้นใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าโดยควบคุมแรงดันไฟฟ้ากำจัดไอออนทองแดงที่เหลือ ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคดังกล่าว คือ เวลาที่ใช้ 60 นาที , พีเอช 1 และค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ทำให้ความเข้มข้นของไอออนทองแดงเหลืออยู่โดยเฉลี่ยเท่ากับ 80.67 พีพีเอ็ม คิดเป็นร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด อัตราการลดลง และเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของไอออนทองแดง เท่ากับ 93.96, 1.26 กรัม/ชั่วโมง และ 90.97 ตามลำดับ

จากการใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ร่วมกับเทคนิคเคมีไฟฟ้า สามารถกำจัดไอออนของทองแดงจากน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ ร้อยละ 98.11 ซึ่งการบำบัดด้วยวิธีดังกล่าวพบว่า มีการใช้สารเคมีน้อย ค่าใช้จ่ายต่ำ และสามารถกู้คืนทองแดงจากน้ำเสีย

คำสำคัญ : การกำจัดทองแดง, เทคนิคเคมีไฟฟ้า, โลหะแมกนีเซียม, ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน

**Project Title** removal of copper from laboratorial waste by electrochemistry  
**Researcher** Miss Kanokporn supong  
**Faculty:** Science **Department:** Chemistry

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to study how the removal of copper ions from wastewater in chemistry laboratory by Oxidation-Reduction reactions and Electrochemical Techniques. The quantitative analysis of the copper before and after treatment using Atomic Absorption Spectrophotometer. In this experiment , having the initial copper ions concentration of 4277 ppm. Removal of copper, magnesium metal by reducing conditions by adjusting the pH with sulfuric acid (Copper ions as an electron acceptor than magnesium ions). A reddish-brown precipitate of copper. The results showed the suitable ratio of magnesium to the copper ions is 2 to 1. Effective removal and recovery of copper ions by Mg metal was 68.79 percent and 47.49 percent, respectively. Then get rid of the remaining copper ions with electrochemical techniques by controlling the voltage constant. The optimal conditions for the removal of copper ions from wastewater. The results showed the suitable time for removing copper ions to be 60 minutes , pH 1 and constant 3 Volt. After the treatment process, such that the copper ions remaining average 80.67 ppm. Effective removal of copper ions is 93.96 percent. Reduction of Copper ions is 1.26 grams per hour. Copper ions were recovered by sticking to the cathode, representing 90.97 percent.

Effective removal of copper ions by Oxidation-Reduction reactions and Electrochemical Techniques equal to 98.11 percent of the total copper ions in wastewater. The results showed that treatment with the above methods is using minor chemicals, low cost and recovered copper from wastewater.

**Keywords :** removal of copper, electrochemical techniques, magnesium metal, oxidation-reduction reactions.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ผลผลิตหรือการนำไปใช้ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากงานวิจัยนี้.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b> .....	<b>4</b>
2.1 แหล่งกำเนิดและชนิดของน้ำเสีย.....	4
2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	4
2.3 ทฤษฎีและหลักการกำจัดโลหะหนักด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย.....	7
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนัก.....	11
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b> .....	<b>14</b>
3.1 ลักษณะน้ำเสียที่ทำการศึกษา.....	14
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.4 วิธีทำการทดลอง.....	15
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล</b> .....	<b>19</b>
4.1 ศึกษาคุณภาพเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำเสีย.....	19
4.2 การทดสอบหาอัตราส่วนกับโลหะแมกนีเซียม.....	20
4.3 ศึกษาค่าความเป็นกรด ศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัด.....	22
ไอออนของทองแดง	
4.4 สถิติวิเคราะห์.....	30
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>32</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	32
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	33
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	35
ภาคผนวก ก.....	37
ภาคผนวก ข.....	41
ภาคผนวก ค.....	42
ภาคผนวก ง.....	46
ภาคผนวก จ.....	47
ภาคผนวก ฉ.....	48
ภาคผนวก ช.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1	19
ตารางที่ 4.2	20
ตารางที่ 4.3	22
ตารางที่ 4.4	23
ตารางที่ 4.5	24
ตารางที่ 4.6	25
ตารางที่ 4.7	27
ตารางที่ 4.8	27
ตารางที่ 4.9	28
ตารางที่ 4.10	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	10
ภาพที่ 3.1 เครื่องมือและการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมี	16
ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการกำจัดทองแดงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และเทคนิคเคมีไฟฟ้า	18
ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี อาคารพระเทพฯ	19
ภาพที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการได้ทองแดงจากการรีดิวซ์ด้วยMg	21
ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพและระยะเวลาในการกำจัดไอออนของทองแดงด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ pH =1	23
ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพและระยะเวลาในการกำจัดไอออนของทองแดงด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ pH =2	24
ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพและระยะเวลาในการกำจัดไอออนของทองแดงด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ pH =1	25
ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพและระยะเวลาในการกำจัดไอออนของทองแดงด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ pH =2	26
ภาพที่ 4.7 ค่าความปั่นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพกำจัดไอออนของทองแดง	27
ภาพที่ 4.8 ค่าความปั่นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการลดลงไอออนของทองแดง	28
ภาพที่ 4.9 ค่าความปั่นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การกลับคืนไอออนของทองแดง	29

## นิยามคำศัพท์

AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
aq.	aqueous
pH	Potential of Hydrogen ion
มก.	มิลลิกรัม
มล.	มิลลิลิตร
Kg.	กิโลกรัม
V.	voltage
A.	ampere
SD	Standard Deviation
% RSD	Relative Standard Deviation
g/mol	grams per mole
mol/L	mole / liter
ppm.	Part per million
กก.	กิโลกรัม
ชม.	ชั่วโมง
ตร.ชม.	ตารางเซนติเมตร
นน.	น้ำหนัก
มม.	มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ห้องปฏิบัติการเคมีเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่สำคัญ เพราะการเรียนการสอนปฏิบัติการย่อมมีการใช้สารเคมีในกระบวนการทดลองต่างๆ ในวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป เรื่อง ปฏิกิริยาเคมีและความสัมพันธ์ทางน้ำหนัก (Chemical Reaction and Mass Relationship) ซึ่งเป็นวิชาปฏิบัติการเคมีพื้นฐานสำหรับสอน นักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ของ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จำนวนนักศึกษาประมาณ 3,000 คน ทำให้ของเสียทางเคมี(waste) ที่เกิดจากการทดลองดังกล่าวมีปริมาณมาก ของเสียดังกล่าวมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่ประกอบไปด้วยสารประกอบของทองแดง จึงสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการเคมี

เนื่องจากทองแดง (Copper) เป็นโลหะที่มีความหนาแน่น จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง ทองแดงสามารถถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระหรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมาก จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นเหียนอาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้อง และกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กดรบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต [1]

ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการWilson' Diseases คือ ร่างกายสันเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก จึงอาจส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคม เมื่อมีผู้เจ็บป่วยไม่สามารถทำงานได้ เกิดภาวะความพิการและว่างงาน เนื่องด้วยทองแดงมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต [ภาคผนวก ก]

อันตรายที่เกิดขึ้นจากของเสียอันตรายขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติความเป็นพิษ โอกาสของการได้รับ ระยะเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นของการสัมผัส [2] ถ้าทิ้งลงอ่างน้ำในห้องปฏิบัติการอาจจะส่งผลกระทบต่อและก่อปัญหาพิษต่อแหล่งน้ำและผิวดิน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกลายเป็นปัญหาในระดับชาติต่อไป [ภาคผนวก ข] จึงทำให้ถูกกำหนดไว้ในค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง [ภาคผนวก ค]

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีโลหะหนักอยู่นั้นมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนผลึกทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การออกซิเดชันและรีดักชัน รีเวอร์สออสโมซิส การระเหย การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การแยก การเผา การปรับเสถียร/การทำแข็ง การใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้า

การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีการใดขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆดังนี้ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และ ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวในงานวิจัย จึงเสนอแนวทางบำบัดของเสียเคมีที่มีทองแดงปนเปื้อนจากการเรียนปฏิบัติการเคมีดังกล่าว โดยนำของเสียทางเคมีที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาปริมาณของทองแดงก่อนการบำบัด โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absorption Spectrophotometer) หลังจากนั้นนำของเสียทางเคมีดังกล่าวมารีดิฟซ์ด้วยโลหะแมกนีเซียมในสถานะเป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริก [3] เนื่องจาก  $\text{Cu}^{2+}$  รับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า  $\text{Mg}^{2+}$  เกิดเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงของโลหะทองแดง [4] แล้วบำบัดสารประกอบของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสโดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยศึกษาปัจจัยของตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง ได้แก่ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง ค่าความเป็นกรด และ ศักย์ไฟฟ้า แล้วมีการทดสอบหาปริมาณของทองแดงหลังการบำบัด โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์หอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีการใช้สารเคมีในขั้นตอนการบำบัดน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการการบำบัดค่อนข้างต่ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาแนวทางการบำบัดทองแดงในของเสียทางเคมีจากห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย ได้แก่ ระยะเวลา อิทธิพลของค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง

## 1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ทำการทดลองลดปริมาณของทองแดงในของเสียทางเคมีโดยการรีดิฟซ์ด้วยแมกนีเซียมในสถานะเป็นกรด
2. ทำการทดลองแยกทองแดงออกจากของเสียทางเคมีโดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า
3. ทำการทดลองศึกษา อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า อิทธิพลของค่าความเป็นกรด และ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง
4. ใช้เครื่องมือวิเคราะห์หอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในการหาปริมาณของทองแดงก่อนและหลังจากผ่านขบวนการบำบัดโดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า
5. ประมวลผลประสิทธิภาพของการกำจัดทองแดงจากการทดลอง สรุป และ วิจารณ์การทดลอง

## 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าในการแยกทองแดงออกจากของเสียทางเคมีจากห้องปฏิบัติการเคมี อาคารพระเทพฯ
2. ใช้เครื่องมือวิเคราะห์หอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ในการหาปริมาณของทองแดง
3. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย ได้แก่ ระยะเวลาที่เหมาะสม อิทธิพลของค่าความเป็นกรด และ ศักย์ไฟฟ้าในการกำจัดไอออนของทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

1. เป็นแนวทางในการบำบัดของเสียทางเคมีจากห้องปฏิบัติการเคมี เพื่อลดปัญหามลพิษและการปนเปื้อนทองแดง จากห้องปฏิบัติการเคมีสู่สิ่งแวดล้อม
2. ศึกษาเทคนิคทางเครื่องมือเคมีวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปีโตมิเตอร์
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี โดยไม่ต้องสร้างโรงบำบัดซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เติมน้ำและ กำจัดกากตะกอนที่แพง

### 1.6 ผลผลิตหรือการนำไปใช้ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากงานวิจัยนี้

การเสริมสร้างศักยภาพของห้องปฏิบัติการเคมีในการอยู่ร่วมกับสิ่งแวดล้อมอย่างสันติและเกื้อกูลโดยพัฒนาประสิทธิภาพการบริหารจัดการ เพื่อลดมลพิษและควบคุมกิจกรรมที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิต เป็นการเสริมสร้างสุขภาพคนไทยให้มีสุขภาพแข็งแรงทั้งกายและใจ มีความสัมพันธ์ทางสังคมและอยู่ในสภาพแวดล้อมที่น่าอยู่ สามารถสร้างกลไกเพื่อลดผลกระทบต่อฐานทรัพยากร ธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตและการพัฒนาที่ยั่งยืน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แหล่งกำเนิดและชนิดของน้ำเสีย

เนื่องจากห้องปฏิบัติการเคมีอาคารพระเทพฯมีหน้าที่บริการการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการเคมี สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร จำนวน 28 กลุ่มย่อย ทำให้มีของเสียทางเคมีที่เกิดจากการเรียนปฏิบัติการดังกล่าว โดยเฉพาะการทดลอง เรื่องปฏิกิริยาเคมีและความสัมพันธ์ทางน้ำหนัก ซึ่งในขั้นตอนการทดลอง มีการใช้ทองแดงเพื่อศึกษา ปฏิกิริยาและสารประกอบของทองแดง จึงมีทองแดงหลงเหลืออยู่ในของเสียทางเคมีในรูปสารประกอบทองแดงหลังการเรียนปฏิบัติการเคมี

เนื่องด้วยทองแดงมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต [ภาคผนวก ก] จึงทำให้ถูกกำหนดไว้ในค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง [ภาคผนวก ค]

กระบวนการที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีการใดขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆดังนี้ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการพื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และ ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีบำบัดได้ดังนี้

#### 2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีโลหะหนักอยู่นั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาเลือก ใช้วิธีการใดขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆดังนี้ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพ ของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และ ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีบำบัดได้ดังนี้

##### 2.2.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี

วิธีนี้นิยมใช้กันมานานแล้ว ทำได้โดยเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากร้ำน้ำทิ้ง ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมี มีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธี คือ การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ และ ผลึกซัลไฟด์

##### 2.2.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนผลึกแบบดั้งเดิม โดยเติมสารเคมีคือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เกิดปฏิกิริยา ดังสมการนี้

$$\text{M}^{2+} + 2 \text{NaOH} \longrightarrow \text{M(OH)}_2(\text{s}) + 2 \text{Na}^+ \text{ โดย } \text{M}^{2+} \text{ คือ ไอออนของโลหะ}$$

โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่ตกตะกอนได้ที่ pH 8-11

##### 2.2.1.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน คือ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ เฟอร์รัสซัลไฟด์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

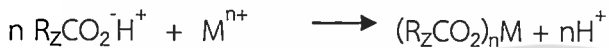
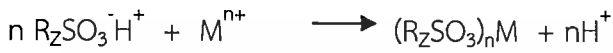
$$\text{M}^{2+} + \text{Na}_2\text{S} \longrightarrow \text{MS}(\text{s}) + 2 \text{Na}^+ \text{ โดย } \text{M}^{2+} \text{ คือ ไอออนของโลหะ}$$

ข้อดีของการตกตะกอนผลึกโลหะซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกโลหะซัลไฟด์ มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่น ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากอ็อกซิเจนของซัลไฟด์มากเกินไป จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยการบำบัดซัลไฟด์ออกไปก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

### 2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน เรซินที่นำมาใช้ มีทั้งที่เป็นสารจากธรรมชาติกับที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น สำหรับเรซินที่สังเคราะห์ขึ้น จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเป็นโพลีเมอร์ สำหรับเรซินที่มีประจุบวก เรียกว่า cation exchange resin ถ้าเป็นกรดแก่จะอยู่ในรูปของ sulfonic acid ( $\text{RSO}_3\text{H}^+$ ) ถ้าเป็นกรดอ่อนจะอยู่ในรูปของ carboxylic acid ( $\text{RCOOH}$ ) โปรตอนของกรดทั้งสองในเรซินสามารถแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนในสารละลายได้



โดย  $\text{R}_2 = \text{resin}$

เรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบเรียกว่า anion exchange resin ซึ่งฟังก์ชันนอลกรุป คือ ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) จะสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนแอนไอออนดังนี้

ถ้าเป็นเรซินชนิดเบสแก่



ถ้าเป็นเรซินชนิดเบสอ่อน



R แทนด้วยกรุปสารอินทรีย์ เช่น methyl group

เมื่อเรซินถูกนำมาใช้แลกเปลี่ยนกับแคทไอออนหรือแอนไอออนแล้ว สามารถทำการเปลี่ยน สภาพของเรซินให้กลับมามีอยู่ในรูปของกรด ( $\text{H}^+$ ) หรือของเบส ( $\text{OH}^-$ ) ได้ใหม่ โดยการใช้กรด HCl หรือ เบส NaOH ผ่านลงในคอลัมน์ใหม่อีกครั้งหนึ่ง



วิธีนี้จะเหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการ กำจัดสูง นิยมใช้กับน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า ด้วยวิธีนี้มีขีดจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือ มีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนเข้าสู่เรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.2.3 การออกซิเดชันและรีดักชัน

การกำจัดโลหะและสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่ายจากของเสียที่เป็นของเหลว โดยใช้ หลักการทางเคมีของปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษเพื่อทำการกำจัดภายหลัง อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ปริมาณ สารออกซิเดชันที่ใช้ และ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน

### 2.2.4 รีเวอร์ส ออสโมซิส

เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยการยอมให้แรงดันอัดน้ำเสียผ่านเยื่อ Semi-permeable membrane ซึ่งเยื่อนี้มีคุณสมบัติยอมให้น้ำและสารบางอย่างผ่านไปได้ ดังนั้นจะได้น้ำ ที่มีความสะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง กระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานมาก และ ต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 การระเหย

เป็นการใช้ความร้อนในการระเหยนํ้าออกไป ทำให้ความเข้มข้นของนํ้าเสียสูงขึ้น หรือ กลายเป็นกากตะกอน พลังงานที่ใช้มาจากเชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อนหรือใช้พลังงานแสงอาทิตย์

### 2.2.6 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากมีพื้นที่ผิวต่อนํ้าหนักสูง เมื่อสัมผัสกับนํ้าเสียทำให้โลหะหนักถูกจับไว้ในรูพรุนต่างๆ ทำให้นํ้าทิ้งสะอาด แต่ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วไม่ควรกำจัดโดยการเผา

### 2.2.7 การแยก

การแยกของเสียที่แตกต่างกันออกเป็น 2 กลุ่มหรือมากกว่า ขึ้นกับขนาด ความหนาแน่นและ ประเภทของวัสดุทั่วไปโดยวิธีที่ทำด้วยมือ และด้วยเครื่องจักรกล การแยกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ของการบำบัดในขั้นต่อไป และยังช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องการบำบัดด้วย

### 2.2.8 การเผา

การเผาเป็นขบวนการกำจัดของเสียอันตรายทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยให้ ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 800 - 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์หรือไม่ ขึ้นกับ เวลา อุณหภูมิ และการคลุกเคล้า ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาขึ้นกับสารแต่ละชนิด และ เตาเผาควรมีระบบควบคุมสารมลพิษที่เกิดจากการเผา เช่น ระบบดักฝุ่นและก๊าซ ระบบบำบัดนํ้าเสีย

### 2.2.9 การปรับเสถียร/การทำแข็ง

กระบวนการการปรับเสถียรและการทำแข็งถูกออกแบบเพื่อปรับปรุงการจัดการ และคุณ ลักษณะทางกายภาพของของเสียโดย

1. ทำให้เป็นของแข็ง
2. ลดการละลายของสารปนเปื้อน และ
3. ลดพื้นที่ผิวที่สัมผัส

การทำแข็งไม่จำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีระหว่างสารและสารทำแข็ง แต่ต้อง แสดงว่าท้ายสุดของเสียถูกยึดติดภายในก้อนแข็งนั้น ขณะที่การปรับเสถียรเป็นกระบวนการลด ความอันตรายของสาร โดยการเปลี่ยนสารปนเปื้อนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีเคลื่อนที่หรือพิษน้อยที่สุด การทำ แข็งและปรับเสถียรสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

- Cement base technique โดยการผสมซีเมนต์กับตะกอนและเติม additive เช่น ซีเมนต์ลอย เพื่อทำให้เกิดการแข็งตัวและรวมตัวกันได้ดีขึ้น
- Encapsulation technique เป็นขบวนการที่ทำให้ของเสียถูกเคลือบด้วยสารbinder เช่น โพลีบิวทาดีน ผสมกับของเสียทำให้เป็นก้อน แล้วใช้โพลีเอธิลีนที่มีความหนาแน่นสูง หลอมเคลือบผิวภายนอกอีกชั้น กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีนี้ก่อนที่จะนำไปฝัง กลบควรทดสอบคุณสมบัติว่าไม่ละลายนํ้าอีก โดยค่านํ้าชะขยะจะต้องไม่เกินค่ามาตรฐาน ที่กำหนด [5]

### 2.2.10 การใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)

เคมีไฟฟ้า เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ จะต้องประกอบไปด้วย

1. สารที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction)
2. สารที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่าตัวออกซิไดซ์ เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction)

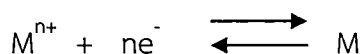
สามารถนำเคมีไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโดยวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า ค่าทางไฟฟ้าที่วัด ได้แก่ กระแส ศักย์ไฟฟ้า และความต้านทาน ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ การสร้างเซลล์เคมีไฟฟ้าที่สามารถวัดค่าต่างๆเหล่านี้ได้ ทำให้เกิดเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์หลายวิธีด้วยกัน และมีชื่อเรียกวิธีการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้านั้นๆ ตามเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ต่อไปนี้

- วิธีโพเทนทิโอมेटริก คือ วิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ประกอบขึ้นเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้า ชนิดกัลวานิกเซลล์ คือ สารตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาได้เองที่ผิวของขั้วไฟฟ้าโดยไม่ต้องอาศัยแหล่ง พลังงานจากภายนอก ผลการดำเนินปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง ทำให้ได้พลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดค่าได้
- วิธีนอน-โพเทนทิโอมेटริก คือ การวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าที่อาศัยปฏิกิริยาอิลเล็กโทรไลซิส หรือ ใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดอิลเล็กโทรไลติกเซลล์ แบ่งได้หลายวิธีตามเทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการทดลองได้แก่ วิธีอิลเล็กโทรกราวิเมตรี คูลอมเมตรี โวลแทมเมตรี และ คอนดักโทเมตรี ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีอิลเล็กโทรกราวิเมตรี
- วิธีอิลเล็กโทรกราวิเมตรีเป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอิลเล็กโทรไลซิสของไอออนในสารละลายภายในเซลล์ [6]

### 2.3 ทฤษฎีและหลักการกำจัดโลหะหนักด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

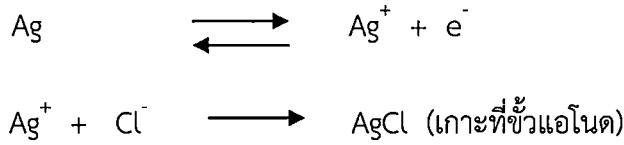
อิลเล็กโทรกราวิเมตรี เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาอิลเล็กโทรไลซิสของไอออนในสารละลายภายในเซลล์

อิลเล็กโทรกราวิเมตรี คือ การให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์เพียงพอ ที่จะทำให้อิออนเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ อิออนเหล่านั้นจะเกิดการให้และรับอิเล็กตรอน เกิดเป็นโลหะอิสระเกิดขึ้น ซึ่งโลหะที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกาะที่ขั้วแคโทดได้ ทำให้สามารถหาน้ำหนักของโลหะที่เกิดขึ้นได้ การวิเคราะห์โดยวิธีนี้สามารถทำได้ทั้งการหาปริมาณของแคโทดไอออนและแอนไอออน ในกรณีที่เป็นไอออนของโลหะ ไอออนเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โลหะเกาะที่ขั้วแคโทด



สำหรับขั้วที่ใช้ควรเป็นขั้วแพลทินัม เพราะแพลทินัมเป็นโลหะที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และไม่เกิดปฏิกิริยากับกรดหรือเบส นอกจากนี้ยังเป็น inert ที่ electrode คือไม่เกิดปฏิกิริยาเมื่อให้ การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

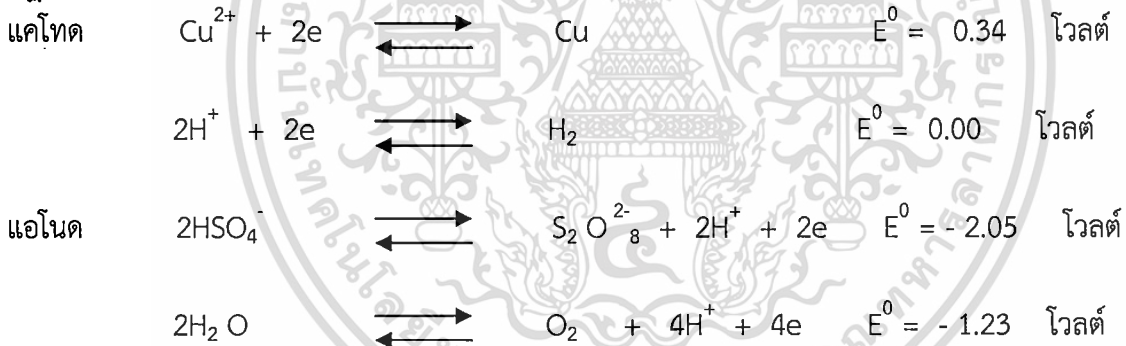
ศักย์ไฟฟ้าสูงๆ ในการทำรีดักชันอ็อกซิเจนของโลหะ ในกรณีที่เป็นแอนอ็อกซิเจน เช่น คลอไรด์อ็อกซิเจน สามารถวิเคราะห์หาปริมาณโดยวิธีนี้ได้ โดยใช้ขั้วเงินเป็นแอนโนดซึ่งขั้วน้ำหนักได้เช่นเดียวกัน



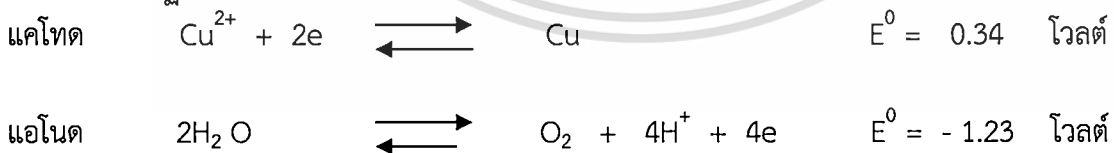
ในการทำอิเล็กโทรไลซิสสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1. การควบคุมเซลล์ให้มีศักย์ไฟฟ้าคงที่
2. การควบคุมกระแสไฟให้คงที่ วิธีนี้ไม่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโดยวิธีอิเล็กโทรกราวิเมตริก จะนำไปประยุกต์ใช้ในหลักการของคูลอมบ์เมตริกมากกว่า
3. การควบคุมศักย์ไฟฟ้าแคโทดให้คงที่ สำหรับโครงการวิจัยนี้ใช้เทคนิคการควบคุมเซลล์ให้มีศักย์ไฟฟ้าคงที่

การควบคุมศักย์ไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นมากในการทำอิเล็กโทรไลซิส ถ้าการทดลองให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากเกินไป จะทำให้ออกซิเจนอื่นๆ ที่ไม่ต้องการเกิดปฏิกิริยาแล้วเข้ามาเกาะที่ขั้วได้ทองแดงอ็อกซิเจนสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นโลหะทองแดงมาเกาะ (deposit) ที่ขั้วได้ในสารละลายกรดซัลฟูริกหรือ กรดไนตริก โดยปกติในการทดลองจะใช้สารละลายผสมของกรดทั้งสอง ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นที่ขั้ว



ตามทฤษฎีสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่จะทำให้อ็อกซิเจนของโลหะเกิดรีดักชันกลายเป็น โลหะเกาะที่ขั้วได้ ปฏิกิริยาของเซลล์ คือ



$$E^0_{\text{cell}} = 0.34 - 1.23 = -0.92 \text{ โวลต์}$$

การควบคุมศักย์ไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นมากในการทำอิเล็กโทรไลซิส ถ้าการทดลองให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากเกินไป จะทำให้ออกซิเจนอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ เกิดปฏิกิริยาแล้วเข้ามาเกาะที่ขั้วได้ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากับ -0.92 โวลต์ หมายความว่า ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอก แก่เซลล์จำนวน 0.92 โวลต์ จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างบนนี้ได้ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์แล้ว สามารถเกิดปฏิกิริยาตามที่ต้องการได้ เรียกว่า Decomposition Potential ค่าที่คำนวณได้ -0.92 โวลต์ นี้เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่พอดีที่จะเริ่มทำให้กระแสไฟฟ้าผ่านภายในเซลล์ ในทางปฏิบัติต้องการให้มีกระแสไฟฟ้าไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านภายในเซลล์มากขึ้น เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ จึงต้องมีการให้ศักย์ไฟฟ้ามากกว่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

ทั้งนี้เพราะภายในเซลล์ยังมีศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน การเกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินสามารถเกิดได้ทั้งที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด นั่นคือการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเกาะของโลหะที่ขั้ว ต้องรวมถึงศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินนี้ด้วย

$$E_D = (E_{\text{cathode}} + E_{\text{o.c.}}) - (E_{\text{anode}} + E_{\text{o.a.}})$$

$E_D$  = Decomposition Potential

$E_{\text{o.c.}}$  = ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

$E_{\text{o.a.}}$  = ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

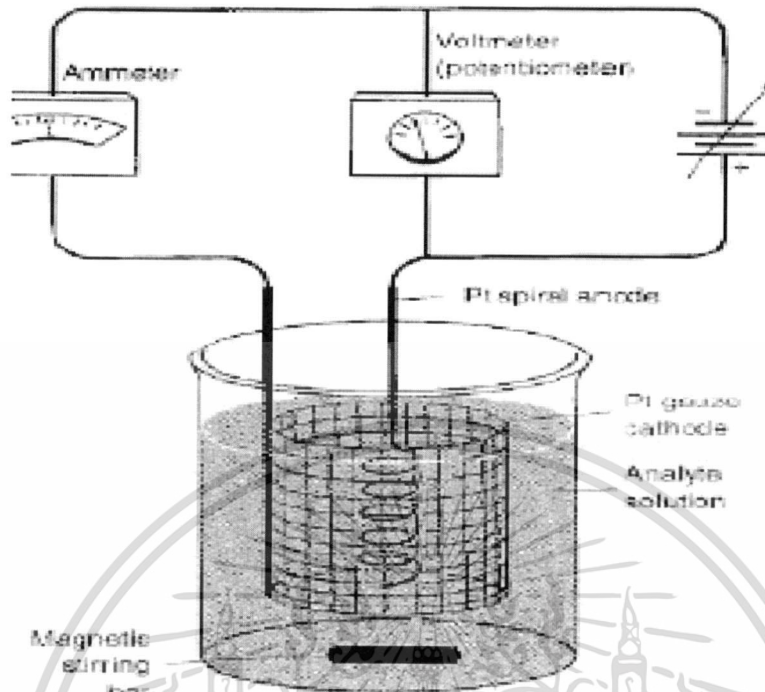
ในการทดลองจริงๆ จำเป็นต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่า  $E_D$  จำนวนหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า ภายในเซลล์ยังมีความต้านทาน ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในยังคงเป็นไปตามกฎของโอห์ม คือ  $E = IR$

$$\text{นั่นคือ } E_{\text{applied}} = E_D + IR$$

ไอออนของโลหะแต่ละชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยาแล้วให้โลหะไปเกาะ (deposit) ที่ขั้วได้ที่ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถทำการแยกโลหะทั้งสองออกจากกัน โดยใช้หลักการอิเล็กโทรไลซิส ไอออนของโลหะสองชนิดที่ต้องการแยกต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันที่ต่างกันมากๆ ไอออนที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นค่าลบน้อยจะเกิดเกาะที่ขั้วแคโทดก่อน ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มีค่าสูงมาก ไอออนของโลหะทั้งสองสามารถเกิดปฏิกิริยาแล้วเข้าเกาะที่ขั้วได้เหมือนกัน

ดังนั้นการควบคุมศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์จึงมีความสำคัญมาก ในการแยกไอออนของโลหะออกจากกัน นอกจากนี้การควบคุมสภาวะของสารละลายก็มีผลต่อการเกาะของโลหะที่ขั้วด้วยเช่นกัน เช่น การควบคุมค่า pH การเติม complexing agent เป็นต้น เช่น การแยกทองแดงออกจากนิกเกิล พบว่าในการทำอิเล็กโทรไลซิสในสารละลายของกรด ทองแดงสามารถเกิดการเกาะที่ขั้วได้ดี สามารถแยกออกจากนิกเกิลได้ก่อน และ เมื่อควบคุมสภาพสารละลายให้เป็นเบส นิกเกิลสามารถเกาะที่ขั้วได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากแยกทองแดงออกไปแล้ว ซึ่งสภาวะของการแยกไอออนตัวหนึ่งๆ ออกจากไอออนอื่นๆ นั้น เป็นเรื่องที่ต้องศึกษาหาวิธีการเฉพาะ ในการควบคุมสภาพของความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ไม่สามารถนำมากล่าวรวมๆ กันเป็นหลักเกณฑ์ได้

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีแผนภาพแสดงการทำงานและการต่อวงจรดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 เครื่องมือและการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

โลหะที่แยกออกมาเกาะที่ขั้วแคโทด ควรจะมีลักษณะที่ติดแน่นและเรียบ เพื่อว่าในการล้างและอบให้แห้งไม่เกิดการสูญเสียของน้ำหนักโลหะที่หลุดออกไป สิ่งสำคัญที่มีผลต่อการเกาะของโลหะที่ขั้วแคโทด คือ ความหนาแน่นของกระแส การแยกที่ดีควรใช้ความหนาแน่นของกระแสต่ำกว่า 0.1 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร

ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ไม่ควรสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้ทองแดงเกาะที่ขั้วได้ไม่หมด และเกาะได้ไม่แน่นเพราะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การแก้ไขทำได้โดยการเติมตัวDepolarizer ซึ่งคือไนตริกไอออนลงในสารละลายด้วยจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับไนเตรตไอออน ดังสมการ



ดังนั้นถ้ามีไนเตรตไอออนในสารละลายมากๆจะไม่เกิด  $\text{H}_2$  ที่ขั้วของแคโทด สารละลายกรดไนตริกที่นำมาใช้ต้องปราศจากไนตริส เพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า กรดไนตริสที่มีปะปนอยู่กับกรดไนตริกสามารถกำจัดได้โดยการต้มกรดไนตริกก่อนนำมาใช้หรือโดยการเติมยูเรียลงในสารละลายก่อนนำมาใช้



หรือโดยการเติมSulphamic acid จะได้ปฏิกิริยาเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีกรดไนตริกอยู่ในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ถ้ามีเหล็กอ็อกไซด์อยู่ในสารละลายด้วย เพราะเหล็กอ็อกไซด์จะถูกรีดิวซ์โดยกระแสที่ผ่านลงไปโนเซลล์ ทำให้เกิดเฟอร์รัสอ็อกไซด์ที่สามารถรีดิวซ์กรดไนตริกได้ ข้อผิดพลาดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการควบคุม pH หรือแยกเอาเหล็กอ็อกไซด์ออกก่อนที่จะทำอิเล็กโทรไลซิส หรือทำให้เหล็กอ็อกไซด์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) หรือฟลูออไรด์ (F) [7]

#### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนัก

จักรี และ ประพฤทธิ์ (2542) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาวิธีการกำจัดโลหะหนักทองแดงจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีและเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน ในการศึกษาได้นำน้ำเสียอุตสาหกรรมล้างท่อแอร์และชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ ทองแดงที่มีความเข้มข้นของโลหะทองแดงเฉลี่ย 11,115 พีพีเอ็ม และ 11,413 พีพีเอ็ม มาบำบัดด้วยวิธีทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี และเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุนตามลำดับ มีสภาวะที่ใช้ศึกษาในเซลล์เคมีไฟฟ้าครั้งนี้ ค่าพีเอช เท่ากับ 2 ค่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่เท่ากับ 43.3 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร กระแสไฟฟ้าที่ใช้คงที่ที่ 13 แอมแปร์ ปริมาณน้ำเสีย 0.5 ลิตร เวลาที่ใช้ศึกษา 60 นาที และสภาวะที่ใช้ในการศึกษาด้วยเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุนครั้งนี้ ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ค่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ 0.12 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 19 แอมแปร์ ปริมาณน้ำเสีย 6 ลิตร เวลาที่ใช้ศึกษา 60 และ 120 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในการบำบัดคิดเป็น 36.53 และ 28.88 เปอร์เซ็นต์ อัตราการลดลงของโลหะทองแดง เท่ากับ 427.07 และ 316.26 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง-แอมแปร์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าและเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า ตามลำดับ [8]

ชัยกฤษ (2543) ได้ทำงานวิจัยการศึกษาออกแบบ และสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน เพื่อนำมาใช้กำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์อาศัยพื้นฐานจากเซลล์ชนิดที่มีขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ โดยขั้วแคโทดเป็นโลหะทองแดงกลวงขนาดเล็กและขั้วแอโนดเป็นท่อโลหะสแตนเลส สภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงคือ 60 นาที ใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลวง 1000 ลูกที่สภาวะพีเอช 0.7 โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าในวงจรให้เท่ากับ 19.0 แอมแปร์ ในการทดสอบการกำจัดไอออนของทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 117.3 และ 1002.0 พีพีเอ็ม เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดจะมีไอออนของทองแดงอยู่เฉลี่ยเท่ากับ 0.7 และ 4.3 พีพีเอ็มตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.42 และ 99.59 ตามลำดับ น้ำหนักทองแดงที่เกาะขั้วแคโทดเมื่อทดสอบกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม คิดเป็นร้อยละ 90.20 ส่วนการทดสอบกับน้ำเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 99.97 และ 87.15 พีพีเอ็ม เมื่อผ่านกระบวนการบำบัด จะมีไอออนของทองแดงเหลืออยู่เฉลี่ยเท่ากับ 0.75 และ 2.3 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.25 และ 99.74 ตามลำดับ น้ำหนักทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดเมื่อทดสอบกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม คิดเป็นร้อยละ 67.11 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หทัยทัต (2544) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่นิยมใช้กันมากคือการตกตะกอนด้วยสารเคมี ดังนั้นก่อให้เกิดตะกอนโลหะจำนวนมากและจำเป็นต้องทำการบำบัดต่อไป การบำบัดตะกอนนิยมใช้วิธีการฝังกลบอันเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อแยกโลหะหนักออกจากตะกอนกระบวนการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ละลายโลหะหนักออกจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสีย และการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีไฟฟ้าเคมี พบว่าในขั้นตอนการละลายตะกอนค่าความเป็นกรด - เบสเหมาะสมในการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน ปริมาณตะกอนแห้งประมาณ 0.7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกรดซัลฟูริกคือ ประมาณ 1.0 โดยมีค่าความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดโดยประมาณดังนี้ ทองแดง 70 ppm., นิกเกิล 95 ppm., สังกะสี 15 ppm. และโครเมียม 7 ppm. ขั้นตอนการกำจัดโลหะพบว่ามากกว่า 90% ของทองแดงสามารถแยกออกมาได้ในสถานะโลหะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current Efficiency) สูงสุด และโลหะชนิดอื่น ๆ ที่เหลือในสารละลายถูกกำจัดออกด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (electroprecipitation) พบว่าสามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมได้เกือบ 100% และกำจัดสังกะสีได้มากกว่า 80% ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110 - 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตรโดยพลังงานที่ใช้อยู่ช่วง 25-30 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร [9]

มะลิ (2544) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เพื่อการนำกลับคืนของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโลหะ เนื่องจากเหตุผลทางแวดล้อมและทางเศรษฐศาสตร์ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรกเป็นการนำกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ที่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับคืนโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ที่ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนสุดท้ายเป็นการนำกลับคืนของโลหะผสมของทองแดง โครเมียม และ นิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่าโลหะแต่ละชนิด มีสภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียม และ นิกเกิลจากสารละลายผสมได้ สภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับทองแดง โครเมียม และ นิกเกิลมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1090.90 แอมแปร์ต่อตารางเมตรตามลำดับ โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 6 มีผลต่อการนำกลับของทองแดง ในขณะที่โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 3 ไม่มีผล [10]

ณัฐศักดิ์ (2544) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารช่วยในการตกตะกอนโลหะทองแดง ในการศึกษาขั้นต้นจากน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ความเข้มข้น 500 ppm. กำจัดโดยการใช้สารเคมีในการทดลอง 3 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ ในการตกตะกอนอ็อกไซด์ทองแดง สำหรับโลหะที่ผ่านการกำจัดทองแดงออกแล้ว ผลปรากฏว่าไม่มีสารใดให้ค่าความเข้มข้นของอ็อกไซด์  $\text{Cu}^{2+}$  หลังบำบัดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจุบันได้มีการกำหนดค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำทิ้งที่ 2 ppm. สำหรับการทดลองจากน้ำเสียจริงที่ความเข้มข้นทองแดง 110.8 ppm. ใช้สารตกตะกอนร่วมกันเป็นคู่ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ที่ค่า pH ต่าง ๆ และผลจากค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนร่วมกับค่า pH ในการตกตะกอนอ็อกไซด์ทองแดง ทำให้ค่าความเข้มข้นที่ต่ำสุดคือ 0.047 ppm. โดยการใส่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 4 เท่าร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ 10 เท่าโดยโมลของทองแดงที่ pH 4 แต่เนื่องจากราคาต้นทุนของสารเคมีมีราคาสูง ดังนั้นในการกำจัดโลหะทองแดง เพื่อให้ผ่านตามมาตรฐานน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์อันใดจากการนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งของโรงงานอุตสาหกรรมสามารถเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมกว่าคือ การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 1 เท่า ร่วมกับโซเดียมโบซัลไฟด์ 5 เท่าโดยโมลของทองแดงที่ pH 5 ทำให้เหลือความเข้มข้นทองแดงคือ 1.16 ppm. โดยที่สภาวะนี้ราคาต้นทุนของสารเคมีในการกำจัดทองแดง คือ 1.6 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร [11]

จิตตกานต์ (2544) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ การทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ 1) การทดลองเบื้องต้นแบบแบดซ์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงและทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดและนำกลับทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน 3) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดและนำกลับทองแดงในน้ำเสียโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ผลการทดลองเบื้องต้นแบบแบดซ์พบว่าเรซินเหมาะสมที่จะใช้กำจัดทองแดงเชิงซ้อนในขณะที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ไม่เหมาะสมที่จะใช้กำจัดทองแดงเชิงซ้อนแต่เหมาะสำหรับกำจัดทองแดง การดำเนินงานบำบัดและนำกลับทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ต่อรอบการทำงานด้วยเรซินพบว่าได้ผลตอบแทนประมาณ 1,119 บาท/ปี ส่วนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการเตรียมสูงจึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง [12]

มงคล (2549) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งมีสังกะสี (Zn) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) เป็นองค์ประกอบโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารทำปฏิกิริยาเพื่อตกตะกอน จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าการตกตะกอนทางเคมีสามารถกำจัดสังกะสี โครเมียม และทองแดงได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และทำให้คุณภาพน้ำภายหลังการบำบัดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด ในการศึกษาด้วยวิธี Jar test และ Lab scale reactor โดยใช้ น้ำเสียที่มีสังกะสีปนเปื้อนซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำเสียต่างกัน พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 8.89-9.07 คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 96.4-98.2 เปอร์เซ็นต์ และ pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโครเมียมและทองแดงมีค่าเท่ากับ 7.25 คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Cr}^{3+}$  เท่ากับ 97.4 เปอร์เซ็นต์ และ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [13]

มณีรัตน์ (2552) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ในรูปของสารละลายที่เป็นด่าง (SBH) ความเข้มข้น 1.2% ของ  $\text{NaBH}_4$  ใน 4% ของ NaOH กำจัดโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสีย 4 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียจากการชุบทองแดง น้ำเสียจากการชุบนิเกิล น้ำเสียจากการชุบโครเมียมและน้ำเสียรวม ซึ่งเป็นน้ำเสียจริงที่ได้จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า การบำบัดน้ำเสียจากการชุบทองแดงที่มีความเข้มข้น 550 ppm. ทำได้โดยการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยเบสให้มีพีเอชอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 แล้วจึงเติม  $\text{NaHSO}_3$  5 เท่าของทองแดง และเติม SBH จนได้พีเอชสุดท้ายประมาณ 7 จะสามารถกำจัดทองแดงทั้งหมดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม [14]

A. A. Al-Shammaria, *et.al.* (2004) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการบำบัด  $\text{Cu}^{2+}$  ion ออกจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ปลายด้านหนึ่งของเซลล์เป็นขั้วบวกหรือแอโนด อีกด้านหนึ่งเป็นขั้วลบหรือแคโทด โดยที่ขั้วแคโทดสามารถหมุนได้ มีการทดลองกับน้ำเสียที่มี  $\text{Cu}^{2+}$  ion 100 ppm. โดยจากผลการทดลองพบว่าสามารถทำให้น้ำเสียหลังการบำบัดโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้ามีความเข้มข้นต่ำกว่า 1 ppm. โดยให้ศักย์ไฟฟ้า 2-5 โวลต์ มีประสิทธิภาพในการนำกลับคืนของทองแดงที่ 20-53 % ใช้พลังงาน 4 -21 กิโลวัตต์. ชั่วโมงต่อการกำจัดทองแดง 1 กิโลกรัมออกจากน้ำ

ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสีย โดยมีการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรของศักย์ไฟฟ้า อัตราการหมุนของขั้วแคโทด มุมเอียงของขั้วแคโทด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเพิ่มความต่างศักย์และอัตราการหมุนของขั้วแคโทดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง [15]

Tamilmani, *et.al.* (2004) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการบำบัด  $\text{Cu}^{2+}$  ion ออกจากน้ำเสียด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าวิธี Cyclic voltammetry โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบ Galvanostatic เพื่อต้องการลดขั้นตอนในการบำบัดให้เหลือเพียงขั้นตอนเดียว โดยใช้ขั้วโบรอนที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของเพชรเป็นขั้วแคโทด ทำให้เกิดการเกาะของ  $\text{Cu}^{2+}$  ion ที่ขั้วดังกล่าว ซึ่งจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพ ในการกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$  ion ช่วงความเข้มข้น 15-50 mg/L อยู่ระหว่าง 48 - 87 เปอร์เซ็นต์ [16]

ในโครงงานวิจัยนี้เสนอแนวทางบำบัดของเสียเคมีที่มีทองแดงปนเปื้อนจากการเรียนปฏิบัติการเคมีทั่วไป โดยนำของเสียทางเคมีที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาปริมาณของทองแดงก่อนการบำบัด โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer) หลังจากนั้นนำของเสียทางเคมีดังกล่าวมารีดิวซ์ด้วยโลหะแมกนีเซียมในสถานะเป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริก [3] เนื่องจาก  $\text{Cu}^{2+}$  รั่วเล็กน้อยได้ดีกว่า  $\text{Mg}^{2+}$  เกิดเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงของโลหะทองแดง [4] แล้วบำบัดสารประกอบของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสโดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยศึกษาปัจจัยของตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง ได้แก่ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง ค่าความเป็นกรดและ ศักย์ไฟฟ้า แล้วมีการทดสอบหาปริมาณของทองแดงหลังการบำบัด โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer) ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีการใช้สารเคมีในขั้นตอนการบำบัดน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการการบำบัดค่อนข้างต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ลักษณะน้ำเสียที่ทำการศึกษา

น้ำเสียที่นำมาศึกษาเป็นน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี อาคารศูนย์เรียนรวมสมเด็จพระเทพฯในการเรียนวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป การทดลอง เรื่องปฏิกิริยาเคมีและความสัมพันธ์ทางน้ำหนัก ซึ่งในขั้นตอนการทดลอง มีการใช้ทองแดงเพื่อศึกษาปฏิกิริยาและสารประกอบของทองแดง จึงมีของเสียทางเคมีอยู่ในรูปสารประกอบของทองแดง

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ
  - 1.1 ปีกเกอร์
  - 1.2 ขั้วแอโนด
  - 1.3 ขั้วแคโทดเป็นตาข่ายรูปทรงกระบอก
2. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส
3. เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือนอยู่ในสารละลายภายหลังทำการทดลอง ด้วยเครื่อง Atomic Absorbance Spectroscopy ของ Shimadzu รุ่น 680
4. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
5. เครื่องแก้ว
6. แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

#### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
2. Mg power
3. สารละลายมาตรฐานทองแดง 1000 ppm. ของ Merck
4. กรดไนตริกเข้มข้น

#### 3.4 วิธีทำการทดลอง

##### 3.4.1 ศึกษาคุณภาพเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำเสีย

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำเสีย

พารามิเตอร์	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
พีเอช	pH meter
อุณหภูมิ	Thermometer
ความเข้มข้นของทองแดง	Atomic Absorption Spectrophotometer ( AAS )

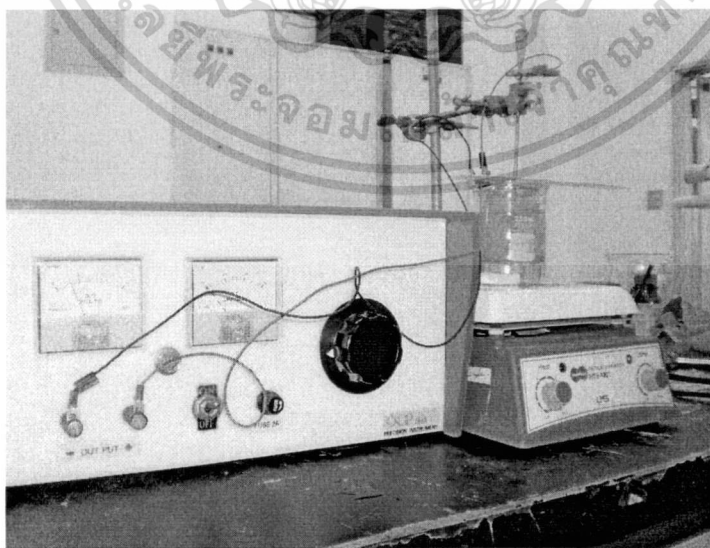
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างทองแดงไอออนกับโลหะแมกนีเซียมที่ต้องเติมในการกำจัดทองแดงโดยการรีดิวซ์ด้วยโลหะแมกนีเซียม มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. นำน้ำเสียซึ่งเป็นของเสียทางเคมีจากห้องปฏิบัติการ จำนวน 200 มิลลิลิตร ปรับพีเอชน้ำเสียดังกล่าว เท่ากับ 1 ด้วยกรดซัลฟูริก
2. เติมโลหะแมกนีเซียมด้วยอัตราส่วนต่อทองแดง 1:1, 1.2:1, 1.4:1, 1.6:1, 1.8:1, 2:1, 2.2:1 ตามลำดับ จดบันทึกสีของตะกอนที่ได้
3. แยกโลหะทองแดงออกจากสารละลาย ล้างโลหะทองแดงด้วยน้ำกลั่นก่อนนำไปอบในตู้อบ 2 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักทองแดงที่ได้ด้วยเครื่องชั่งละเอียด คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ทองแดงที่ได้
4. จากการทดลองดังกล่าว เลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของโลหะแมกนีเซียม : ของเสียทางเคมี นำมาใช้ในการกำจัดทองแดงออกจากของเสียทางเคมีตามขั้นตอนที่ 1-3 แล้วนำสารละลายส่วนที่เหลือวัดหาความเข้มข้นของโลหะทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion Spectroscopy ของ Shimadzu รุ่น 680

3.4.3 ศึกษาค่าความเป็นกรด ศักย์ไฟฟ้าและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงมีขั้นตอนศึกษาดังนี้

1. นำน้ำเสียหลังจากวัดหาความเข้มข้นของโลหะทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion Spectroscopy ของ Shimadzu รุ่น 680 แล้ว มาปรับ pH = 1 ด้วยกรดซัลฟูริก ก่อนไปทำการแยกทองแดงโดยเซลล์เคมีไฟฟ้า
2. เตรียมชุดจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ 3 โวลต์ นำขั้วบวกของชุดจ่ายกระแสไฟฟ้ามาต่อเข้ากับขั้วแอโนด นำขั้วลบของชุดจ่ายกระแสไฟฟ้ามาต่อเข้ากับขั้วแคโทด ที่เป็นตาข่ายรูปทรงกระบอก
3. จุ่มขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ลงในบีกเกอร์ โดยขั้วแอโนดอยู่กึ่งกลางรูปทรงกระบอกของขั้วแคโทด ดังภาพที่ 3.1



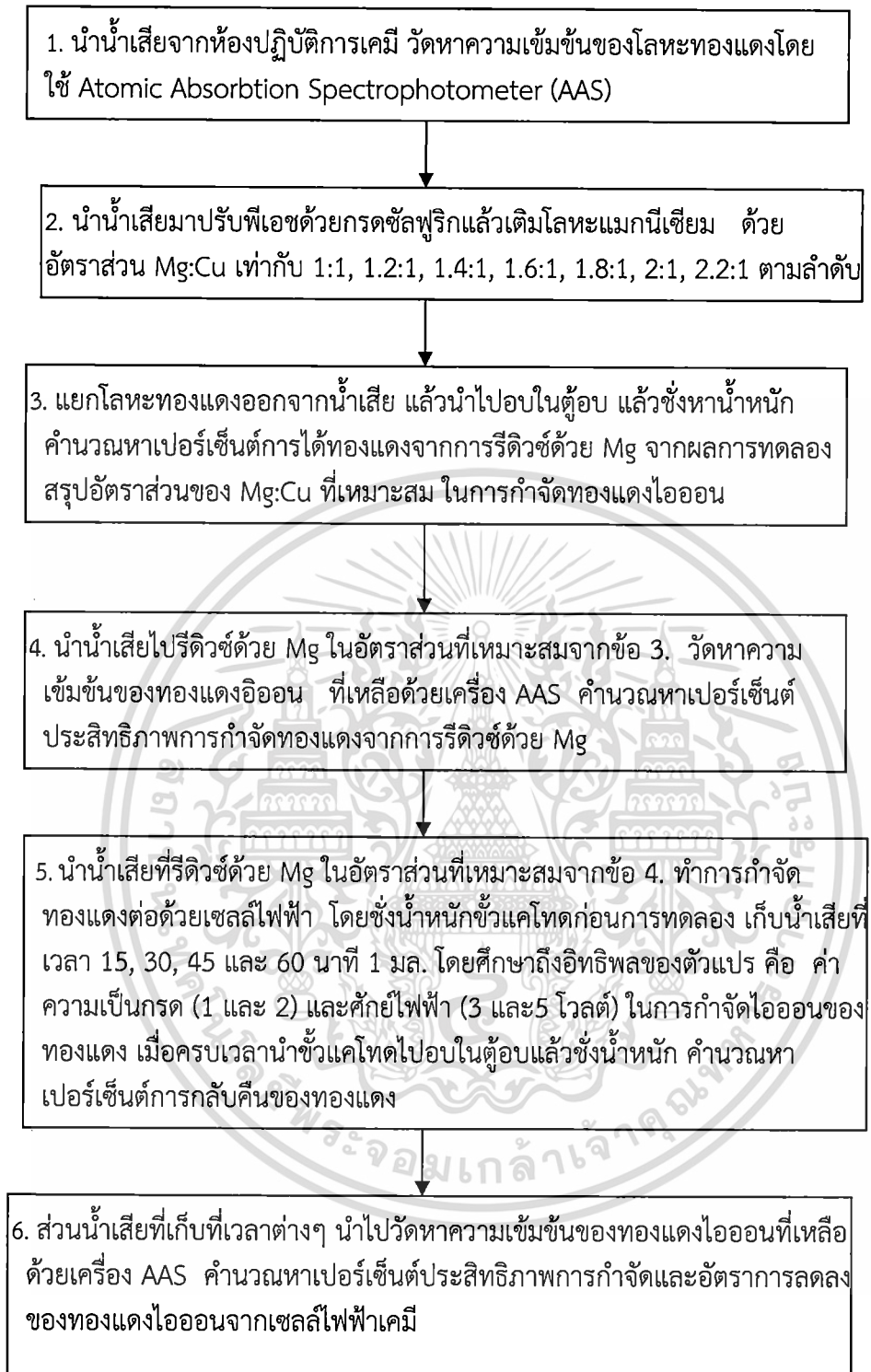
ภาพที่ 3.1 เครื่องมือและการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

6. จ่ายกระแสไฟฟ้าสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า 3 โวลต์ เป็นเวลา 60 นาที
  7. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่เวลา 15 , 30, 45 และ 60 นาที จำนวน 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตรโดยไม่ต้องหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้วนำไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะทองแดง ด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion Spectroscopy ของ Shimadzu รุ่น 680
  8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-7 อีก 2 ครั้ง
  9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-8 แต่ pH ของสารละลาย = 2
  10. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-8 แต่ใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ แทนศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ และ pH ของสารละลาย = 1
  11. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-8 แต่ใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ แทนศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ และ pH ของสารละลาย = 2
  12. พล็อตกราฟโดยแกน y แทน % ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง , อัตราการลดลง และ % กรดได้กลับคืนของทองแดง แกน x แทนเวลาเป็นนาที หาค่าเฉลี่ยของ% การกำจัดไอออนของทองแดง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของแต่ละวิธี เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้า pH เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงจากค่าสถิติค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
- 3.4.4 สถิติวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) = 0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพีเอช, ศักย์ไฟฟ้า และผลรวมของพีเอชกับศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการกำจัดทองแดงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันและเทคนิคเคมีไฟฟ้า

## บทที่ 4

## ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

## 4.1 ศึกษาคุณภาพเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำเสีย

ตารางที่ 4.1 คุณภาพเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี อาคารศูนย์เรียนรวมสมเด็จพระเทพฯ

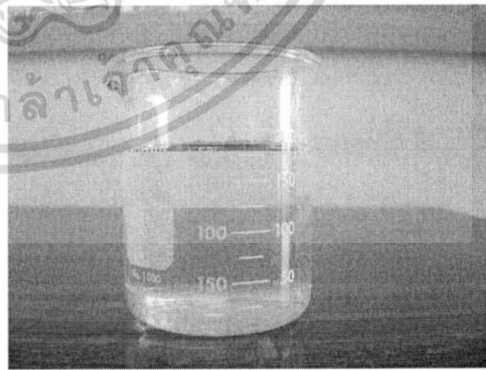
พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์ได้
สี	เขียวอ่อน
พีเอช	9.7
อุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียส
ทองแดง	4277 ppm



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.1 ก. ตัวอย่างน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี อาคารพระเทพฯ

ข. ตัวอย่างน้ำเสียหลังการรีดิวซ์ด้วยโลหะแมกนีเซียม

ค. ตัวอย่างน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี

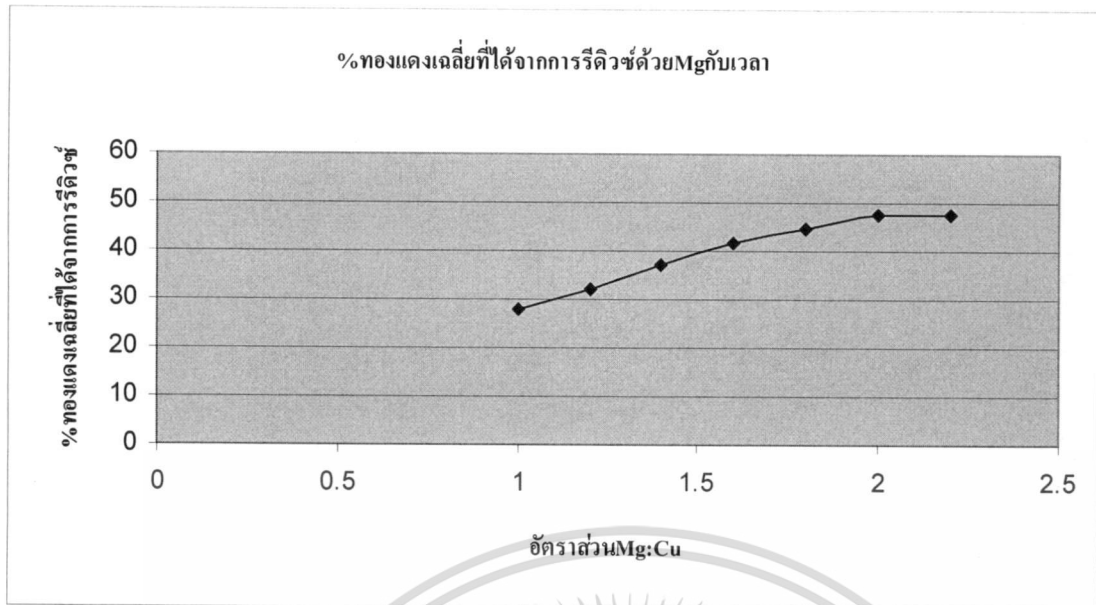
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างทองแดงไอออนกับโลหะแมกนีเซียม ในการรีดิวซ์ด้วยโลหะแมกนีเซียม

ตารางที่ 4.2 การทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างทองแดงไอออนกับโลหะแมกนีเซียม

อัตราส่วน Mg:Waste	ครั้งที่	น้ำหนัก ทองแดงที่ ได้	% ทองแดงที่ ได้	ค่าเฉลี่ย	SD	%RSD	สีของตะกอนที่ได้
1:1	1	0.2351	27.49	27.84	0.42	1.51	น้ำตาลแดง
	2	0.2422	28.30				น้ำตาลแดง
	3	0.2371	27.72				น้ำตาลแดง
1.2:1	1	0.2751	32.16	31.97	0.89	2.78	น้ำตาลแดง
	2	0.2651	30.99				น้ำตาลแดง
	3	0.2795	32.75				น้ำตาลแดง
1.4:1	1	0.3122	36.49	37.04	0.67	1.81	น้ำตาลแดง
	2	0.3153	36.84				น้ำตาลแดง
	3	0.3229	37.78				น้ำตาลแดง
1.6:1	1	0.3487	40.82	41.56	0.67	1.61	น้ำตาลแดง
	2	0.3569	41.75				น้ำตาลแดง
	3	0.3599	42.11				น้ำตาลแดง
1.8:1	1	0.3761	43.98	44.64	0.60	1.34	น้ำตาลแดง
	2	0.3833	44.80				น้ำตาลแดง
	3	0.3857	45.15				น้ำตาลแดง
2.0:1	1	0.4059	47.49	47.49	0.70	1.47	น้ำตาลแดง
	2	0.4123	48.19				น้ำตาลแดง
	3	0.4003	46.78				น้ำตาลแดง
2.2:1	1	0.4097	47.95	47.63	0.71	1.49	น้ำตาลแดงมีMgลอย บนสารละลาย
	2	0.4113	48.07				น้ำตาลแดงมีMgลอย บนสารละลาย
	3	0.4004	46.78				น้ำตาลแดงมีMgลอย บนสารละลาย

หมายเหตุ : พีเอช 2 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 15 นาที จากผลการทดลองพบว่า ค่าร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD)มีค่าไม่สูงมากนัก แสดงว่าผลการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการได้ทองแดงเฉลี่ยจากการรีดิวซ์ด้วยMg

จากภาพที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนของMg : Cu ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการได้ทองแดงจากการรีดิวซ์ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งพบว่าอัตราส่วนของMg : Cu คือ 2.2 : 1 ปริมาณของMg เหลืออยู่ในสารละลาย จากผลการทดลองดังกล่าวจึงเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างของเสียทางเคมีกับโลหะแมกนีเซียม คือ 2:1 เนื่องจากโลหะแมกนีเซียมซึ่งเป็นโลหะที่ไวกว่าทองแดงในการทำปฏิกิริยา ( $\text{Cu}^{2+}$  รับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า  $\text{Mg}^{2+}$ ) จะเข้าแทนที่ทองแดงในสารละลายได้หมด และจากการทดลองหาปริมาณทองแดงในของเสียทางเคมีโดยใช้เครื่องAAS พบว่ามีทองแดง เหลืออยู่ 1334.67 ppm.

#### การคำนวณเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการได้ทองแดงจากการรีดิวซ์ด้วยMg

จากการวัดหาปริมาณทองแดงในของเสียทางเคมีโดยใช้เครื่องAAS พบว่ามีทองแดง 4277ppm.  
 ดังนั้นแสดงว่าในสารละลาย 1000 ml. มีทองแดง = 4.277 g  
 ในสารละลาย 200 ml. มีทองแดง =  $4.277 \times 200 / 1000 = 0.8544$  g

$$\text{ดังนั้น \%ทองแดงที่ได้จากการรีดิวซ์ด้วยMg} = \frac{\text{น้ำหนักทองแดงที่ขังได้(g)} \times 100}{0.8544 \text{ g}}$$

#### การคำนวณเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจากการรีดิวซ์ด้วยอัตราส่วนMg:Cu คือ 2:1

$$\begin{aligned} \text{จากwaste เริ่มต้น มีCu}^{2+} & 4277 \text{ ppm. กำจัดโดยการรีดิวซ์ Mg } 4277 - 1334.67 = 2942.33 \text{ ppm} \\ \text{จากwaste เริ่มต้น มีCu}^{2+} & 100 \text{ ppm. กำจัดโดยการรีดิวซ์ Mg } = \frac{2942.33 \times 100}{4277} \\ & = 68.79 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการรีดิวซ์ด้วยMg พบว่าสารละลายร้อนขึ้นตั้งนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจากการรีดิวซ์ และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการได้ทองแดงจากการรีดิวซ์ด้วยMg พบว่ามีความแตกต่างกัน  $68.79 - 47.49 = 21.30$  อาจเนื่องมาจากระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเกิดความร้อนที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดการสูญเสียทองแดงเนื่องจากความร้อน

#### 4.3 ศึกษาค่าความเป็นกรด ศักย์ไฟฟ้าและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง

##### 4.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง

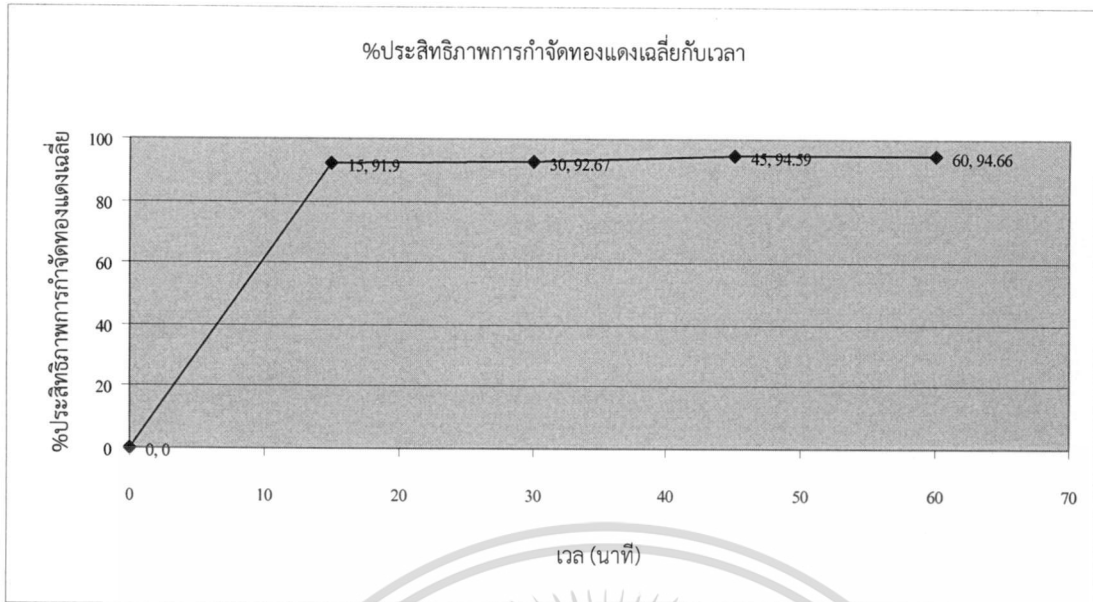
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในของเสียทางเคมีจากการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ pH =1

ปริมาณของทองแดงไอออนในของเสียทางเคมีก่อนบำบัด 4277.00 ppm.

ปริมาณของทองแดงไอออนในของเสียทางเคมีหลังรีดิวซ์ด้วยMg 1334.67 ppm.

ครั้งที่	ปริมาณทองแดงไอออน(ppm.) ที่เวลาต่างๆ(นาที)				%ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ที่เวลาต่างๆ(นาที)				น้ำหนักทองแดง เกาะที่ขั้ว (g)
	15	30	45	60	15	30	45	60	
	1	140.1	112	64	57	89.50	91.61	95.2	
2	113.5	108	80.5	80	91.50	91.91	93.96	94.01	0.2417
3	139.5	129.5	105	105	89.55	90.30	92.13	92.13	0.2455
ค่าเฉลี่ย	131.03	116.5	83.17	80.67	91.9	92.67	94.59	94.66	0.2428
SD	15.19	11.435	20.63	24.01	2.63	2.83	2.80	2.93	0.0024
%RSD	11.59	9.81	24.8	29.75	2.86	3.05	2.96	3.10	0.9885

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนทองแดงเฉลี่ยจากการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ pH = 1

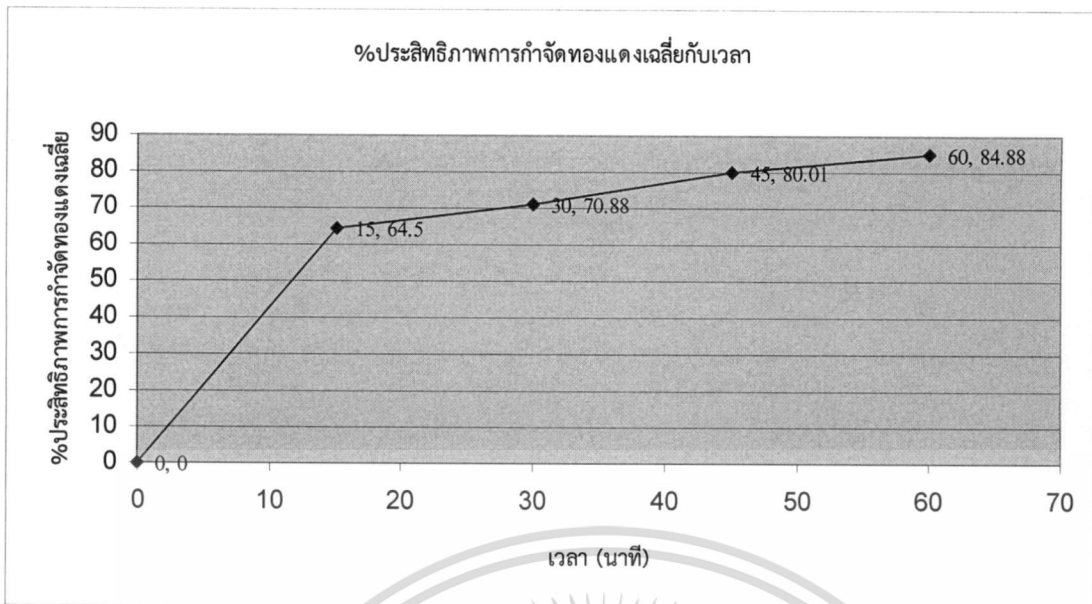
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในของเสียทางเคมีจากการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ pH = 2

ปริมาณของทองแดงไอออนในของเสียทางเคมีก่อนบำบัด 4277.00 ppm.

ปริมาณของทองแดงไอออนในของเสียทางเคมีหลังรีดิวซ์ด้วยMg 1334.67 ppm.

ครั้งที่	ปริมาณทองแดงไอออน(ppm.) ที่เวลาต่างๆ(นาที)				%ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ที่เวลาต่างๆ(นาที)				น้ำหนักทองแดง เกาะที่ ขั้ว (g)
	15	30	45	60	15	30	45	60	
1	456.5	356	235	171.5	65.80	73.33	82.4	87.2	0.2052
2	474	401	273	212.5	64.49	69.99	79.58	84.08	0.2079
3	490	410	293	221.5	63.29	69.32	78.05	83.40	0.2102
ค่าเฉลี่ย	473.50	389.00	267.00	201.8	64.5	70.88	80.01	84.88	0.2078
SD	16.76	28.93	29.46	26.65	1.26	2.15	2.20	2.00	0.0025
%RSD	3.54	7.44	11.03	13.21	1.95	3.03	2.75	2.36	1.2031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

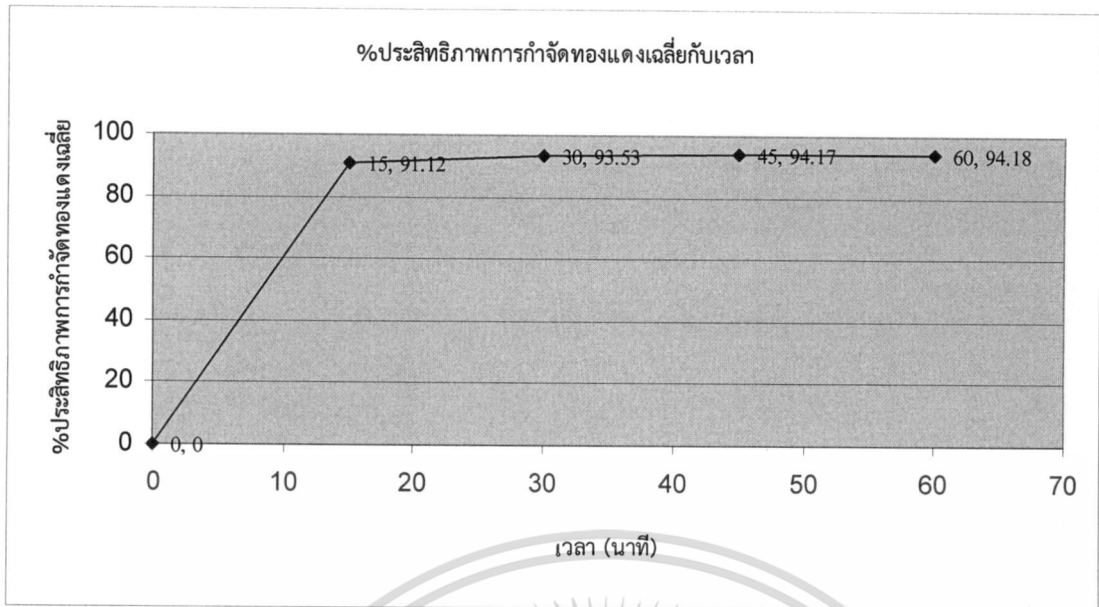


ภาพที่ 4.4 เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนทองแดงเฉลี่ย  
จากการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ pH =2

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในของเสียทางเคมี  
จากการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ pH =1  
ปริมาณของทองแดงไอออนในของเสียทางเคมีก่อนบำบัด 4,277 ppm.  
ปริมาณของทองแดงไอออนในของเสียทางเคมีหลังรีดิวซ์ด้วยMg 1,334.67 ppm.

ครั้งที่	ปริมาณ ทองแดงไอออน(ppm.) ที่เวลาต่างๆ(นาที)				%ประสิทธิภาพ การกำจัดทองแดง ที่เวลาต่างๆ(นาที)				น้ำหนัก ทองแดง เกาะที่ ขั้ว (g)
	15	30	45	60	15	30	45	60	
1	96	55	64.5	48.5	92.81	95.9	95.17	96.37	0.2235
2	109	66	61.5	88	91.83	95.07	95.39	93.41	0.2288
3	150.5	112.5	107	122.5	88.72	91.57	91.98	90.82	0.2344
ค่าเฉลี่ย	118.50	77.83	77.67	91.333	91.12	94.17	94.18	93.53	0.2289
SD	28.46	30.52	20.78	37.028	2.14	2.29	1.91	2.78	0.0055
%RSD	24.02	39.21	26.75	40.54	2.35	2.43	2.03	2.97	2.4028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



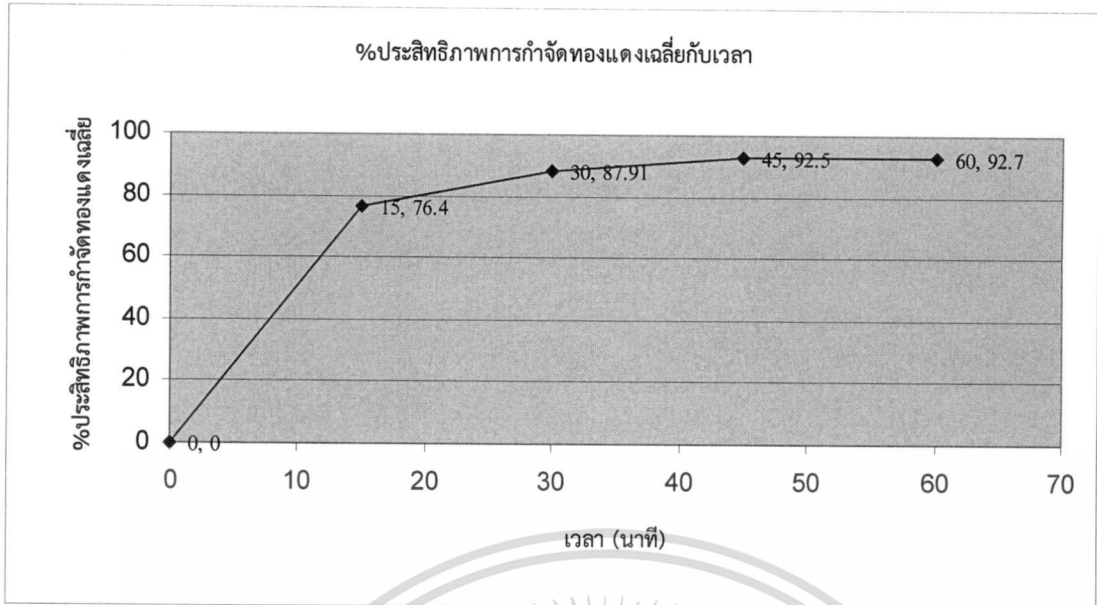
ภาพที่ 4.5 เปรอ์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนทองแดงเฉลี่ยจากการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ pH =1

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงในของเสียทางเคมีจากการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ pH =2

ปริมาณของทองแดงไอออนในของเสียทางเคมีก่อนบำบัด 4,277 ppm.  
 ปริมาณของทองแดงไอออนในของเสียทางเคมีหลังรีดิวซ์ด้วยMg 1,334.67 ppm.

ครั้งที่	ปริมาณทองแดงไอออน(ppm.) ที่เวลาต่างๆ(นาที)				%ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ที่เวลาต่างๆ(นาที)				น้ำหนักทองแดง เกาะที่ ขั้ว (g)
	15	30	45	60	15	30	45	60	
1	299.5	142	86.5	83	77.56	89.40	93.52	93.78	0.2202
2	318	157	98	102.5	76.17	88.24	92.66	92.32	0.2239
3	328.5	185.5	116	106.5	75.39	86.10	91.31	92.02	0.2295
ค่าเฉลี่ย	315.33	161.50	100.17	97.33	76.4	87.91	92.50	92.70	0.2245
SD	14.68	22.10	14.87	12.57	1.1	1.67	1.11	0.95	0.0047
%RSD	4.66	13.68	14.84	12.92	1.44	1.90	1.20	1.02	2.0935

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



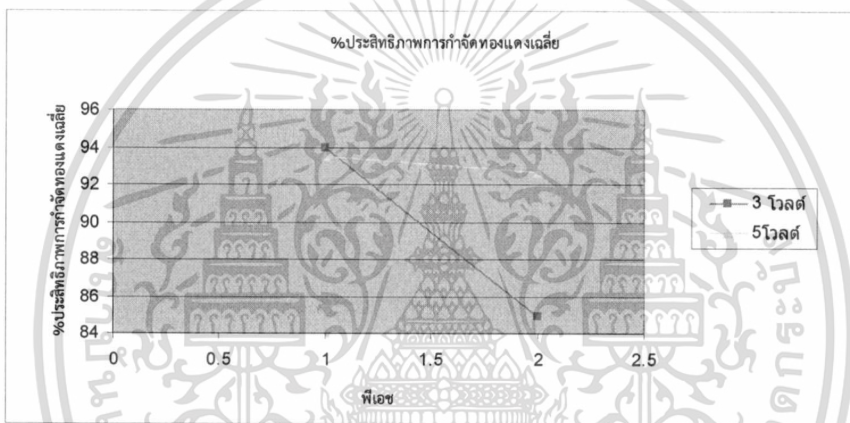
**ภาพที่ 4.6** เปรอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนทองแดงเฉลี่ยจากการบำบัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ pH = 2

จากภาพที่ 4.3 - 4.6 จากผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง เป็นเวลา 60 นาที ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกคือ 0-45 นาที มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ %ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของทองแดงอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ที่กล่าวว่ามวลของสารที่เกิดขึ้นที่แอโนดหรือแคโทดในขณะที่เกิดอิเล็กโทรไลซิส จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ ซึ่งหมายความว่า ปฏิกิริยาภายในเซลล์ไฟฟ้าจะเกิดมากหรือน้อย มีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และระยะเวลาของการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน เซลล์ไฟฟ้า ในระยะเวลาที่นานกว่าปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดขึ้นมากกว่าหรือไอออนของทองแดงจะเกิดปฏิกิริยากลายเป็นโลหะทองแดงเกาะที่ขั้วแคโทดมากกว่า แต่หลังจาก 45 นาที %ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของทองแดงมีแนวโน้มเห็นความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงไม่ควรเกิน 60 นาที เพราะการทำการทดลองเกิน 60 นาที ไม่คุ้มค่ากับพลังงาน และเวลาที่เสียไป นอกจากนี้จากภาพที่ 4.5 - 4.6 ซึ่งทำการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ที่พีเอช 1 และ พีเอช 2 พบว่า %ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของทองแดงที่มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากพลังงานไฟฟ้าที่ให้บางส่วนถูกเปลี่ยนไปในรูปของความร้อน อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปนี้มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสียทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกาะของโลหะทองแดงที่ขั้วแคโทดอยู่ที่ 25- 40 องศาเซลเซียส

4.3.2 ศึกษาค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง ศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อ %ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงเฉลี่ย

ตารางที่ 4.7 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงเฉลี่ย

	%ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเฉลี่ย	%ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเฉลี่ย
ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	พีเอช 1	พีเอช 2
3	93.96	84.88
5	93.53	92.7



ภาพที่ 4.7 ค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อ %ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงเฉลี่ย

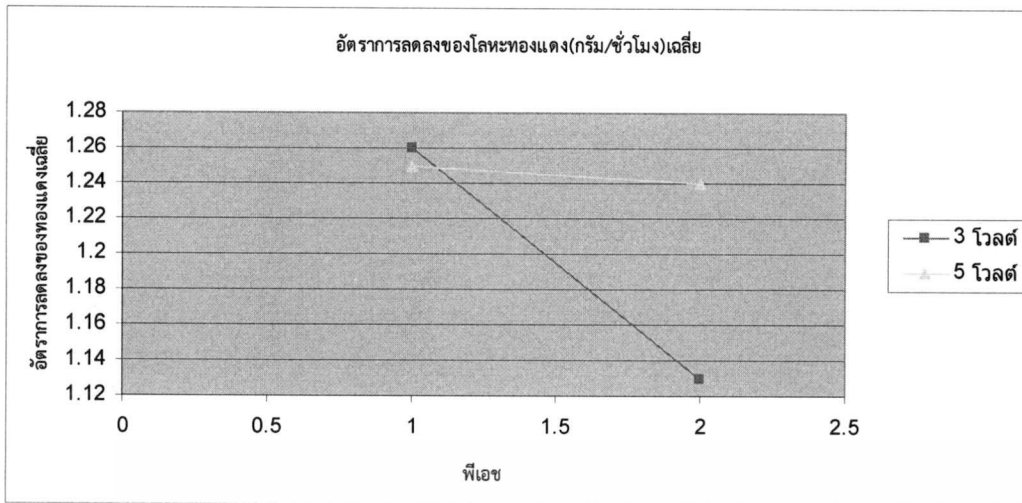
ช. ศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อ อัตราการลดลงไอออนของทองแดงเฉลี่ย

ตารางที่ 4.8 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการลดลงไอออนของทองแดงเฉลี่ย

ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	pH	ปริมาณทองแดงไอออนก่อนบำบัด mg/l	ปริมาณทองแดงไอออนหลังบำบัด mg/l	อัตราการลดลงของโลหะทองแดง (กรัม/ชั่วโมง)
3	1	1334.67	80.67	1.26
	2	1334.67	201.83	1.13
5	1	1334.67	86.33	1.25
	2	1334.67	97.33	1.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับไว้ใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าไม่เหมาะสมให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



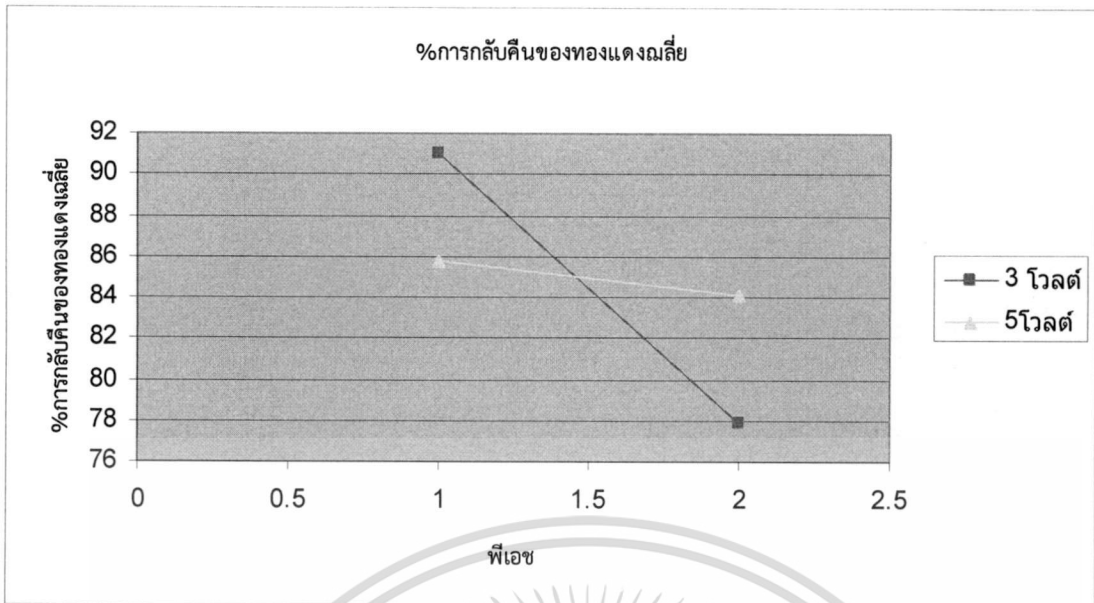
**ภาพที่ 4.8** อิทธิพลของค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการลดลงไอออนของทองแดงเฉลี่ย

ค. ศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อ % การกลับคืนไอออนของทองแดงเฉลี่ย

**ตารางที่ 4.9** ศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด และศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อ %การกลับคืนไอออนของทองแดงเฉลี่ย

ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	pH	ทองแดงไอออน ก่อนบำบัด (กรัม)	ทองแดงเฉลี่ย ชั่งได้(g)	% การกลับคืนของทองแดงเฉลี่ย
3	1	0.2669	0.2428	90.97
	2	0.2669	0.2078	77.86
5	1	0.2669	0.2289	85.76
	2	0.2669	0.2245	84.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 ศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรดและศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อร้อยละการกลับคืนไอออนของทองแดงเฉลี่ย

จากภาพที่ 4.7 - 4.9 เมื่อพีเอชมีความเป็นกรดมากขึ้น (พีเอชต่ำลง) โดยการเติมกรดซัลฟูริก ไอออนของทองแดงจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย กลายเป็นโลหะทองแดงเข้าเกาะที่ขั้วแคโทดมากขึ้น เนื่องจากกรดซัลฟูริกจะแตกตัวได้เป็น  $H^+$  และ  $SO_4^{2-}$  อนุภาคเหล่านี้เป็นตัวทำให้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายมากขึ้น มีการให้และรับอิเล็กตรอนกันมากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองมากขึ้น ไอออนของทองแดงจึงถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้มากขึ้น เราเรียก กรดซัลฟูริกว่า เป็นตัวให้ความนำไฟฟ้าหรือตัวอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ %ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง อัตราการลดลงไอออนของทองแดง และ %การกลับคืนไอออนของทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้น

แต่เมื่อเปรียบเทียบการให้ศักย์ไฟฟ้า ในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่าเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น %ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง อัตราการลดลงไอออนของทองแดง และ %การกลับคืนไอออนของทองแดงมีค่าลดลง ไม่เป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของฟาราเดย์ (ภาคผนวก ข) ที่กล่าวว่า ปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านน้ำเสีย เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้ำเสียมากขึ้น ไอออนของทองแดงในน้ำเสียควรจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นโลหะทองแดงเข้ามาเกาะที่ขั้วแคโทดมากขึ้น นั่นคือควรมี %ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดง อัตราการลดลงไอออนของทองแดง และ %การกลับคืนไอออนของทองแดงมีค่ามากขึ้น อาจเนื่องมาจากพลังงานไฟฟ้าที่ให้บางส่วนถูกเปลี่ยนไปในรูปของความร้อน อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปนี้มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสียต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกาะของโลหะทองแดงที่ขั้วแคโทดอยู่ที่ 25- 40 องศาเซลเซียส

4.4 สถิติวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) =0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพีเอช, ศักย์ไฟฟ้า และผลรวมของพีเอชกับศักย์ไฟฟ้า

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบ 2 ทาง คือ จำแนกตามศักย์ไฟฟ้า และจำแนกตามพีเอช โดยวิเคราะห์จาก %ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงด้วยการวัดซ้ำ

%ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง	พีเอช 1	พีเอช 2
ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์	95.73	87.2
	94.01	84.08
	92.13	83.4
ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์	96.37	93.78
	93.41	92.32
	90.82	92.02

จาก ตารางที่ 4.10 เมื่อใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) =0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % สรุปได้ว่า

- ผลของศักย์ไฟฟ้า: พบว่าแต่ละค่าของศักย์ไฟฟ้า(3, 5 โวลต์) ทำให้เกิดผลในการกำจัดทองแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.012512 มีค่าน้อยกว่าค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลของพีเอช: พบว่าแต่ละค่าของพีเอช (1,2) ทำให้เกิดผลในการกำจัดทองแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.02653 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าและพีเอช: พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.007267 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบ 2 ทาง คือ จำแนกตามศักย์ไฟฟ้า และจำแนกตามพีเอช โดยวิเคราะห์จาก อัตราการลดลงของทองแดงด้วยการวัดซ้ำ (กรัม/ชั่วโมง)

อัตราการลดลงของทองแดง ไอออน(กรัม/ชั่วโมง)		
	พีเอช 1	พีเอช 2
ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์	1.28	1.16
	1.26	1.12
	1.23	1.11
ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์	1.29	1.25
	1.25	1.23
	1.21	1.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก ตารางที่ 4.11 เมื่อใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) = 0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % สรุปได้ว่า

- ผลของศักย์ไฟฟ้า: พบว่าแต่ละค่าของศักย์ไฟฟ้า(3, 5 โวลต์) ทำให้อัตราการลดลงของทองแดงไอออนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.014064 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลของพีเอช: พบว่าแต่ละค่าของพีเอช (1,2) ทำให้เกิดผลในการกำจัดทองแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.002353 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าและพีเอช: พบว่าศักย์ไฟฟ้าและพีเอชมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญในการกำจัดทองแดงเนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.007567 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบ 2 ทาง คือ จำแนกตามศักย์ไฟฟ้า และจำแนกตามพีเอช โดยวิเคราะห์จาก % การกลับคืนไอออนของทองแดง

	%การกลับคืนของไอออนทองแดง	
	พีเอช 1	พีเอช 2
ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์	90.37	76.88
	90.56	77.89
	91.98	78.76
ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์	83.74	82.5
	85.72	83.89
	87.82	85.99

จาก ตารางที่ 4.12 เมื่อใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) = 0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % สรุปได้ว่า

- ผลของศักย์ไฟฟ้า: พบว่าแต่ละค่าของศักย์ไฟฟ้า(3, 5 โวลต์) ทำให้% การกลับคืนของทองแดงไอออนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.55072721 มีค่ามากกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลของพีเอช: พบว่าแต่ละค่าของพีเอช (1,2) ทำให้เกิดผลในการกำจัดทองแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 2.66332E-05 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าและพีเอช: พบว่าศักย์ไฟฟ้าและพีเอชมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญในการกำจัดทองแดงเนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.000157606 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองหาปริมาณทองแดงในของเสียทางเคมีโดยใช้เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) พบว่ามีความเข้มข้นของทองแดงไอออน 4277 ppm.

2. จากการทดลอง พบว่าอัตราส่วนของ Mg : Cu ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการได้ทองแดงจากการรีดิวซ์ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่หลังจากอัตราส่วนของ Mg : Cu มากกว่า 2:1 พบว่า ประสิทธิภาพการได้ทองแดง มีแนวโน้มเห็นความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะ Mg เหลืออยู่ในสารละลาย

ดังนั้นจากการทดลองอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างทองแดง กับโลหะแมกนีเซียม คือ 2:1 เนื่องด้วยโลหะแมกนีเซียมซึ่งเป็นโลหะที่ไวกว่าทองแดงในการทำปฏิกิริยา ( $\text{Cu}^{2+}$  รับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า  $\text{Mg}^{2+}$ ) จะเข้าแทนที่ทองแดงในสารละลายได้หมด โดยมีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการได้ทองแดงจากการรีดิวซ์สูง และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพกำจัดทองแดงจากการรีดิวซ์ เท่ากับคือ 47.49 % และ 68.79 ตามลำดับ

3. ในขั้นตอนการรีดิวซ์ด้วย Mg พบว่าอัตราส่วนของ Mg : Cu เท่ากับ 2:1 แตกต่างจากทฤษฎีที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 อาจเนื่องมาจากใน waste มีโลหะหนักชนิดอื่นปนเปื้อน ด้วย Mg มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ต่ำ จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี ทำให้สามารถรีดิวซ์โลหะหนักชนิดอื่นในสารละลายได้ด้วย ดังนั้นจึงควรมีการวัดปริมาณโลหะหนักชนิดอื่นด้วย

และในระหว่างการรีดิวซ์ด้วย Mg พบว่าสารละลายเกิดความร้อนที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพกำจัดทองแดงจากการรีดิวซ์ และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการได้ทองแดงจากการรีดิวซ์ด้วย Mg พบว่ามีความแตกต่างกัน  $68.79 - 47.49 = 21.30$  อาจเนื่องด้วยเกิดการสูญเสียทองแดงเนื่องจากความร้อน

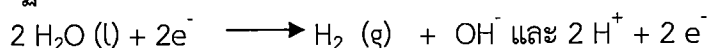
4. จากการใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าในการกำจัดทองแดงไอออนออกจากของเสียทางเคมี โดยศึกษาถึงอิทธิพลของ ศักย์ไฟฟ้า พีเอช และ เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงไอออน โดยจากผลการทดลองพบว่าค่าของตัวแปรดังกล่าวที่เหมาะสม คือ 3 โวลต์, 1 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยมี % ประสิทธิภาพการกำจัด อัตราการลดลง และ % การกลับของทองแดง เท่ากับ 93.96 เปอร์เซ็นต์ 1.26 กรัม/ชั่วโมง และ 90.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5. จากการทดลองทุกๆ การทดลองจะมีแก๊สเกิดขึ้นภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าจากปรากฏการณ์การเกิดโพลาริเซชัน เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเกินตัว ซึ่งมีผลทำให้เกิดแก๊สที่ขั้วเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสของสารละลายทองแดงซัลเฟต ดังนี้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

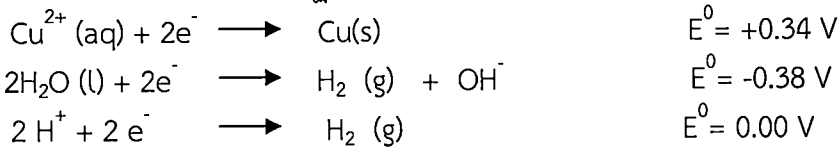


จากปฏิกิริยาจะเห็นว่าที่ขั้วแอโนดมีแก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) เกิดขึ้น

ขณะเดียวกันที่ขั้วแคโทดจะมีแก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) เกิดขึ้น โดยในช่วงแรกของการทดลองการค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าปริมาณแก๊สอยู่เพียงเล็กน้อย และ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เพราะในช่วงแรกของการทดลองแก๊สที่เกิดขึ้น ภายในเซลล์มีเพียงแก๊สออกซิเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด ขณะที่แก๊สไฮโดรเจนยังไม่เกิดขึ้น หรือ เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของทองแดงมีค่าเป็นบวกมากที่สุด ดังนั้นไอออนของทองแดงจึงเกิดปฏิกิริยาได้ก่อนเกิดเป็นโลหะทองแดงเกาะที่ขั้วแคโทด สามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด ดังนี้



แต่เมื่อเวลาผ่านไปไอออนของทองแดงในน้ำเสียลดลงเรื่อยๆ แนวโน้มที่จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนจะเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ภายในเซลล์จะมีทั้งแก๊สออกซิเจนจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด และแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

6. จากการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันร่วมกับเทคนิคเคมีไฟฟ้า สามารถกำจัดไอออนของทองแดงจากน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ ร้อยละ 98.11 และ พบว่าไอออนของทองแดงเฉลี่ยที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่สภาวะเหมาะสม คือ ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ พีเอช 1 และ เวลาที่ใช้ 60 นาที เท่ากับ 80.67 ppm ยังเกินค่ามาตรฐาน ที่กฎหมายกำหนด (มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทรองงานอุตสาหกรรม และ อุตสาหกรรม ตามประกาศของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และ สิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539 ) และ กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานตามประกาศอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539 ) ที่กำหนดว่าทองแดงในน้ำทิ้ง ต้องไม่มากกว่า 2.0 ppm (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค)

## 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

1. อุณหภูมิในระหว่างทำการทดลองการรีดิวซ์ด้วย Mg พบว่าสารละลายร้อนขึ้นค่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดการสูญเสียทองแดงเนื่องจากความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็นในระหว่างการทดลองเพื่อลดอุณหภูมิลง

1. อุณหภูมิในระหว่างทำการทดลองแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะพบว่ามีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากพลังงานกระแสไฟฟ้าที่ให้บางส่วนถูกเปลี่ยนไปเป็นรูปของความร้อน อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปนี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพ การใช้พลังงานในการบำบัดของเสียทางเคมี มีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกาะของโลหะทองแดงที่ขั้วแคโทดอยู่ที่ 25-40 องศาเซลเซียส

2. ในการทดลองแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำในของเสียทางเคมีระเหยออกจากบีกเกอร์ เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้ไปมากเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ส่งผลให้ปริมาตรก่อนและหลังการทดลองไม่เท่ากันทำให้ความเข้มข้นที่วัดได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็นในระหว่างการทดลองเพื่อลดอุณหภูมิลง

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการหาความบริสุทธิ์ของทองแดงที่ได้จากของเสียทางเคมี
2. ศึกษาวิธีการนำทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทด ในการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำกลับไปใช้เป็นสารละลายในการทดลองที่ไม่ต้องการความแน่นอนมากนัก ได้แก่ การทดลองที่ 2 ปฏิกิริยาเคมีและความสัมพันธ์ทางน้ำหนักหรือการทดลองที่ 12 สารประกอบเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชันปฏิบัติการเคมีทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. น้ำเสียภายหลังการบำบัดมีค่า pH ประมาณ 1-2 ซึ่งไม่ได้มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่กำหนดให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5.5-9 ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่าความเป็นกรด-เบส ออกระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

4. เนื่องจากน้ำเสียภายหลังการบำบัดยังไม่ได้ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม อาจมีการศึกษาตัวแปรเพิ่มเติมที่อาจมีผลต่อการบำบัด หรือ นำเทคนิคอื่นมาใช้ในการบำบัด ต่อจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี ได้แก่ เทคนิคการใช้ตัวดูดซับ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] ความเป็นพิษของทองแดง. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.Atsda.cdc.gov/tfacts 132.html>. Copper.
- [2] กรมควบคุมมลพิษ. 2548. แนวทางการจัดการของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการ. พิมพ์ครั้งที่5. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- [3] พรทิพย์ ศัพท์อนันต์. 2547. ปฏิบัติการเคมีเบื้องต้น. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2552. ปฏิบัติการเคมีทั่วไป. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] ชัยกฤษณ์ ธัญพิทยากุล. 2543. การนำโลหะทองแดงในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ เคมีไฟฟ้าแบบหมุน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] อรุณี คงศักดิ์ไพศาล. 2552. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] ธวัชชัย ศรีวิบูลย์ และ สมบูรณ์ แก้วปิ่นทอง. 2533. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 2. พิมพ์ครั้งที่4. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [8] จักรี เผ่าพันธ์ และ ประพฤทธิ์ วงศ์วิญญูตระกูล. 2542. การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน. ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] หทัยทัต. 2544. การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต(เคมีเทคนิค) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต(เคมีเทคนิค) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] ณัฐศักดิ์ ธาราธารกุลวัฒนา และ ณัฐกร วีระพัฒนานนท์. 2544. การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรต์. ปรียญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [12] จิตตกานต์ สินธุเสก. 2544. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบทองแดงเชิงซ้อนโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] มงคล ดำรงค์ศรี. 2549. การบำบัดน้ำเสียของโรงงาน SME ประเภทชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการตกตะกอนทางเคมี. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [14] มณีรัตน์ องค์กรณดี. 2009. การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [15] A.A.Al-Shammari *et.al.* 2004. Study of an oblique rotating barrel electrochemical reactor for removal of copper ions from wastewater. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol 34 : 447-453.
- [16] Tamilmani, S. *et.al.* 2004. Electrochemical treatment of simulated copper CMP wastewater using boron doped diamond thin film electrodes-a feasibility stud. *IEEE Transactions Semiconductor Manufacturing*. Vol 17 : 448-454.

## ภาคผนวก ก ทองแดง (Copper)

ชื่อธาตุ : Copper

สัญลักษณ์ : Cu

เลขอะตอม : 29

Atomic Weight : 63.546

จุดหลอมเหลว : 1085°C

จุดเดือด : 2563°C

ความหนาแน่น (300K)  $\text{g/cm}^3$  : 8.96

สี : เงินแบบโลหะ

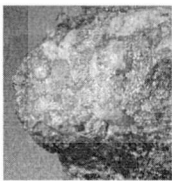
สถานะปกติ (ณ อุณหภูมิห้อง) : ของแข็ง

Electronegativity : 1.90

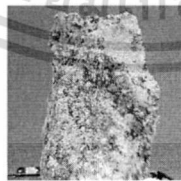
การจัดเรียงอะตอม :  $[\text{Ar}]3d^{10}4s^1$

ทองแดง คือ ธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu แร่ทองแดงที่พบตามธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด ซึ่งที่มีความสำคัญในการผลิตโลหะทองแดงส่วนมากจะเป็นแร่ประเภทซัลไฟด์ มีสองชนิดคือ แร่ทองแดงคาลโคไซต์ (chalcocite) ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) มี Cu ประมาณ 79.8% และแร่ทองแดงคาลโคไพไรต์ (chalcopyrite) ( $\text{Cu FeS}_2$ ) มี Cu ประมาณ 34.5% นอกจากแร่ซัลไฟด์แล้วยังมีแร่ทองแดงออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) แต่ปริมาณที่พบบีน้อย แร่ทองแดงอีกชนิดหนึ่งที่เป็นแร่ทองแดงคาร์บอเนต ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) เรียกกันทั่ว ๆ ไปว่า Malachite มีสีเขียวสวยงามมาก สำหรับประเทศไทยนั้นแร่ทองแดงพบที่จังหวัดเลย หนองคาย ขอนแก่น นครราชสีมา ตาก อุตรดิตถ์ แพร่ น่าน ลำปาง ลำพูน เพชรบูรณ์ ลพบุรี ฉะเชิงเทรา และกาญจนบุรี แต่ยังไม่มีการผลิต

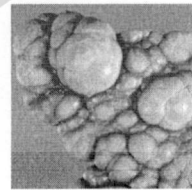
ทองแดงที่ผลิตขึ้นได้มากกว่า 2.5 ล้านปอนด์ต่อปีในสหรัฐอเมริกา นั้น ส่วนใหญ่ถูกลุงมาจากแร่คาลโคไพไรต์ ซึ่งเป็นของผสมระหว่าง  $\text{CuS}$  กับ  $\text{FeS}$  ที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยมวล เพื่อที่จะถลุงเอาทองแดงที่มีอยู่ในปริมาณน้อยออกจากแร่คาลโคไพไรต์ จึงต้องอาศัยวิธีโลหะวิทยาหลายขั้นตอน รวมถึงขั้นตอนที่ทำให้ได้ทองแดงบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.99



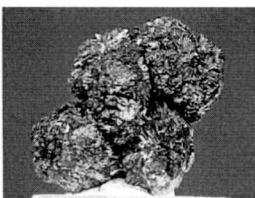
แร่คาลโคไพไรต์



แร่คิวไพไรต์



แร่มาลาไคต์

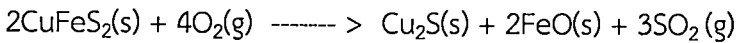


แร่อะซูไรต์

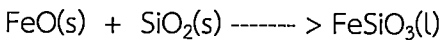
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเตรียม

โลหะทองแดงสามารถเตรียมได้โดยวิธีการถลุง การถลุงทองแดงทำได้โดยการเผาแร่คาลโคไพไรต์ในอากาศ ซึ่งเรียกว่า การย่างแร่ จะได้คอปเปอร์(I)ซัลไฟด์ ไอร์ออน(II)ออกไซด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการ



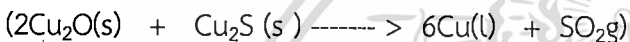
แยกแก๊ส  $\text{SO}_2$  ออก จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เหลือนำไปเผาพร้อมกับออกไซด์ของซิลิคอนในเตาถลุง  $\text{FeO}$  จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิคอน ได้กากตะกอน ดังสมการ



ส่วนคอปเปอร์ ( II) ซัลไฟด์ เมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูงจะสลายตัวได้เป็นคอปเปอร์ ( I) ซัลไฟด์ ในสถานะของเหลวซึ่งสามารถแยกออกได้ และในขั้นสุดท้ายเมื่อแยกคอปเปอร์ ( I) ซัลไฟด์ในอากาศ บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์ ( I) ออกไซด์ ดังสมการ



และคอปเปอร์ ( I) ออกไซด์กับคอปเปอร์ ( I) ซัลไฟด์ จะทำปฏิกิริยากันโดยมีซัลไฟด์ไอออนเป็นตัวรีดิวซ์ ดังสมการ



แต่ยังมีสิ่งเจือปนจึงต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์ก่อน โดยทั่วไปจะใช้วิธีแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า

### สมบัติและประโยชน์ของทองแดง

- โลหะทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.95%ขึ้นไป จะมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้ดีมาก จึงถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
- ใช้โลหะทองแดงทำท่อในอุปกรณ์ตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ
- ใช้ทำอุปกรณ์เกี่ยวกับรถยนต์ อาวุธ เหยี่ยวภูเขาปืน และตราต่างๆ
- ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะหลายชนิด เช่น

ก. โลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล มีความเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยเฉพาะในน้ำทะเลจึงใช้ทำท่อในระบบกลั่น อุปกรณ์ภายในเรือ

ข. โลหะผสมระหว่างทองแดง นิกเกิล และสังกะสี หรือเรียกว่า เงินนิกเกิลหรือเงินเยอรมัน ใช้ทำเครื่องใช้ต่างๆ เช่น ช้อน ส้อม เครื่องมือแพทย์

ค. ทองบรอนซ์ หรือบรอนซ์ หรือทองสัมฤทธิ์ หรือทองสำริด โลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก ถ้ามีดีบุกผสมอยู่ระหว่างร้อยละ 0.8-10โดยมวล และมีการเติมฟอสฟอรัสเล็กน้อย เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (deoxidation) จะมีความแข็งกว่าทองแดง เมื่อเย็นตัวมีความแข็งแรง มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี และไม่ถูกกัดกร่อน

- ทองเหลือง โลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก มีสังกะสีผสมอยู่ร้อยละ 20-45 โดยมวล ทองเหลืองจะมีความแข็ง และความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสมของสังกะสีเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการตีแผ่ให้เป็นแผ่น ขึ้นรูปง่าย ทองเหลืองจึงถูกนำมาใช้ในการทำท่อ ล้วนปิด-เปิด และตัวเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทองแดงไม่ทำปฏิกิริยากับกรด แต่ในกรณีกรดไนตริก พบว่า  $\text{NO}_3^-$  จะเป็นตัวออกซิไดซ์ และไปรีดิวซ์ทองแดงให้เป็น  $\text{Cu}^{2+}$  ไอออน
- $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (จุนสี) ใช้ฆ่าเชื้อราและสาหร่าย
- แร่ทองแดงที่มีสีหรือลวดลายสวยงาม เช่น มาลาไคต์ ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  , สีเขียวอ่อน), อะซูไรต์ ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 (\text{OH})_2$  หรือ  $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  , สีน้ำเงิน) และคริโซคอลลา ( $(\text{Cu,Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) สามารถนำมาทำเป็นเครื่องประดับได้

### บทบาทของทองแดงในสิ่งมีชีวิต

เป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ ในพืชทองแดงเกี่ยวข้องกับการสร้างคลอโรฟิลล์ ในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง เช่น กุ้ง ปู ทองแดงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเลือดฮีโมไซแอนิน (hemocyanin) ในคนทองแดงมีความสำคัญในการสร้างฮีโมโกลบิน ในร่างกายมีทองแดงประมาณ 75-150 มิลลิกรัม ทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในตับ สมอง หัวใจ และไต

ก . หน้าที่

1. จำเป็นสำหรับการสร้างเม็ดเลือด เพราะเป็นตัวกระตุ้นในการใช้เหล็กสร้างฮีโมโกลบิน นอกจากนี้มีผู้พบว่าทองแดงช่วยให้เหล็กดูดซึมดีขึ้น
2. เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับระบบหายใจหรือปฏิกิริยาการใช้ออกซิเจนในร่างกาย เช่น ไซโทโครมออกซิเดส (cytochrome oxidase) แอสคอร์บิก แอซิด ออกซิเดส (ascorbic acid oxidase) และอื่น ๆ

ข . ปริมาณที่ควรรับประทาน ร่างกายต้องการทองแดงวันละประมาณ 2 มิลลิกรัม

ค . ผลของการกินน้อยไป ในสัตว์ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ระบบประสาทพิการ เป็นหมัน และขนมักเปลี่ยนสี แกะที่กินหญ้ามีทองแดงต่ำ จะให้ขนแกะน้อยลง เคนไซเซ ล้มง่าย และตายทันที ในคนปกติยังไม่พบอาการของโรคขาดทองแดง ในเด็กที่ป่วยเป็นโรคขาดโปรตีน หรือเด็กและผู้ใหญ่ที่เป็นโรคโลหิตจาง เพราะขาดเหล็ก โรคไต หรือโรคที่เกิดจากเหล็กดูดซึมไม่ดี มักขาดทองแดงด้วย

ง . ผลของการกินมากไป แกะที่เลี้ยงไว้ในทุ่งหญ้าที่มีทองแดงสูง จะเกิดโรคไตพิการ ฮีโมโกลบิน จำนวนมากไปอุดตันหลอดเลือด ถ้าทิ้งไว้อาจถึงตายได้ อาการป่วยจะหายไปถ้ากินโมลิบดีนัม ดังนั้นจึงเชื่อว่าโมลิบดีนัม และสังกะสีทำให้ร่างกายสัตว์ใช้ทองแดงได้น้อยลง ในคนการกินทองแดงมาก (วันละ 16 - 23 มิลลิกรัม) อาจเป็นพิษได้ มีโรคชนิดหนึ่งเรียก Wilson ' s disease เกิดจากทองแดงสะสมในตับและสมองมากผิดปกติ ไม่สามารถกำจัดให้หมดไป ทำให้แรงดันเลือดสูง หลอดเลือดตีบง่าย ซึมเศร้า และเป็นโรคจิต

### **ความเป็นพิษของทองแดง**

#### **กลไกการเกิดพิษ**

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง

เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นเหียน อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กดระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับ

ไม่ทราบแน่ชัดว่าอันตรายจากพิษของทองแดงนั้นเกิดจากอะไร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดต่อกันเป็นเวลานาน และดับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือ ร่างกายสั้นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก

#### การแก้ไขการเกิดพิษและวิธีการป้องกันการเกิดพิษ

**ผิวหนัง :** ควรสวมเสื้อผ้าที่รัดกุมและมีเครื่องป้องกันร่างกาย ก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารทุกครั้ง เมื่อสารพิษถูกผิวหนังรีบล้างออกด้วยสบู่และน้ำสะอาด ถ้าสารพิษกระเด็นหรือหกเปื้อนเสื้อผ้า ต้องรีบเปลี่ยนเสื้อผ้าทันที แล้วล้างผิวหนังด้วยสบู่และน้ำสะอาด จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาล

**ตา :** ควรมีเครื่องป้องกันสายตาที่เหมาะสมก่อนการปฏิบัติงานเกี่ยวกับสาร (ไม่ควรสวม Contact lens ขณะทำงานเกี่ยวข้องกับสารเคมี) เมื่อสารพิษกระเด็นเข้าตา ต้องรีบล้างออกด้วยน้ำสะอาด จำนวนมากสลับกับการค่อยๆ กระจกประพริบตาขึ้น-ลง จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

**การหายใจ :** เมื่อหายใจรับเอาสารเข้าไปเป็นจำนวนมาก ต้องรีบเคลื่อนย้ายผู้ได้รับสารออกจากบริเวณนั้น ไปสู่บริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ถ้าหยุดหายใจให้รีบทำการผายปอด (mouth-to-mouth) แล้วรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

**การกลืนกินสารพิษ :** รีบบำส่งโรงพยาบาลทันที

#### เอกสารอ้างอิง

1. CAMEO Chemical Database-Response Information Data Sheet " Copper ".
2. Vom Himmel Kommt., Zum Himmel Steigt., Und wieder nieder., Zur Erde' muss and Ewig wechselnd. Health risks of water and sanitation. National Institute for Public Health and Environmental (RIVM). The Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Netherlands. Page 62-64.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### คำจำกัดความ

1. โรงงานอุตสาหกรรม หมายถึง โรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน
2. น้ำเสีย หมายถึง ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว รวมทั้งมวลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น
3. น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรม ที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้
4. โลหะหนัก หมายถึง โลหะหนักที่มีน้ำหนักจำเพาะมากกว่า 4 มีน้ำหนักอะตอมสูง มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 กลุ่มของโลหะหนักอยู่ในคาบที่ 4-7 ตรงครึ่งล่างของตารางธาตุเรียกโลหะกลุ่มนี้ว่า กลุ่มโลหะทรานซิชัน โดยปกติโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆได้ สะท้อนแสงได้ดี คุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ทำให้สามารถรวมตัวกับสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูป สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักโดยทั่วไปจะมีสี ซึ่งละลายน้ำแล้วมีฤทธิ์เป็นได้ทั้งกรดอ่อนและเบสอ่อน โลหะหนักอาจเป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์ก็ได้ การที่โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าในรูปโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตโดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหารโลหะหนักเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนอยู่ในดิน น้ำ อากาศ และ อาหาร แล้วเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าสู่สมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้ กลุ่มโลหะเหล่านี้จึงเป็นสาเหตุของมลพิษที่มีต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งมาจากหลายแหล่ง เช่น ตะกั่วที่อยู่ในน้ำมันเบนซิน น้ำเสียจากอุตสาหกรรม และการชะโอออนของโลหะหนักออกมาจากดินลงสู่ทะเลสาบและแม่น้ำ โดยอิทธิพลของฝนกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 ( พ.ศ . 2539 )

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 22 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน เว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilutions) “ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

## ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

## ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH ) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

2.1 ค่า ทีดีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดแต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า ทีดีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

(3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้น กับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) โลหะหนักมีค่าดังนี้

4.1	ปรอท (Mercury)	ไม่มากกว่า	0.005	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.2	เซลีนียม (Selenium)	ไม่มากกว่า	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.3	แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า	0.03	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.4	ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.5	อาร์เซนิก (Arsenic)	ไม่มากกว่า	0.25	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6	โครเมียม (Chromium)	ไม่มากกว่า	0.25	มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษานานาชาติเพื่อการศึกษาและการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 Hexavalent Chromium	ไม่มากกว่า	0.25	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6.2 Trivalent Chromium	ไม่มากกว่า	0.75	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.7 บาเรียม (Barium)	ไม่มากกว่า	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.8 นิกเกิล (Nickel)	ไม่มากกว่า	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.9 ทองแดง (Copper)	ไม่มากกว่า	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.10 สังกะสี (Zinc)	ไม่มากกว่า	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
4.11 แมงกานีส (Manganese)	ไม่มากกว่า	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

(5) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(6) ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัม

#### ต่อกรัม

(7) ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(8) สารประกอบฟีนอล (phenols Compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(9) คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(10) เพสตีไซด์ (Pesticide) ต้องไม่มี

(11) อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส

(12) สี ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

(13) กลิ่น ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

(14) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

(15) ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

(16) ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(17) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter )

(2) การตรวจสอบค่า ทีดีเอส ให้ใช้การระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึง อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

(3) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber filter Disc)

(4) การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคดเมียม แบเรียม ตะกั่ว นิเกิลและแมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรเมตตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไดเรกต์แอสไพเรชัน (Direct Aspiration) หรือ วิธีพลาสมาอิมมิสชันสเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลีคัพเพลดพลาสมา (Inductively Coupled plasma :ICP)

4.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิกและเซลเลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตเมตตี (Absorption Spectrophotometry) ชนิดไฮไดรด์ เจนเนอเรชัน (Hydride Generation) หรือวิธีพลาสมา อิมมิสชันสเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลีคัพเพลดพลาสมา (Inductively Coupled Plasme : ICP )

4.3 การตรวจสอบค่าปรอท ให้ใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอร์ปชัน โคลด์ เวปเปอร์ เทคนิก (Atomic Absorption Cold Vapour Technigue)

(5) การตรวจสอบค่าซัลไฟต์ ให้ใช้วิธีการไตเตรท (Titrate)

(6) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพรีดีน บาร์บิทูริกแอซิด (pyridine-Barbituric Acid)

(7) การตรวจสอบค่าฟอร์มมาลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีการเทียบสี (Spectrophotometry)

(8) การตรวจสอบค่าสารประกอบพีนอล ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน (Distillation, 4-Aminoantipyrine)

(9) การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric Method)

(10) การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ ให้ใช้วิธีแก๊ซโครโตกราฟี (Gas-Chromatography)

(11) การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ

(12) การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

(13) การตรวจสอบค่าปิไอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์ โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน หรือวิธีการอื่นที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมให้ความเห็นชอบ

(14) การตรวจสอบค่าทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl)

(15) การตรวจสอบค่าซีไอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลาย โดยโปตัสเซียม ไดโครเมต (Potassium dichromate digestion)

ข้อ 4. การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย ของสมาคมวิศวกรแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Work Assciation และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2539

ไชยวัฒน์ สิ้นสูงค์  
(นายไชยวัฒน์ สิ้นสูงค์)  
รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

ประกาศราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 113 ตอนที่ 52 ง วันที่ 27 มิถุนายน 2539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การส่งผ่านมวล

การส่งผ่านมวลหรือการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วอิเล็กโทรด ในระบบทางเคมีไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ

#### 1.การแพร่

การแพร่เกิดเมื่อมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนบริเวณผิวของขั้วอิเล็กโทรดกับในสารละลายจากความเข้มข้นสูงของไอออนไปสู่ความเข้มข้นต่ำ อัตราเร็วของการแพร่ขึ้นกับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นทั้งสองแห่ง เช่น ในการทำอิเล็กโทรไลซิส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ที่บริเวณผิวของขั้วแคโทดไอออนที่มีประจุบวกจะเปลี่ยนรูปเป็นโลหะเกาะที่ขั้วแคโทด ทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่มีประจุบวกที่บริเวณผิวของขั้วแคโทดน้อยกว่าในสารละลาย ทำให้เกิดการแพร่ของไอออนที่มีประจุบวกในสารละลายไปยังผิวหน้าของขั้วแคโทด ยิ่งมีความแตกต่างของความเข้มข้นไอออนที่มีประจุบวกในสารละลายกับบริเวณผิวของขั้วแคโทดมากเท่าใดก็จะยิ่งมีการแพร่ได้รวดเร็ว การแพร่ทำให้เกิดกระแสขึ้นเรียกว่า กระแสจากการแพร่

#### 2.การไมเกรท

การเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้น เมื่อไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด และไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด ความเร็วของการเคลื่อนที่เข้าหาหรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้นซึ่งทำให้การไหลของกระแสในวงจรเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วย และการที่มีไอออนหลายๆชนิดจำนวนมากในสารละลาย ทำให้อัตราส่วนของไอออนที่สนใจต่อประจุทั้งหมดจะลดลงและเมื่อใดที่อัตราส่วนของกระแสที่เกิดจากไอออนที่สนใจต่อประจุทั้งหมดลดลงเข้าใกล้ศูนย์การไมเกรทชันของไอออนที่สนใจไปยังขั้วแคโทด จะไม่ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้า ที่ให้แก่เซลล์

#### 3.การพา

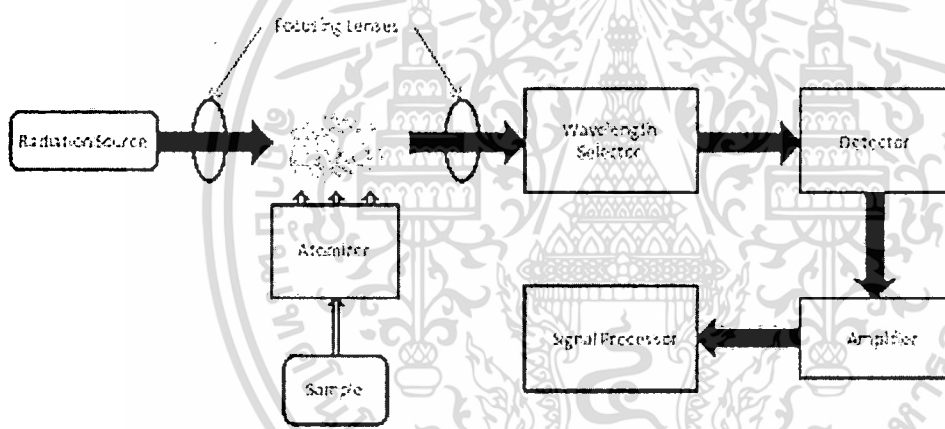
การพาเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของสารละลายและแรงทางกลศาสตร์ เช่น การใช้แท่งแม่เหล็กกวานสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การคนสารละลาย การเขย่าสารละลาย หรือ การทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีการเคลื่อนที่ หรือ ให้มีการเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ หรือ ให้มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดทั้งหมดนี้ ทำให้ไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วอิเล็กโทรดได้เร็วขึ้น สิ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วทั้ง 3 แบบ คือ อุณหภูมิ ความหนาแน่นของสารละลายและความแรงของไอออน

## ภาคผนวก จ

### อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)

การดูดกลืนแสงของอะตอม เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะในตัวอย่างต่างๆ เช่น วิเคราะห์หาปริมาณโลหะตะกั่วที่เจือปนอยู่ในหม้อก๋วยเตี๋ยว วิเคราะห์หาปริมาณเงินหรือทองคำที่เจืออยู่ในสินแร่ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคนี้สามารถใช้วิเคราะห์หาปริมาณโลหะได้มากถึง 70 ธาตุด้วยกัน ระดับความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้อยู่ในระดับ ppm (part per million, หนึ่งในล้านส่วน)

**หลักการ** อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอม เมื่อได้รับพลังงานจะดูดกลืนพลังงาน และเปลี่ยนวงโคจร ไปอยู่ในวงโคจรใหม่ที่ระดับพลังงานสูงชันกว่าเดิมเพียงชั่วครู่เท่านั้น ซึ่งพลังงานที่ให้กับอะตอมจะใช้พลังงานแสงที่มีความจำเพาะกับธาตุแต่ละชนิด โดยค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของโลหะ เมื่อโลหะมีความเข้มข้นมากจะดูดกลืนพลังงานแสงได้มาก ในทางตรงข้ามหากโลหะมีปริมาณน้อยก็จะดูดกลืนพลังงานแสงได้น้อย เป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบอร์ต (Beer-Lambert law)



ภาพที่ จ.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่อง  
Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

ในการวิเคราะห์จะต้องเปลี่ยนรูปของโลหะที่ปนอยู่ในสารละลายตัวอย่าง ให้กลายเป็นอะตอม โดยใช้พลังงานจากเปลวไฟด้วยส่วนสร้างอะตอม (atomizer) อะตอมที่เกิดขึ้นจะดูดกลืนพลังงานแสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสง (radiation source) หลังจากนั้นแสงที่ผ่านการดูดกลืนแล้วจะถูกเลือกเฉพาะความยาวคลื่นที่จำเพาะกับธาตุแต่ละชนิด และถูกตรวจวัดด้วยดีเทคเตอร์ (detector) เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นเข้าไปที่หน่วยขยายสัญญาณ (amplifier) สิ้นสุดกระบวนการด้วย การประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ (signal processor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

## กฎของฟาราเดย์

กฎการแยกสารด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์ กล่าวไว้ว่า "ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าในเซลล์ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงสมมูลของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์นั้น" ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$Q = F \times \text{No. equivalents} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Q = ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ถูกพาเข้าสู่เซลล์ มีหน่วยเป็น C

F = เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ 96,485 คูลอมบ์ (C) หรือ  $6.022 \times 10^{23}$

อิเล็กตรอน

เมื่อการไหลของกระแส (i) คงที่ที่ 1 แอมแปร์ (A) ในเวลา (t) 1 วินาที (s) จะได้ว่า

$$Q = i \times t \quad \dots\dots\dots (2)$$

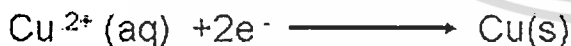
จาก (1) และ (2) จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$F \times \text{No. equivalents} = i \times t$$

$$F \times n \left\{ \frac{m(g)}{MW} \right\} = Q$$

$$\text{Mole} = \frac{Q}{nF}$$

เมื่อ n คือ จำนวนโมลของอิเล็กตรอน เช่น



n = 2 โมลของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) = 0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพีเอช, ศักย์ไฟฟ้า และผลรวมของพีเอชกับศักย์ไฟฟ้า

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบ 2 ทาง คือ จำแนกตามศักย์ไฟฟ้า และจำแนกตามพีเอช โดยวิเคราะห์จาก %ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงด้วยการวัดซ้ำ

SUMMARY	พีเอช 1	พีเอช 2	Total				
ศักย์ไฟฟ้า3โวลต์							
Count	3	3	6				
Sum	281.87	254.68	536.55				
Average	93.956667	84.89333	89.425				
Variance	3.2421333	4.106133	27.58251				
ศักย์ไฟฟ้า5โวลต์							
Count	3	3	6				
Sum	280.6	278.12	558.72				
Average	93.533333	92.70667	93.12				
Variance	7.7120333	0.886533	3.64444				
Total							
Count	6	6					
Sum	562.47	532.8					
Average	93.745	88.8					
Variance	4.43543	20.31152					
ANOVA							
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit	
Sample	40.959075	1	40.959075	10.27390809	0.012512431	5.317655063	
Columns	73.359075	1	73.359075	18.40091345	0.002652702	5.317655063	
Interaction	50.882008	1	50.8820083	12.76291218	0.007266939	5.317655063	
Within	31.893667	8	3.98670833				
Total	197.09383	11					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก ตารางที่ ข.1 เมื่อใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) = 0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % สรุปได้ว่า

- ผลของศักย์ไฟฟ้า: พบว่าแต่ละค่าของศักย์ไฟฟ้า(3, 5 โวลต์) ทำให้เกิดผลในการกำจัดของแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.012512 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลของพีเอช: พบว่าแต่ละค่าของพีเอช (1,2) ทำให้เกิดผลในการกำจัดของแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.02653 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าและพีเอช: พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.007267 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05

ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบ 2 ทาง คือ จำแนกตามศักย์ไฟฟ้า และ จำแนกตามพีเอช โดยวิเคราะห์จาก อัตราการลดลงของของแดงด้วยการวัดซ้ำ (กรัม/ชั่วโมง)

SUMMARY	พีเอช 1	พีเอช 2	Total				
<b>ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์</b>							
Count	3	3	6				
Sum	3.77	3.39	7.16				
Average	1.256666667	1.13	1.193333				
Variance	0.000633333	0.0007	0.005347				
<b>ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์</b>							
Count	3	3	6				
Sum	3.75	3.71	7.46				
Average	1.25	1.236666667	1.243333				
Variance	0.0016	0.000133333	0.000747				
<b>Total</b>							
Count	6	6					
Sum	7.52	7.1					
Average	1.253333333	1.183333333					
Variance	0.000906667	0.003746667					
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	
ศักย์ไฟฟ้า	0.0075	1	0.0075	9.782609	0.014064	5.317655	
พีเอช	0.0147	1	0.0147	19.17391	0.002353	5.317655	
Interaction	0.009633333	1	0.009633	12.56522	0.007567	5.317655	
Within	0.006133333	8	0.000767				
Total	0.037966667	11					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก ตารางที่ ข.2 เมื่อใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) = 0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % สรุปได้ว่า

- ผลของศักย์ไฟฟ้า: พบว่าแต่ละค่าของศักย์ไฟฟ้า(3, 5 โวลต์) ทำให้อัตราการลดลงของทองแดงไอออนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.014064 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลของพีเอช: พบว่าแต่ละค่าของพีเอช (1,2) ทำให้เกิดผลในการกำจัดทองแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.002353 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าและพีเอช: พบว่าศักย์ไฟฟ้าและพีเอชมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ในการกำจัดทองแดงเนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.007567 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบ 2 ทาง คือ จำแนกตามศักย์ไฟฟ้า และ จำแนกตามพีเอช โดยวิเคราะห์จาก % การกลับคืนไอออนของทองแดง

SUMMARY	พีเอช 1	พีเอช 2	Total
<i>ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์</i>			
Count	3	3	6
Sum	272.91	233.53	506.44
Average	90.97	77.84333333	84.40667
Variance	0.7741	0.885233333	52.35655
<i>ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์</i>			
Count	3	3	6
Sum	257.28	252.38	509.66
Average	85.76	84.12666667	84.94333
Variance	4.1628	3.087033333	3.700267
<i>Total</i>			
Count	6	6	
Sum	530.19	485.91	
Average	88.365	80.985	
Variance	10.11799	13.43299	

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
ศักย์ไฟฟ้า	0.864033333	1	0.864033333	0.387930035	0.55072721	5.317655063
พีเอช	163.3932	1	163.3932	73.35958844	2.66332E-05	5.317655063
Interaction	99.07253333	1	99.07253333	44.48116734	0.000157606	5.317655063
Within	17.8183333	8	2.227292			
Total	281.1481	11				

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ ข.3 เมื่อใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 2 ตัวประกอบ (Two-Factor ANOVA) ทุกค่าสถิติมีระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) = 0.05 หรือมีความเชื่อมั่น 95 % สรุปได้ว่า

- ผลของศักย์ไฟฟ้า: พบว่าแต่ละค่าของศักย์ไฟฟ้า(3, 5 โวลต์) ทำให้% การกลับคืนของทองแดงไอออนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.55072721 มีค่ามากกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลของพีเอช: พบว่าแต่ละค่าของพีเอช (1,2) ทำให้เกิดผลในการกำจัดทองแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 2.66332E-05 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05
- ผลร่วมของศักย์ไฟฟ้าและพีเอช: พบว่าศักย์ไฟฟ้าและพีเอชมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ในการกำจัดทองแดงเนื่องจากค่าความน่าจะเป็น P-value คือ 0.000157606 มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha$ ที่ผู้ทดสอบกำหนด คือ 0.05



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้