สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การนำทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่โดยการชะด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค

RECOVERY OF COPPER FROM ELECTROPLATING SLUDGE USING ULTRASONICALLY ENHANCED SULFURIC ACID LEACHING

T117298

ปัทมาพร มณีจันทร์

พรรณิภา สมจิตต์

ภูวดล ทิพย์ปราณี

2553
เลขหมู่ 117298
เลขทะเบียน
วัน เดือน ปี 20 ก.ค. 2554
b 12338429
i

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RECOVERY OF COPPER FROM ELECTROPLATING SLUDGE USING ULTRASONICALLY ENHANCED SULFURIC ACID LEACHING

PATTAMABHORN MANEEJAN

PHANNIPHA SOMCHIT

PUWADOL TIPPRANEE

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การนำทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่โดยการชะด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค Recovery of Copper from Electroplating Sludge using Ultrasonically Enhanced Sulfuric Acid Leaching		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปัทมาพร	มณีจันทร์	รหัส 50050466
	นางสาวพรรณิภา	สมจิตต์	รหัส 50050471
	นายภูวดล	ทิพย์ปราณี	รหัส 50050482
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	
ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	
ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การนำทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่โดยการชะด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปัทมาพร	มณีจันทร์	รหัส 50050466
	นางสาวพรรณิภา	สมจิตต์	รหัส 50050471
	นายภูวดล	ทิพย์ปราณี	รหัส 50050482
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม		
ปีการศึกษา	2553		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน		

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ทำการศึกษาการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค เพื่อนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งการทดลองนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์ 2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก, สัดส่วนของสลัดจ์ต่อปริมาณกรด, เวลาที่ใช้ในการชะทองแดงโดยใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค และ 3) ศึกษาประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้สภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรมิเตอร์พบว่า สลัดจ์ประกอบด้วย CuO มากสุดถึง 33.65 % และ Fe_2O_3 11.00 % และผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของทองแดงเท่ากับ 750.67 กรัมต่อกิโลกรัม สภาวะที่ใช้ในการชะทองแดงในการทดลองคือ ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.06 โมลต่อลิตร สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 33.33 กรัมต่อลิตร สกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคที่กำลัง 600 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ประสิทธิภาพในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 60.62 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : ทองแดง, สลัดจ์จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า, สารละลายกรดซัลฟิวริก, อัลตร้าโซนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Recovery of Copper from Electroplating Sludge using Ultrasonically Enhanced Sulfuric Acid Leaching		
Students	Miss Pattamabhorn	Maneejan	Student ID.50050466
	Miss Phannipha	Somchit	Student ID.50050471
	Mr. Puwadol	Tippranee	Student ID.50050482
Degree	Bachelor of Science		
Major Program	Environmental Resource Chemistry		
Academic Year	2010		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon		

ABSTRACT

This special project studies copper recovery from electroplating sludge using ultrasonically enhanced sulfuric acid leaching. The experiments were divided into 3 steps: 1) study the physical and chemical properties of sludge 2) determine the optimum conditions for leaching copper from the sludge. Parameters used in this study were concentration of sulfuric acid, sludge weight to acid volume ratio, leaching time and 3) study the efficiency of copper recovery from electroplating sludge under optimum conditions of leaching. The results analyzed by X-ray fluorescent spectrometer showed that the sludge contained CuO 33.65% and Fe_2O_3 11.00%. 750.67 g/kg of total copper were determind by Atomic Absorption Spectrophotometer. The optimum conditions for leaching copper were sulfuric acid concentration of 1.06 mol/L, ratio of sludge weight to sulfuric acid volume of 33.33 g/L extracted under ultrasonicating at 600 watts for 10 minutes. It's was found that the efficiency of copper recovery was 60.62%

Keywords : Copper, Electroplating sludge, Sulfuric acid, Ultrasonic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากกลุ่มผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้โครงงานพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านคำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับโครงงานพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณนภา อาจารย์ประจำสาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ข้อแนะนำใน การคำนวณทางสถิติ และสาขาวิชาสถิติ ที่อนุเคราะห์โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

ขอขอบคุณ คุณสิงห์ สิงหเตโช บริษัท ดาร์โก้ พีซีบี จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างสลัดจ์ และข้อมูลเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสีย

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการบดตัวอย่างสลัดจ์สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF)

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำโครงงานพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้กลุ่มผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเรื่อยมา ทำให้กลุ่มของผู้วิจัยสามารถทำโครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งเพื่อนที่ร่วมสาขาเดียวกัน และต่างสาขา ที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจตลอดการทำโครงงานพิเศษ คุณค่าและประโยชน์อันบังเกิดจากโครงงานพิเศษฉบับนี้ กลุ่มผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นางสาว ปัทมาพร มณีจันทร์

นางสาว พรรณิภา สมจิตต์

นาย ภูวดล ทิพย์ปราณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

คำย่อและสัญลักษณ์.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

2.1 แผงวงจรพิมพ์.....4

2.1.1 กระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์.....4

2.1.2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า.....7

2.1.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์.....7

2.1.4 การตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์.....9

2.2 ทองแดง.....11

2.2.1 ความเป็นพิษ.....12

2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....12

2.2.3 การใช้ประโยชน์ทองแดง.....13

2.3 กระบวนการชะโลหะหนักออกจากตะกอน.....13

2.3.1 การชะโลหะหนักโดยกระบวนการทางชีวภาพ.....13

2.3.2 การชะโลหะหนักโดยกระบวนการทางเคมี.....14

2.4 กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดโลหะหนักออกจากตะกอน.....15

2.4.1 การสกัดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค.....15

2.4.2 การสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Extraction).....16

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....19
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....19
3.1.1 อุปกรณ์.....19
3.1.2 สารเคมี.....20
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....20
3.2.1 แหล่งที่มาของสลัดจ์.....20
3.2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของสลัดจ์.....20
3.2.2.1 วิธีการเตรียมสลัดจ์.....20
3.2.2.2 การศึกษาสมบัติของสลัดจ์.....21
3.2.3 การศึกษาการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้
สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค.....21
3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์
ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค.....22
3.2.4.1 การศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม
ในการชะทองแดง.....22
3.2.4.2 การศึกษาสัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม
ในการชะทองแดง.....22
3.2.4.3 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของการสกัดด้วย
เครื่องอัลตร้าโซนิคในการชะทองแดง.....23
3.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการชะทองแดง.....24
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....25
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสลัดจ์.....25
4.2 การชะทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก
ร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค.....26
4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์
ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค.....27
4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม.....28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 ผลของสัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม.....29
4.3.3 ผลของเวลาในการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคที่เหมาะสม.....30
4.4 ประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้สภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค.....31
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....33
เอกสารอ้างอิง.....34
ภาคผนวก ก ข้อมูลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์.....37
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้วิธีอัลตร้าโซนิค.....42
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ความแตกต่างระหว่างการใช้สารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....9

2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะทองแดง.....11

2.3 ศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดของทองแดง.....13

3.1 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสลัดจ์.....21

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสลัดจ์.....25

ก-1.1 อนินทรีย์วัตถุในตัวอย่างสลัดจ์.....38

ก-1.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชของตัวอย่างสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....39

ก-1.3 ผลการศึกษาค่าความชื้นของตัวอย่างสลัดจ์จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....39

ก-2 ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในสลัดจ์ตัวอย่าง.....40

ก-3 ความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดในสลัดจ์ตัวอย่าง.....41

ข-1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่ชะได้จากสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง.....43

ข-1.2 ค่า Q ที่ระดับความเชื่อมั่นต่างๆ.....45

ข-2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่สกัดได้จากสลัดจ์
โดยแปรค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเป็น 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 โมลต่อลิตร.....46

ข-2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงได้จากการชะสลัดจ์
โดยแปรค่าปริมาณของกรดซัลฟิวริกเป็น 1, 3, 5, 7 และ 10 มิลลิลิตร.....48

ข-2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่ได้จากการชะสลัดจ์
โดยแปรค่าเวลาที่ใช้ในการสกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค 5, 10 และ 15 นาที.....49

ข-3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่ได้จากการชะสลัดจ์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม.....51

ข-3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่ได้จากการชะสลัดจ์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม.....52

ข-3.3 ผลของประสิทธิภาพในการชะทองแดงและเหล็กจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....54

ค-1 การวิเคราะห์ANOVA.....56

ค.-2.1การวิเคราะห์ ANOVA.....56

ค-2.2 การทดสอบ Duncan.....57

ค-2.3 การแปรผล Duncan.....57

ค-3 การวิเคราะห์ ANOVA.....58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แผงวงจรพิมพ์....4
2.2 ขั้นตอนการผลิตแผงวงจรพิมพ์....6
2.3 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์....8
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและ
ความสามารถในการละลายของโลหะหนักต่าง ๆ....15
4.1 เปอร์เซ็นต์ของสารประกอบต่าง ๆ ในสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF....26
4.2 ความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการชะด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้
เครื่องอัลตร้าโซนิคเปรียบเทียบกับการชะด้วยน้ำปราศจากไอออน....27
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการชะ
กับความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่แตกต่างกัน....28
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการชะ
กับปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่แตกต่างกัน....30
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการชะ
กับเวลาในการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค....31
4.6 ปริมาณทองแดงและเหล็กที่ชะได้จากการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับ
การใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคในสภาวะที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับปริมาณทองแดง
และเหล็กทั้งหมด....32
ก-2 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง....40
ก-3 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก....41
ข-1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง....43
ข-2.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง....46
ข-2.3 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง....49
ข-3.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง....51
ข-3.2 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก....52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	สัญลักษณ์
PCB	Printed Circuit Board
XRF	X-Ray Fluorescence
AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
N	จำนวนตัวอย่าง
S.D.	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
pH	ค่าพีเอช
°C	องศาเซสเซียส
R^2	สัมประสิทธิสหสัมพันธ์
Avg	ค่าเฉลี่ย
M	โมลต่อลิตร
g/kg dry weight sludge	กรัมต่อกิโลกรัมของสลัดจ์แห้ง
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
Cu	ทองแดง
Fe	เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นับเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่สำคัญของไทย จากรายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมรายไตรมาสของไตรมาสที่ 2 ปี พ.ศ. 2553 พบว่าสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ติดอันดับสินค้าส่งออก 10 อันดับแรกของไทย โดยอันดับหนึ่งคือ เครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ และอันดับสี่คือ แผงวงจรไฟฟ้า (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2553) ซึ่งแผงวงจรไฟฟ้า หรือแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (printed circuit board; PCB) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ในกระบวนการผลิตแผ่น PCB จะมีการนำทองแดงซึ่งเป็นโลหะหนักมาใช้ในการเคลือบแผ่น PCB เพื่อใช้เชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในแผ่น ส่วนทองแดงที่นอกเหนือจากลายเส้นจะถูกชะออกไปด้วยวิธีการทางเคมี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) ทำให้เกิดการปนเปื้อนของทองแดงและโลหะอื่นๆในน้ำเสียเป็นจำนวนมาก มีรายงานพบว่า น้ำเสียและตะกอนที่ปล่อยออกมาจากโรงงานผลิตแผงวงจรพิมพ์มีการปล่อยโลหะหนักที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี (กรีนพีซ, 2550) โดยทั่วไป นิยมบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยด่าง เพื่อลดการปนเปื้อนของโลหะหนักก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม (Li *et al.*, 2010) ทำให้เกิดสลัดจ์ที่มีทองแดงและโลหะหนักต่าง ๆ ปนอยู่ ซึ่งจัดเป็นของเสียอันตรายที่ต้องผ่านการบำบัดอย่างถูกวิธี (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) เพราะถ้าหากไม่มีการจัดการอย่างถูกวิธี จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

การนำโลหะหนักจากสลัดจ์ที่เกิดจากการตกตะกอนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียมาใช้ประโยชน์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการจัดการสลัดจ์ที่เป็นของเสียอันตราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทองแดงซึ่งถือว่าเป็นโลหะที่มีค่า ถ้านำกลับมาใช้ใหม่ได้จะเป็นการลดต้นทุนในการผลิต ลดค่าใช้จ่ายในด้านการจัดการของเสีย และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ได้ การสกัดโลหะหนักจากสลัดจ์ได้รับความสนใจและมีผู้ศึกษาวิธีการต่าง ๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Silva *et al.*, 2005; De Souza e Silva *et al.*, 2006) การสกัดด้วยไฟฟ้า (Veglio *et al.*, 2003) การแยกด้วยเมมเบรน (Chaudry *et al.*, 1997) และการแยกด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน (De Villiers *et al.*, 1995) อย่างไรก็ตาม พบว่าวิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัดหลายอย่างสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ไม่ว่าจะเป็นการดำเนินงานที่มีค่าใช้จ่ายสูง เครื่องมือและวิธีการที่ยุ่งยาก (Xie *et al.*, 2009) จึงได้มีการศึกษาหาวิธีการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้กรดซัลฟิวริกในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิคเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการชะ เนื่องจากกรดมีคุณสมบัติในการชะโลหะหนัก มีราคาถูก อีกทั้งยังหาได้ง่าย (Xie *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010)

โครงงานพิเศษนี้ ศึกษาการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยใช้กรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก, สัดส่วนของสลัดจ์ต่อปริมาณกรด และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด เพื่อนำสภาวะเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหาองค์ประกอบของธาตุในสลัดจ์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโตร-มิเตอร์ (XRF) และวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในสลัดจ์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตร-โฟโตมิเตอร์ (AAS)
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิคที่กำลัง 600 วัตต์

2.1 ศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการชะทองแดงจากสลัดจ์ โดยแปรค่าความเข้มข้นเป็น 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 โมลต่อลิตร

2.2 ศึกษาสัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการชะทองแดงจากสลัดจ์ โดยแปรค่าเป็น 10, 14, 20, 33 และ 100 กรัมต่อลิตร

2.3 ศึกษาเวลาในการชะทองแดงโดยใช้อัลตร้าโซนิค โดยแปรค่าเวลาเป็น 5, 10 และ 15 นาที

3. ศึกษาประสิทธิภาพในการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค โดยใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากข้อ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.ได้ทองแดงในรูปของสารละลายที่สกัดได้จากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ทำให้ลดต้นทุนการผลิตและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

2.ได้สภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค

3. ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดสลัดจ์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

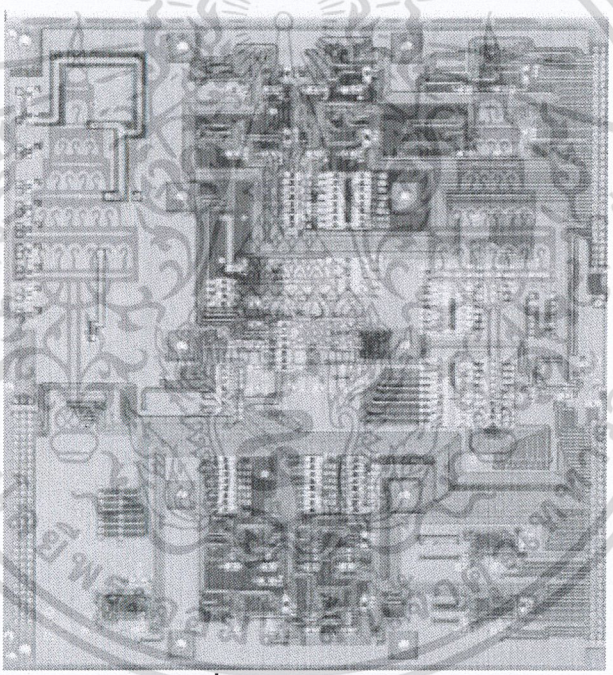
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผงวงจรพิมพ์

2.1.1 กระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์

แผงวงจรพิมพ์ (Printed circuit boards, PCBs) เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ใช้สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ บนบอร์ดพลาสติกที่เรียกว่า Thin Fiber Epoxy ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยแผงวงจรพิมพ์จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ รวมทั้งเครื่องไฟฟ้าภายในบ้าน เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แผงวงจรพิมพ์

(http://board.china-direct-buy.com/v/4/product_detail/4915721/Multi-Layer_pcb.html)

แผงวงจรพิมพ์สามารถจำแนกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

(http://www.kmitl.ac.th/~kbittibh/home2/BOOKS/Packaging/CHVI.pdf)

1. Single-sided boards แบบที่มีลายวงจรเพียงหน้าเดียว
2. Double-sided boards แผงวงจรพิมพ์ชนิดลายวงจรสองด้าน
3. Multi-layer boards แผงวงจรพิมพ์หลายชั้น
4. Flexible circuit PCB แผงวงจรชนิดอ่อน เป็นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานเฉพาะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำอาร์ตเวิร์คด้วยคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่า Electronic Computer Aided Design จะได้ไฟล์ เพื่อใช้ทำ PCB

2. นำแผ่น PCB เปล่าชนิดสองหน้ามาเจาะรูด้วยเครื่องเจาะอัตโนมัติ แล้วนำไปล้างทำความสะอาด

3. นำแผ่น PCB ที่เจาะรูและทำความสะอาดแล้ว มาชุบทองแดงด้วยวิธีทางเคมี ได้เป็นชั้นทองแดงบางๆ เคลือบไว้ จากนั้นชุบทองแดงด้วยไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อเพิ่มความหนาของชั้นทองแดงที่เคลือบ

4. แผ่น PCB ที่ชุบทองแดงแล้ว รีดประกบด้วยแผ่นฟิล์มไวแสง

5. นำแผ่นอาร์ตเวิร์คมาประกบแผ่น PCB ทั้งสองด้านให้ตรงกับรูที่เจาะไว้ ทำการอัดแสงโดยถ่ายผ่านด้วยแสงอัลตร้าไวโอเลตในระยะเวลาที่กำหนด

6. นำแผ่น PCB ที่ได้จากการอัดแสง มาผ่านกระบวนการ Developing ซึ่งจะใช้น้ำยาเคมีทำให้เนื้อฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสงหลุดออกไป จะได้ PCB ที่มีฟิล์มจะปรากฏลาย แต่ลายนี้จะกลับตรงข้ามกัน โดยด้านที่ไม่ต้องการจะถูกหุ้มด้วยฟิล์ม ส่วนด้านที่ต้องการจะไม่มีฟิล์มและเห็นเป็นทองแดง

7. นำ PCB ที่มีลายฟิล์มเคลือบอยู่มาชุบดีบุกด้วยไฟฟ้า ซึ่งดีบุกก็จะติดเข้ากับส่วนที่นำไฟฟ้า

8. ล้างชั้นของฟิล์มที่ยังเหลืออยู่ออก จะได้แผ่น PCB ที่มีเส้นดีบุกเคลือบอยู่ โดยส่วนที่ไม่ต้องการจะเป็นทองแดงอย่างเดิม ทำการกัดทองแดงด้วยวิธีการทางเคมี

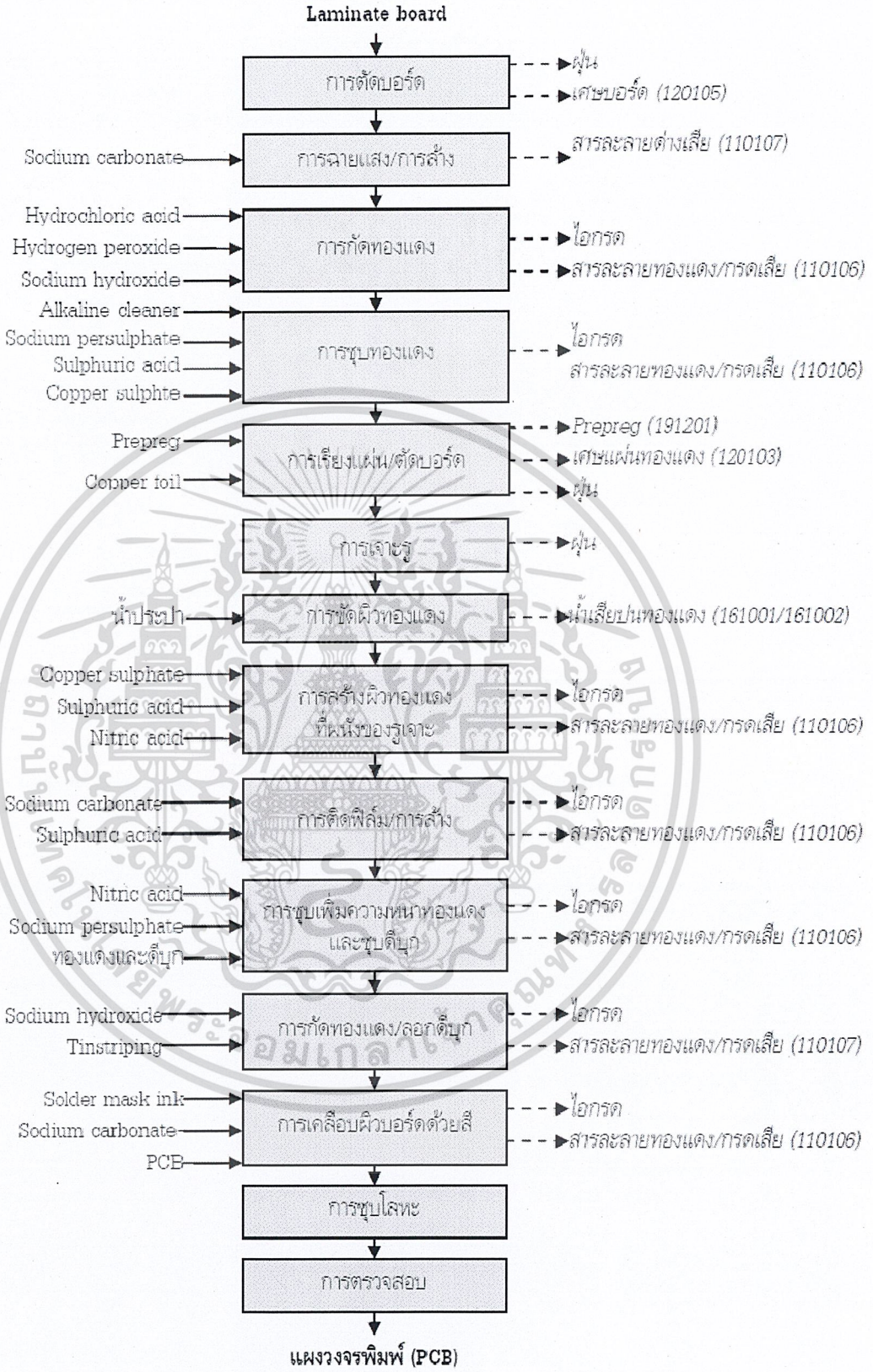
9. อบแผ่น PCB ด้วยไอน้ำมันร้อน

10. ทำการพิมพ์ซิลสกรีน PCB ด้วยสีพิเศษที่มีคุณสมบัติทนความร้อน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของไฟฟ้า

11. ขั้นตอนสุดท้ายที่สำคัญ คือ การตรวจสอบความบกพร่องของ PCB

ซึ่งขั้นตอนการผลิตแผงวงจรพิมพ์สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรรม, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์

กระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ จะเกิดน้ำเสียในขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

1. กระบวนการเตรียมชิ้นงาน น้ำเสียที่เกิดจากการล้างชิ้นงาน เป็นน้ำเสียที่เจือจาง

2. กระบวนการทำลวดลายทองแดง

3. การล้างชั้นฟิล์มออกจากชิ้นงาน ซึ่งล้างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

4. การล้างชิ้นงานหลังจากล้างชั้นฟิล์มออก

5. กระบวนการกัดเนื้อทองแดงที่ไม่ต้องการ ซึ่งมีทั้งสารเคมีที่เป็นด่าง (Ammonical/alkaline solution) หรือมีคุณสมบัติเป็นกรด H_2SO_4/H_2O_2 หรือ $CuCl_2/HCl$ โดยน้ำเสียที่ได้มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก

6. การล้างชิ้นงานที่ผ่านการกัดทองแดง

7. กระบวนการชุบแบบไฟฟ้าและไม่ใช้ไฟฟ้า ในการกระบวนการชุบแบบใช้ไฟฟ้า อาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยสารละลาย $CuSO_4/H_2SO_4$ ซึ่งเมื่อหมดอายุการใช้งาน น้ำเสียที่ได้จะมีสมบัติเป็นกรด และมีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก ในกระบวนการทางเคมีซึ่งประกอบด้วย $CuSO_4/CH_2O/NaOH$

8. น้ำเสียที่เกิดจากการล้างชิ้นงานจากกระบวนการต่างๆ จะมีความเข้มข้นของโลหะต่ำกว่าแต่จะมีปริมาตรมาก ส่วนใหญ่จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ โดยอาศัยเทคนิคการแยกทองแดงและโลหะอื่นออกจากน้ำเสีย วิธีที่นิยมใช้ คือ Ion exchange resin ส่วนน้ำเสียที่เกิดจากสารเคมีในกระบวนการกัด และการชุบที่หมดอายุซึ่งมีความเข้มข้นของสารเคมีมากกว่าน้ำเสียจากกระบวนการล้างและมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของสารเคมีที่ใช้ โดยน้ำเสียที่มี Cheating agent ปะปนก็จะแยกไปบำบัด ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ต่อไป

2.1.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์

มีขั้นตอนการบำบัด (Coombs, 1990) ดังนี้

1. น้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกรวบรวม และส่งไปบ่อรวมน้ำเสีย เมื่อทำการรวบรวมน้ำเสียแล้วจะมีการปรับสภาพน้ำเสียที่มีคุณสมบัติค่อนข้างคงที่ น้ำเสียที่อยู่ในถังนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์จำพวก Photosensitive organic monomer โลหะต่าง ๆ และ Chelating agent ในถังปรับสภาพนี้ จะมีความเข้มข้นของน้ำเสียสูงสุด

2. เมื่อผ่านถังปรับสภาพ น้ำเสียจะผ่านไปสู่ถังปรับค่าพีเอชด้วยกรด H_2SO_4 ให้มีค่าประมาณ 2–4

3. น้ำเสียที่ผ่านการปรับค่าพีเอชแล้วจะถูกส่งไปยังถังเติม $FeSO_4 \cdot 3H_2O$ เพื่อตกตะกอน Chelating agent ต่างๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย และมีการเติมอากาศ หลังจากการเติม $FeSO_4 \cdot 3H_2O$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว น้ำเสียจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอน $Fe(OH)_3$ ออกไป โดยปล่อยให้ไหลล้นออกจากถังไปเข้าสู่ถังเติมด่าง

4. ถังเติมด่างเป็นถังสำหรับตกตะกอนโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย โดยในถังนี้จะควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียระหว่าง 9 – 10.5 ด้วยการเติมปูนขาว หลังจากค่าพีเอชคงที่แล้ว โลหะที่ปะปนในน้ำเสียจะตกตะกอนอยู่ในของแข็งแขวนลอย

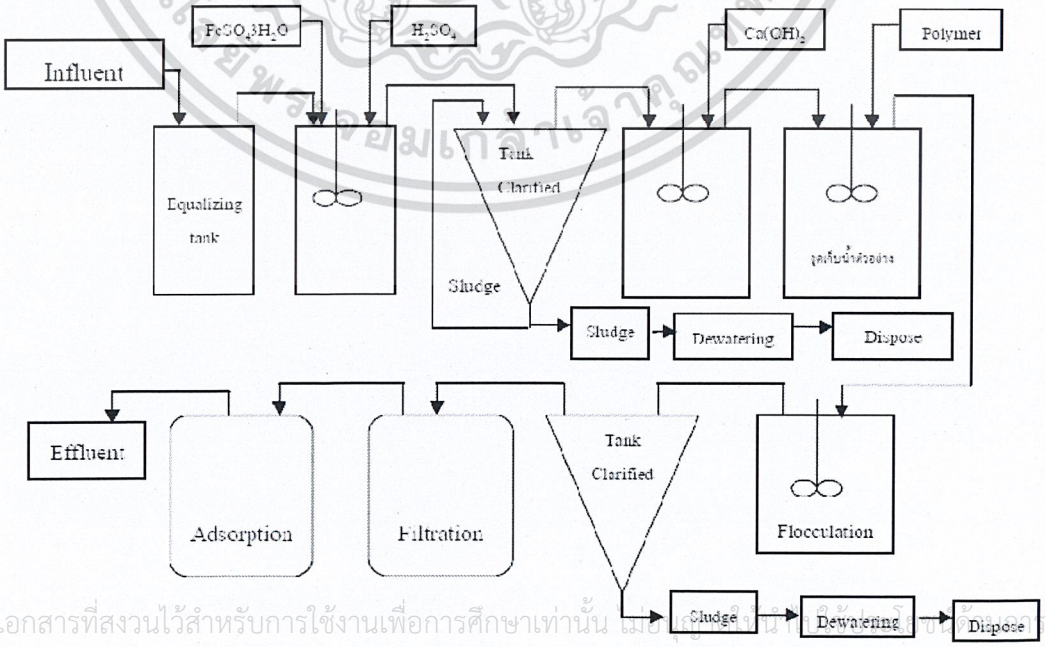
5. น้ำเสียที่มีตะกอนไฮดรอกไซด์แขวนลอยอยู่ จะถูกส่งไปยังถังเติมพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มขนาดของตะกอนสำหรับจับตะกอนของไฮดรอกไซด์ โดยกระบวนการ Flocculation ซึ่งมีทั้งถังกวนเร็วและกวนช้า ทิ้งไว้ให้ตะกอนจมตัวลงในถัง Thickener

6. หลังจากที่ตะกอนจมตัวลงแล้ว จะเกิดการแยกชั้นของน้ำใสและตะกอนจะตกอยู่ที่ก้นถัง น้ำส่วนในที่ด้านบนจะไหลล้นไปสู่ถังกรอง

7. ถังกรองทำหน้าที่กรองของแข็งที่ยังแขวนลอยปะปนอยู่กับน้ำเสีย ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ถังถ่านกัมมันต์ เพื่อกำจัดโลหะที่ยังหลงเหลืออยู่ในสภาพไอออนต่อไป

8. ถังถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่กำจัดโลหะที่ยังอาจปะปนอยู่ในน้ำเสียอยู่ด้วยกระบวนการดูดซับที่ผิว (adsorption) เมื่อน้ำเสียที่ผ่านออกจากถังถ่านกัมมันต์นี้ จะถูกตรวจสอบก่อนที่จะปล่อยออกไปสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

9. ตะกอนในข้อ 6 จะผ่านเครื่องรีดน้ำเพื่อกำจัดน้ำออก จะได้ตะกอนที่มีโลหะปนเปื้อน โดยทั่วไปจะถูกส่งไปกำจัดที่ศูนย์บริการกำจัดกาก แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร จากกระบวนการบำบัดข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียได้ ดังรูปที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ (Coombs, 1990)

2.1.4 การตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์

เป็นการทำให้สิ่งสกปรกที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งอยู่ในสภาวะอนุภาคบวกตกตะกอนออกมาในรูปเกลือไฮดรอกไซด์ โดยวิธีการ คือ การปรับพีเอชให้สูงขึ้น (สูงกว่า 7) สารเคมีที่นิยมใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาว) ความแตกต่างระหว่างการใช้สารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ชื่อสารเคมี	ข้อดี	ข้อเสีย
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	1.ราคาถูก	1. การเตรียมสารยุ่งยากกว่า 2. ค่าใช้จ่ายในการป้อนสารเคมีสูงกว่า 3. ถ้าน้ำเสียมีปริมาณซัลเฟตสูงเกิดตะกอน
โซเดียมไฮดรอกไซด์	1.ทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า 2. การนำมาใช้งานสะดวกกว่า 3. เกิดตะกอนน้อย	1. ราคาแพง 2. เสียค่าใช้จ่ายในการทำตะกอนแห้งมากกว่า 3. ตะกอนกลับมาละลายในน้ำได้อีก

ที่มา : http://www.human.cmu.ac.th/home//hc/ebook/006123/254903/006-alkaline.pdf

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการที่ 2.1 โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมี

$$M^{++} + Ca(OH)_2 \longrightarrow M(OH)_2 + Ca^{++} \qquad (2.1)$$

โดยที่ M^{++} คือ โลหะไอออน

ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ นิยมใช้กับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในรูปของไอออนหรือประจุ สิ่งที่ควรพิจารณา คือ สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียจะประกอบด้วยสิ่งสกปรกหลายชนิด และในแต่ละชนิดก็จะมีคุณลักษณะในการตกตะกอนที่สภาพความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่าง เช่น การปรับค่าพีเอชเป็น 10 เพื่อให้ทองแดงและแคดเมียมตกตะกอนออกมา เป็นต้น

การตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์สามารถอธิบายได้โดยการใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางเคมี โดยการตกตะกอนผลึกขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ทำให้ทราบพีเอชที่ใช้ในการตกตะกอน โดยประมาณ จากสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[M^{n+}][OH^-]^n = K_{sp} \quad (2.2)$$

โดยที่ K_{sp} แทนค่าความสามารถในการละลายของโลหะที่เกิดตะกอน

$[OH^-]$ แทนค่าโมลาริตีของไฮดรอกไซด์ไอออน

$[M^{n+}]$ แทนค่าโมลาริตีของโลหะไอออน ในหน่วยมิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อแทนค่า Log ลงไปในสมการที่ 2.2 จะได้สมการที่ 2.3

$$\log [M^n] + n \log [OH^-] = \log Ksp \quad (2.3)$$

จากคำจำกัดความของพีเอช จะได้สมการที่ 2.4-2.6

$$\log [OH^-] = pOH \quad (2.4)$$

$$\log [H^+] = pH \quad (2.5)$$

ที่อุณหภูมิ 20 °C

$$pH + pOH = 14 \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.3 เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.4 จะได้สมการที่ 2.7 หรือ 2.8

$$\log [M^n] + n\ pOH = \log K_{sp} \quad (2.7)$$

หรือ $$pOH = 1/n \log K_{sp} - 1/n \log [M^n] \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.7 ถ้าคำนวณในเทอมของพีเอชจะได้สมการที่ 2.9-2.11

$$\log [M^n] + n(14\text{-}pH) = \log K_{sp} \quad (2.9)$$

หรือ $$-pH = 1/n \log K_{sp} - 14 - 1/n \log [M^n] \quad (2.10)$$

$$pH = 14 + 1/n \log[M^n] - 1/n \log K_{sp} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.10 ถ้าทราบความสามารถในการแตกตัวของโลหะ $[M^+]$ และความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ จะสามารถทราบค่าพีเอชที่ใช้ในการตะกอนได้โดยประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีประโยชน์มากชนิดหนึ่งและเป็นโลหะที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ มีสีส้มแดง ทองแดงเป็นโลหะที่มีค่าอย่างมากในการนำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ สามารถพบได้ในรูปทองแดงอิสระและในรูปสารประกอบของซัลไฟด์ ออกไซด์ และคาร์บอเนต โดยทั่วไป ในธรรมชาติจะพบทองแดงในรูป Chalcopyrite ($CuFeS_2$), Bornites (Cu_2S), Cuprite (Cu_2O), Tenorite (CuO), Malachite ($Cu_2(CO_3)(OH)_2$), Azurite ($Cu_3(CO_3)(OH)_2$), Brochanite ($Cu_4(SO_4)(OH)_6$) และในดินพบประมาณ 20-30 มิลลิกรัมต่อลิตร (Graf *et al.*, 2007) ในดินตะกอนพบทองแดงประมาณ 57 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำผิวดินพบทองแดงประมาณ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

ทองแดงมีเลขอะตอม 29 เป็นธาตุแรกของหมู่ IB จัดเป็นโลหะทรานซิชัน น้ำหนักอะตอม 63.54 amu เลขออกซิเดชันสามัญ +1, +2 เป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดโลหะหนึ่งในรูปของโลหะอิสระ เพราะมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนดีเยี่ยม ทนต่อการผุกร่อน แข็งแรง ดึงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะทองแดง

โลหะทองแดง	คุณสมบัติทางฟิสิกส์
สี	แดงหรือส้ม
ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า	0.15328 โอห์มมิเตอร์ต่อกรัม ที่ 20 °C
ค่าการนำไฟฟ้า	60.0 เมตรต่อโอห์ม ตารางมิลลิเมตร
ค่าความแข็งแรง	35×10^3 นิวตันต่อตารางเมตร
จุดหลอมเหลว	1,083 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2,595 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	8.9592 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 °C
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	1.65×10^{-5} ที่ 20 °C
ค่าความร้อนจำเพาะของแข็ง	0.092 แคลอรีต่อกรัม ที่ 20 °C
ค่าความร้อนจำเพาะของเหลว	0.112 แคลอรีต่อกรัม ที่ 20 °C
ค่าความร้อนจำเพาะของการกลายเป็นไอ	0.08 แคลอรีต่อกรัม ที่ 20 °C
เลขไอโซโทป	^{63}Cu, ^{65}Cu
ค่าครึ่งชีวิต	12.8 ชั่วโมง

ที่มา : http://www.buzzle.com/articles/chemical-properties-of-copper.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ความเป็นพิษ

ทองแดงเป็นโลหะที่ร่างกายมนุษย์ต้องการในปริมาณเล็กน้อย (trace element) เช่น จำเป็นสำหรับกระบวนการเผาผลาญอาหาร (metabolism) ผู้ใหญ่ต้องการทองแดง 2 มิลลิกรัมต่อวัน และร่างกายของมนุษย์มีทองแดงอยู่ 100 – 150 มิลลิกรัม ซึ่งทองแดงมีความเข้มข้นสูงสุดที่ตับและกระดูก เลือดก็มีทองแดงอยู่ด้วย เนื่องจากการสร้างฮีโมโกลบินต้องอาศัยทองแดง ถึงแม้ฮีโมโกลบินจะไม่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ การสังเคราะห์เอนไซม์หลายชนิดต้องอาศัยทองแดงด้วย

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าทองแดงในปริมาณเล็กน้อยไม่เพียงแต่ไม่เป็นพิษ ยังเป็นสิ่งที่ร่างกายมนุษย์ต้องการ แต่ถ้ามีในปริมาณสูงก็จะให้โทษและเป็นพิษได้ เช่น $CuSO_4$ 27 กรัม ทำให้ตายได้ ถ้ารับประทานปริมาณน้อยกว่านี้จะเกิดอาการอาเจียน เหน็บชา และสำลัก ทองแดงเป็นธาตุจำเป็นสำหรับพืชด้วย เช่น จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์ของพืช (http://www.rmutphysics.com/CHARUD/naturemystery/sci3/periodic-table/Cu.html)

2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของไอออนแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่จะชิงอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าหรือถูกรีดิวซ์ได้แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการแบบรีดักชันได้ดังปฏิกิริยาที่ 2.12 (อินทิรา, 2539) ถ้าปฏิกิริยาใดมีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันสูง แสดงว่าสามารถชิงอิเล็กตรอนได้ดี

$$Cu^{2+}(aq) + 2\,e^{-} \longrightarrow Cu\,(s) \qquad (2.12)$$

ศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ใดๆ ที่สภาวะมาตรฐาน คือที่อุณหภูมิ 25 °C ความเข้มข้นของสารละลาย 1 โมล และความดัน 1 บรรยากาศ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์ ใช้สัญลักษณ์ E^{o} ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของครึ่งเซลล์

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ (E^{o}_{cell}) คือ ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันของสารที่ถูกรีดิวซ์และสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์ที่เป็นฝ่ายรับอิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายเป็นบวก และศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์ที่เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังสมการที่ 2.13

$$E^{o}_{cell} = E^{o}_{แคโทด} - E^{o}_{แอโนด} \qquad (2.13)$$

จากสมการ ถ้าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ (E^{o}_{cell}) มีค่ามากกว่า จะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (Cathod: ขั้วไฟฟ้าที่มีปฏิกิริยารีดักชัน) การใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของครึ่งเซลล์มีประโยชน์ในการศึกษาปฏิกิริยาเซลล์ไฟฟ้า เช่น บอกได้ว่าสารหรือไอออนใดเป็นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดซ์หรือเป็นตัวรีดิวซ์ได้ดีกว่ากัน และสามารถที่จะบอกได้ว่าปฏิกิริยานั้น สามารถเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ตามที่กำหนดในสมการเคมี ตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดของทองแดง (Standard electrode potentials)

ปฏิกิริยา	E^o (Volts)
$Cu(NH_3)_4^{2+} + 2\ e^- \leftrightarrows Cu + 4NH_3$	-0.05
$Cu^{2+} + e^- \leftrightarrows Cu^{1+}$	0.167
$2CuCl^- \leftrightarrows 2Cu + 2Cl^-$	0.19
$Cu^{2+} + 2\ e^- \leftrightarrows Cu$	0.3448
$Cu^{1+} + e^- \leftrightarrows Cu$	0.522
$Cu^{2+} + 2I^- + e^- \leftrightarrows CuI_2^-$	0.690
$Cu^{2+} + I^- + e^- \leftrightarrows CuI$	0.377

ที่มา : ชัยวัฒน์, 2536

2.2.3 การใช้ประโยชน์ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีประโยชน์มากที่สุดและใช้มากที่สุดโลหะหนึ่งรองจากเหล็กสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนี้

1. ใช้ทำเส้นลวดไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าและเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ
2. ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง
3. ใช้ในการผลิตหม้อต้มน้ำ กาน้ำ ถังน้ำ ท่อน้ำ และขดลวด กาต้มน้ำร้อน ฯลฯ
4. ใช้เคลือบผิวของโลหะ
5. ใช้ทำโลหะเจือ ทองเหลือง (brass) คือโลหะเจือของทองแดง (70 %) และสังกะสี (30 %) ทองสัมฤทธิ์ (bronze) เป็นโลหะเจือของทองแดง

2.3 กระบวนการชะโลหะหนักออกจากตะกอน

กระบวนการชะโลหะหนักออกจากตะกอนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ (จุฑามณีและคณะ, 2551) คือ

2.3.1 การชะโลหะหนักโดยกระบวนการทางชีวภาพ

เป็นกระบวนการชะละลายโลหะหนักโดยอาศัยกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่สร้างกรด ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นจะไปละลายโลหะออกจากตะกอนอีกทีหนึ่ง จุลินทรีย์ที่ใช้ ได้แก่ จุลินทรีย์ในตระกูล Thiobacillus เช่น *Thiobacillus thiooxidans* จัดอยู่ในจุลินทรีย์ที่สร้างอาหารเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้พลังงานจากปฏิกิริยาออกซิดันและรีดักชัน กระบวนการสร้างและสลายพลังงานมี 2 แบบ (Tchobnoglous *et al*., 2003) คือ

1. แบบทางตรง (Direct process) เป็นการเปลี่ยนโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายให้อยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์ที่ละลาย ดังปฏิกิริยาที่ 2.14

$$MS + 2\,O_2 \xrightarrow{\textit{T. ferrooxidans}} M^{2+} + SO_4^{2-} \qquad (2.14)$$

2. แบบทางอ้อม (Indirect process) ในขั้นแรกโลหะซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์ด้วย Fe^{3+} ดังปฏิกิริยาที่ 2.15

$$MS + 2\,Fe^{3+} \longrightarrow M^{2+} + 2\,Fe^{2+} + S^0 \qquad (2.15)$$

จากนั้นแบคทีเรียจะออกซิไดซ์ซัลเฟอร์และเหล็ก (Fe(II)) ดังปฏิกิริยาที่ 2.16 และ 2.17 จากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มต้นใหม่ในปฏิกิริยาที่ 2.16 และ 2.17 เป็นวงจรต่อเนื่อง

$$S^0 + 3/2\,O_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 \qquad (2.16)$$

$$2\,Fe^{2+} + 1/2\,O_2 + 2\,H^+ \longrightarrow 2Fe^{2+} + H_2O \qquad (2.17)$$

วิธีการนี้ จะเกิดกรดซัลฟิวริกในปฏิกิริยาที่ 2.16 ที่ทำให้ความเป็นกรดช่วยในการละลายของโลหะอีกทางหนึ่ง

2.3.2 การชะโลหะหนักโดยกระบวนการทางเคมี

เป็นกระบวนการชะละลายโลหะหนักด้วยสารเคมี ตัวทำละลายที่ใช้ คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4), กรดไนตริก (HNO_3), กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายไฮดรอกไซด์ เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของตะกอนโลหะ สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้และสามารถละลายโลหะได้ส่วนมาก

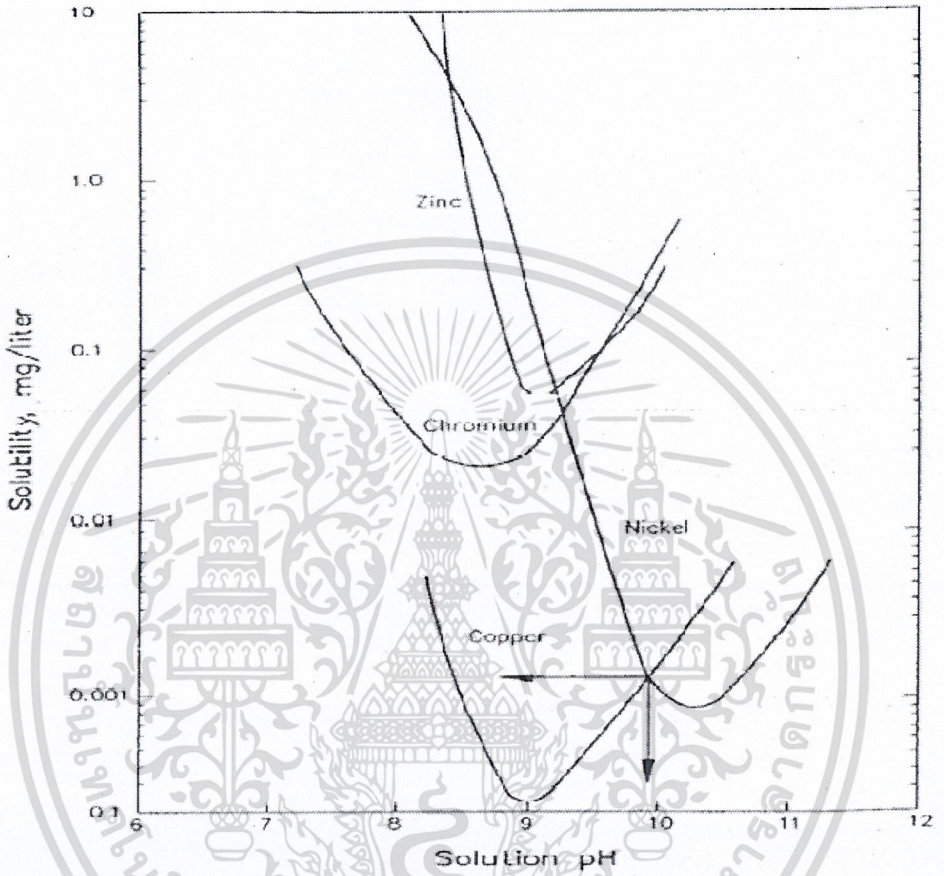
ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายโลหะ คือ

1. ชนิดของกรด กรดเกลือ เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4), กรดไนตริก (HNO_3), กรดไฮโดรคลอริก (HCl) สามารถละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ มีการศึกษาพบว่าความสามารถในการละลายโลหะทองแดงของกรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก มีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่กรดที่นิยมใช้ คือ กรดซัลฟิวริก เนื่องจากเป็นกรดที่มีราคาถูกและง่ายในการกรองแยก

2. ปริมาณกรด ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอน โดยเฉพาะปริมาณตะกอนแห้ง (Dry matter) ซึ่งถ้าปริมาณตะกอนแห้งมีมาก ปริมาณกรดที่ใช้ในการละลายก็จะมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ความสามารถในการละลายจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรด-เบส ลดลง ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1-2 โดยถ้าค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 9-10 โลหะทองแดงจะละลายได้น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและความสามารถในการละลายของโลหะหนักต่าง ๆ (มั่นสิน, 2543)

2.4 กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดโลหะหนักออกจากตะกอน

2.4.1 การสกัดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค (Ultrasonic Extraction) (ศพนธ์และคณะ, 2551)

คือ การสกัดด้วยพลังงานที่เกิดจากคลื่นเสียงที่มีการสั่นของคลื่นประมาณ 20,000 ครั้งต่อวินาทีหรือสูงกว่าหรือคลื่นความดันที่มีความถี่สูงกว่าปกติ (สูงกว่า 20,000 กิโลเฮิร์ตซ์) ซึ่งความถี่ดังกล่าวมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน โดยทั่วไปแล้ว คลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยินนั้น เกิดจากการสั่นสะเทือนผ่านตัวกลางที่มีความถี่อยู่ในช่วง 20-20,000 กิโลเฮิร์ตซ์

กลไกที่เกิดจากการใช้คลื่นเสียงต่อระบบทางเคมี เป็นผลให้ของเหลวเกิดปรากฏการณ์ช่องว่างของเสียง ผลของการใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคต่อระบบทางเคมี ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดกระบวนการต่าง ๆ รวมทั้งการเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาหรือผลที่ได้, ประสิทธิภาพใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้เขียนก่อน

การใช้พลังงาน, การเพิ่มความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยา, การกระตุ้นของโลหะและของแข็ง หรือการเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาซ้ำของสารเคมีหรือตัวเร่งปฏิกิริยา

ข้อดี

1. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดโลหะออกจากสลัดจ์ได้ดี
2. อุปกรณ์ที่ใช้สามารถหาได้ง่าย

ข้อเสีย

1. หากสลัดจ์มีการปนเปื้อนของโลหะหลายชนิด อาจทำให้การแยกในขั้นต่อไปเกิดความยุ่งยาก จึงควรมีการตรวจสอบก่อน
2. อุปกรณ์ที่นำมาใช้ทำคลื่นอัลตร้าโซนิคนั้นมีราคาแพง

2.4.2 การสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Extraction)

(http://thainature.co.th/main/index.php?option=com_content&view=article&id=57&Itemid=82, http://share.psu.ac.th/blog/sci-discus/17171)

ไมโครเวฟคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ตั้งแต่ประมาณ 300 เมกกะเฮิร์ท ถึง 300 กิกกะเฮิร์ท ภายใต้กระแสสนามแม่เหล็กของไมโครเวฟ ขั้วโมเลกุลจะได้รับการสั่นอย่างรุนแรงและเกิดการเสียดสี ทุกๆ โมเลกุลตัวที่สองจะถูกเรียงสู่การสั่นสะเทือน และการเสียดสีมากกว่าหลายร้อยล้านเท่า

กลไกที่เกิดจากการใช้คลื่นไมโครเวฟต่อระบบทางเคมี โดยคลื่นไมโครเวฟสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลเป็นผลให้ของเหลวเกิดการแตกตัว และทำให้เกิดความร้อน เนื่องจากเกิดการสั่นอย่างรุนแรง ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี และกระบวนการต่าง ๆ รวมทั้งการเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาหรือผลที่ได้ และเกิดการกระตุ้นของโลหะและของแข็งให้แยกออกจากกันได้ดีขึ้น

ข้อดี

1. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดโลหะออกจากสลัดจ์ได้ดี
2. สามารถกำหนดความถี่ของคลื่นได้อย่างแม่นยำ

ข้อเสีย

1. หากสลัดจ์มีการปนเปื้อนของโลหะหลายชนิด อาจทำให้การแยกในขั้นต่อไปเกิดความยุ่งยาก จึงควรมีการตรวจสอบก่อน
2. อุปกรณ์ที่นำมาใช้ทำคลื่นไมโครเวฟนั้นมีราคาแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kuan *et al.* (2010) ศึกษาการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่จากสลัดจ์ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้า โดยใช้กรดซัลฟิวริก พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก และอัตราส่วนของของแข็งต่อของเหลว จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่ 5 กรัมต่อลิตร กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และใช้เวลา 2 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ 99.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ของโลหะบางตัวเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวประสิทธิภาพจะมีค่าลดลง จากการศึกษานี้ ได้มีการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าน้ำหนักสลัดจ์ที่เหลือจากการใช้กรดซัลฟิวริกในแต่ละความเข้มข้น และอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวในแต่ละอัตราส่วน ผลการศึกษาพบว่าการนำโลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ได้แก่ เหล็ก และโครเมียม กลับมาใช้ใหม่นั้นทำได้ยากกว่าการนำโลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัว ได้แก่ ทองแดง สังกะสี นิกเกิล และแคดเมียม

Li *et al.* (2010) ศึกษาขั้นตอนการสกัด และนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ในระดับห้องปฏิบัติการโดยสกัดจากสลัดจ์ที่เกิดจากการชุบโลหะ โดยวิธีการชะด้วยกรด 2 ขั้นร่วมกับการใช้วิธีอัลตร้าโซนิค โดยทำการแยกโลหะออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ โลหะที่มีมูลค่ามาก ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี และ โลหะที่มีมูลค่าน้อยได้แก่ เหล็ก และโครเมียม พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ ค่าพีเอช กำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิค และเวลาในการสกัด ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้สามารถวัดได้จากความสามารถของการชะ และอัตราการนำกลับมาใช้ของโลหะหนัก ผลการศึกษาพบว่าสภาวะในการสกัดคือ ขั้นแรกใช้พีเอช 3.2 กำลังเครื่องอัลตร้าโซนิค 200 วัตต์ และเวลาในการชะ 60 นาที ส่วนขั้นที่สองใช้พีเอช 4.0 กำลังเครื่อง 100 วัตต์ และใช้เวลา 100 นาที ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงมีค่าเท่ากลับ 97.42 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 98.46 เปอร์เซ็นต์ สังกะสี 98.63 เปอร์เซ็นต์ โครเมียม 98.32 เปอร์เซ็นต์ และเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนโครเมียมและเหล็กถูกกำจัดออกโดยกระบวนการชะในรูปของแข็ง ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

Xie *et al.* (2009) ศึกษาการแยกทองแดงและเหล็กออกจากสลัดจ์ซึ่งได้จากโรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้า โดยวิธีการชะด้วยกรดร่วมกับวิธีอัลตร้าโซนิค ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายพลังงาน และลดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ในการศึกษานี้ได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกทองแดงและเหล็กที่ได้จากการชะด้วยกรดร่วมกับวิธีอัลตร้าโซนิค กับวิธีที่ไม่ใช้อัลตร้าโซนิค นอกจากนี้ ได้ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกทองแดงและเหล็ก ด้วยวิธีการชะที่แตกต่างกัน โดยมีการปรับค่าพีเอช และกำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิค จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ ค่าพีเอชมีค่าเท่ากับ 3.0 กำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิคเท่ากับ 160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

117298

วัตต์ (ในถัง 1 ลิตร) และเวลาที่ใช้เท่ากับ 60 นาที ประสิทธิภาพในการชะทองแดงคิดเป็น 97.83 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพในการชะเหล็กคิดเป็น 1.23 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองนำไปสู่การนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ภายในโรงงานอุตสาหกรรมของเมือง Huizhou ในประเทศจีน

Cai *et al.* (2009) ศึกษาการนำโลหะที่เกิดจากของเสียในการผลิต PCB เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยการใช้อัลตร้าโซนิค ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัด มีประสิทธิภาพในการแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูง และไม่ก่อให้เกิดของเสียในจากกระบวนการ ผลการทดลองพบว่า กากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม PCB มีปริมาณทองแดง (ตะกอนเปียก) 3.14 - 4.85 เปอร์เซ็นต์ และเหล็ก 3.71 - 4.23 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงอยู่ที่ 95.2 - 97.5 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของเหล็กอยู่ที่ 97.1 - 98.5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความบริสุทธิ์ของคอปเปอร์ซัลเฟตที่ได้จากกระบวนการสกัดเป็น 98.0 เปอร์เซ็นต์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ได้จากกระบวนการสกัด สามารถนำไปใช้เป็นสารตกตะกอนสำหรับโรงบำบัดน้ำเสียได้ วิธีการนี้ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมในเมือง Huizhou ของประเทศจีนมานานกว่าสองปีแล้ว

Deng *et al.* (2009) ศึกษาประสิทธิภาพของกรดไนตริกในการกำจัดโลหะหนักจากกากตะกอน โดยทำการศึกษากรดไนตริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 0.65 โมลาร์ และเวลาในการใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคตั้งแต่ 0 ถึง 20 นาที ในการสกัดทองแดง สังกะสีและตะกั่ว พบว่าความเข้มข้นของกรดไนตริกที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดโลหะหนักคือ 0.325 โมลาร์ ในขณะที่เวลาที่เหมาะสมในการใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคเป็นเวลา 20 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง สังกะสี และตะกั่วออกจากกากตะกอนมีค่าเท่ากับ 9.5, 82.2 และ 87.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณการตกค้างของสังกะสี และตะกั่วในกากตะกอนไม่เกินค่ามาตรฐานของจีน ในขณะที่ทองแดงไม่ได้ถูกกำจัดออกอย่างมีนัยสำคัญ ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักพบว่าตะกั่วสามารถกำจัดได้มากสุด รองลงมาคือสังกะสี และที่มีประสิทธิภาพน้อยสุดคือทองแดง ส่วนการใช้อัลตร้าโซนิคและกรดไนตริกในการสกัดได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 18-22 เปอร์เซ็นต์ และ 78-82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้อัลตร้าโซนิคเพียงอย่างเดียวไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน อย่างไรก็ตาม หากใช้อัลตร้าโซนิคร่วมกับกรดไนตริกในสกัดโลหะหนักจากกากตะกอนก็จะสามารถสกัดโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น AA Analyst 200 บริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรมิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer) รุ่น SRS 3400 ยี่ห้อ XRF Bruker AXS บริษัท Bruker AXS GmbH ประเทศเยอรมนี
3. เครื่องอัลตร้าโซนิค รุ่น 136H บริษัท Ney Dental ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องวัดค่าพีเอช รุ่น 827 บริษัท Metrohm ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
5. ตู้อบให้ความร้อน รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher Scientific Worldwide ประเทศอังกฤษ
6. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น 254 บริษัท Sartorius ประเทศเยอรมนี
7. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Buchner Filter) รุ่น A-35 ยี่ห้อ EYEL4 บริษัท Tokyo Rikakikat ประเทศญี่ปุ่น
8. เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuge)
9. เดซิเคเตอร์
10. ตะแกรงร่อนขนาด 10 mesh
11. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร บริษัท Whatman ประเทศอังกฤษ
12. หัวกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมโครเมตร
13. ไมโครปิเปต บริษัท Witeg Labotecchnik GmbH ประเทศเยอรมนี
14. โกร่งสำหรับบด
15. อุปกรณ์พลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศแคนาดา

2. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท SDFCLประเทศอินเดีย

3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) บริษัท Carlo Erba ประเทศแคนาดา

4. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phtalate, KHP) บริษัท MERCK ประเทศเยอรมนี

5. ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein)

6. บรอมไทมอลบลูอินดิเคเตอร์ (Bromthymol blue)

7. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 แหล่งที่มาของสลัดจ์

ตัวอย่างสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าของโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ดาร์โก้ พีซีบี จำกัด (มหาชน) สวนอุตสาหกรรมบางกระดี่ อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี

3.2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสลัดจ์

3.2.2.1 วิธีการเตรียมสลัดจ์

1. นำตัวอย่างสลัดจ์มาผึ่งแดดโดยกระจายให้ทั่วภาชนะที่บรรจุ จนสลัดจ์แห้ง

2. นำสลัดจ์ที่ผึ่งแดดแห้งแล้วมาบดด้วยโกร่ง

3. คัดแยกขนาด โดยร่อนด้วยตะแกรงขนาด 10 เมช

4. นำสลัดจ์จากข้อ 3 ไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5. จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น

6. เก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติกแบบปิด เก็บไว้ในที่มีฝาปิด และมีสารดูดความชื้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 การศึกษาสมบัติของสลัดจ์ การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างสลัดจ์ โดยใช้วิธีและเครื่องมือต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสลัดจ์

พารามิเตอร์	วิธีการ/เครื่องมือ
1. ค่าพีเอช	ใช้อัตราส่วนสลัดจ์ต่อน้ำ เท่ากับ 1:1 แล้ววัดด้วยเครื่องวัดพีเอช (Soil and Plant Analysis Council. Inc, 2000)
2. ความชื้น	วิธีกราวิเมตริก โดยการชั่งน้ำหนักสลัดจ์ก่อนอบและหลังอบ (Buurman *et al.*, 1996)
3. สารประกอบอนินทรีย์ในสลัดจ์	เครื่องเอ็กซเรย์ฟลูอเรสเซนต์สเปกโตรมิเตอร์
4. ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในสลัดจ์	ย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น(อัตราส่วน 1:1) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (APHA, Method 3500 Cu (2005))

3.2.3 การศึกษาการชะทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

1. ชั่งสลัดจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.2.1 จำนวน 0.1 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร (ซึ่งทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอนก่อนใช้) จำนวน5 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

3. สกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคที่มีกำลัง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

4. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

5. กรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

6. ส่วนใสที่ได้จากการกรองในข้อ 5 เติมในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

7. เจือจาง 1,000 เท่า โดยนำส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 6 จำนวน 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

8. กรองส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 7 กรองผ่านหัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

9. นำส่วนใสที่ได้นำไปวิเคราะห์ทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทำแบลงค์เช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่ไม่ใส่สลัดจ์

11. ทำการทดลองเช่นเดียวกับกับข้อ 1-10 อีก 2 ซ้ำ

12. ทำการทดลองเช่นเดียวกับกับข้อ 1-11 แต่เปลี่ยนจากกรดซัลฟิวริกเป็นน้ำปราศจากไอออน

3.2.4 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

3.2.4.1 การศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมในการชะทองแดง

1. ชั่งสลัดจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.2.1 จำนวน 0.1 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (ซึ่งทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอนก่อนใช้) จำนวน 5 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

3. สกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคที่มีกำลัง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

4. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

5. กรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

6. ส่วนใสที่ได้จากการกรองในข้อ 5 เติมในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

7. เจือจาง 1,000 เท่า โดยนำส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 6 จำนวน 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

8. กรองส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 7 กรองผ่านหัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

9. นำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์ทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

10. ทำแบลงค์เช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่ไม่ใส่สลัดจ์

11. ทำการทดลองเช่นเดียวกับกับข้อ 1-10 อีก 2 ซ้ำ

12. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-11 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในข้อ 2 เป็น 0.3, 0.5, 1 และ 2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

3.2.4.2 การศึกษาสัดส่วนของสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมในการชะทองแดง

1. ชั่งสลัดจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.2.1 จำนวน 0.1 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เติมกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.1 จำนวน 10 กรัมต่อลิตร คนให้เข้ากัน

3. สกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคที่มีกำลัง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

4. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

5. กรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

6. ส่วนใสที่ได้จากการกรองในข้อ 5 เติมในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

7. เจือจาง 1,000 เท่า โดยนำส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 6 จำนวน 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

8. กรองส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 7 กรองผ่านหัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

9. นำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์ทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโต-มิเตอร์ (AAS)

10.ทำแบลงค์เช่นเดียวกับกับข้อ 1-9 แต่ไม่ใส่สลัดจ์

11.ทำการทดลองเช่นเดียวกับกับข้อ 1-10 อีก 2 ซ้ำ

12.ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-11 แต่เปลี่ยนสัดส่วนสลัดจ์ต่อกรดซัลฟิวริกในข้อ 2 เป็น 14, 20, 33 และ 100 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.2.4.3 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของการสกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคในการชะทองแดง

1. ชั่งสลัดจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.2.1 จำนวน 0.1 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.1 สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.2 คนให้เข้ากัน

3. สกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคที่กำลัง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

4. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

5. กรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

6. ส่วนใสที่ได้จากการกรองในข้อ 5 เติมในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

7. เจือจาง 1,000 เท่า โดยนำส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 6 จำนวน 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

8. กรองส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 7 กรองผ่านหัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. นำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์ทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโต-มิเตอร์ (AAS)

10. ทำแบลงค์เช่นเดียวกับกับข้อ 1-9 แต่ไม่ใส่สลัดจ์

11. ทำการทดลองเช่นเดียวกับกับข้อ 1-10 อีก 2 ซ้ำ

12. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-11 แต่เปลี่ยนเวลาของการสกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคในข้อ 3 เป็น 10 และ 15 นาที ตามลำดับ

3.2.5 การชะทองแดงด้วยสภาวะที่เหมาะสม

1. ชั่งสลัดจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.2.1 จำนวน 0.1 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.1 สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.2 คนให้เข้ากัน

3. สกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคที่กำลัง 600 วัตต์ ที่เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.4.3

4. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

5. กรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว ให้ส่วนตะกอนทั้งหมดในหลอดเครื่องปั่นเหวี่ยงอยู่บนกระดาษกรองใยแก้ว

6. ส่วนใสที่ได้จากการกรองในข้อ 5 เติมในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

7. เจือจาง 1,000 เท่า โดยนำส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 6 จำนวน 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

8. กรองส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อ 7 กรองผ่านหัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

9. นำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์ทองแดงและเหล็กด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน-สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

10. ทำแบลงค์เช่นเดียวกับกับข้อ 1-9 แต่ไม่ใส่สลัดจ์

11. ทำการทดลองเช่นเดียวกับกับข้อ 1-10 อีก 2 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงงานพิเศษนี้ ศึกษาการชะโลหะทองแดงออกจากสลัดจ์ของกระบวนการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าในโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดปริมาณของเสียอันตรายที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอนคือ 1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสลัดจ์ 2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค และ 3) ศึกษาประสิทธิภาพในการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคโดยใช้สภาวะที่เหมาะสม ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสลัดจ์

จากการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของสลัดจ์อบแห้ง ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าความชื้น ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในสลัดจ์โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) และปริมาณสารประกอบชนิดต่าง ๆในสลัดจ์ ที่วิเคราะห์โดยเครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์-สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

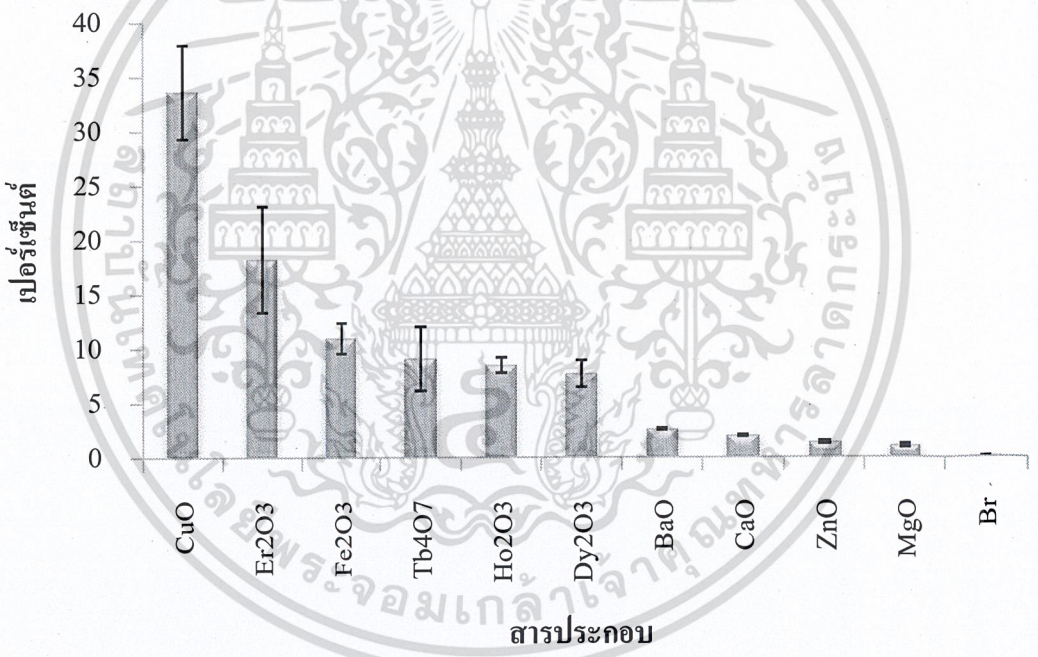
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสลัดจ์

สลัดจ์อบแห้ง	ค่าเฉลี่ย ± SD (N=3)
ค่าพีเอช (pH)	8.87 ± 0.04
ค่าความชื้น (%)	75.44 ± 0.48
ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมด (กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง)	750.67 ± 55.03

จากตารางพบว่า ค่าพีเอชของสลัดจ์อบแห้งเท่ากับ 8.87±0.04 เนื่องจากในกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับค่าพีเอชในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย จึงทำให้สลัดจ์มีค่าความเป็นด่างเล็กน้อย จากการศึกษาองค์ประกอบภายในของสลัดจ์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์-ฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) พบว่าตัวอย่างสลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความเข้มข้นของทองแดงในรูปสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ (Copper(II) oxide, CuO) มากที่สุดคือ 33.65 ± 4.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ เออร์เบียมออกไซด์ (Erbium Oxide, Er_2O_3) 18.25 ± 4.88 เปอร์เซ็นต์ และไอรอนออกไซด์ (Iron Oxide, Fe_2O_3) 11.00 ± 1.41 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-1.1 ภาคผนวก ก) ซึ่งทองแดงเหล่านี้มาจากกระบวนการชุบ กัดลายและล้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกระบวนการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า ส่วนกลุ่มโลหะแลนทาไนด์ที่พบว่าเป็นธาตุที่มีความเป็นพิษน้อย และมีการนำมาใช้ประโยชน์ไม่มากนัก ส่วนมากใช้ในงานเทคโนโลยีนิวเคลียร์ และเจือจางโลหะบางชนิด จึงไม่คุ้มค่าและไม่นิยมนำกลับมาใช้ใหม่ (ชัยวัฒน์, 2543) จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในตัวอย่างสลัดจ์ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) พบทองแดง 750.67 ± 55.03 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-2 ภาคผนวก ก) ซึ่งมีปริมาณทองแดงค่อนข้างสูง จึงเหมาะกับการที่จะนำเอาทองแดงกลับมาใช้ใหม่



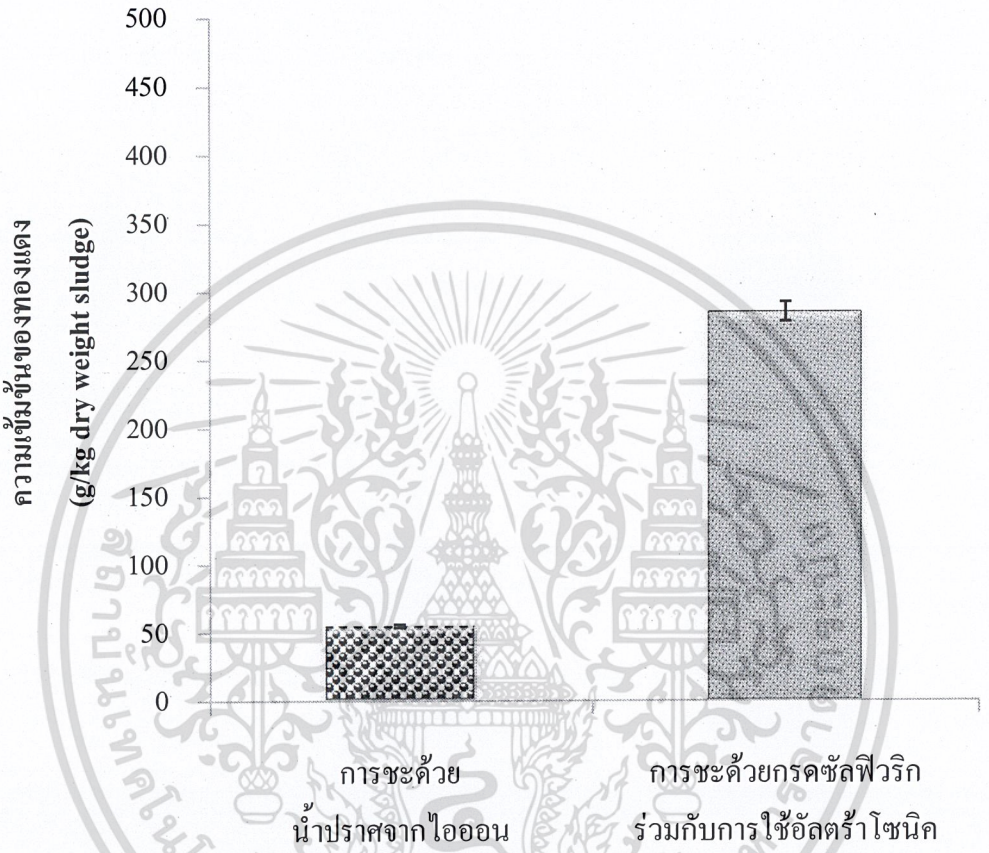
รูปที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ของสารประกอบต่าง ๆ ในสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

4.2 การชะทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

จากผลการศึกษาการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้กรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค พบว่า ทองแดงที่ชะได้จะมีความเข้มข้นเท่ากับ 285.16 ± 7.12 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ส่วนการชะทองแดงด้วยน้ำปราศจากไอออน จะมีความเข้มข้นทองแดง

เอกสารนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้ใช้ ไม่ว่าเพื่อการค้า

เท่ากับ 55.26 ± 1.19 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้งดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1 ภาคผนวก ข) พบว่าการใช้อัลตร้าโซนิคร่วมกับการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการชะทองแดงได้มากกว่าการใช้น้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการชะด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคเปรียบเทียบกับการชะด้วยน้ำปราศจากไอออน

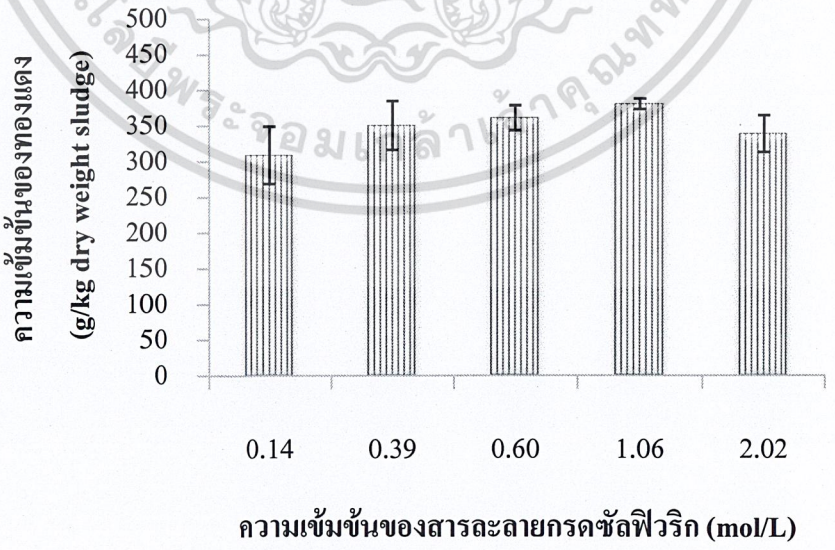
4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาที่ใช้ในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค ได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม

จากการทดลองการชะทองแดงในสลัดจ์ปริมาณ 0.1 กรัม ด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคที่กำลัง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกจะมีค่าเท่ากับ 0.14, 0.39, 0.60, 1.06 และ 2.02 โมลต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกจะมีผลทำให้ความเข้มข้นของทองแดงมีแนวโน้มถูกชะออกจากสลัดจ์เพิ่มขึ้นและจะเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1.06 โมลต่อลิตร และที่ความเข้มข้น 1.06 โมลต่อลิตรสามารถชะทองแดงได้ปริมาณมากที่สุดคือ 379.84 ± 7.31 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง รองลงมาคือความเข้มข้น 0.60 โมลต่อลิตร ได้ความเข้มข้นของทองแดง 360.57 ± 17.48 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ความเข้มข้น 0.39 และ 2.02 โมลต่อลิตร ได้ความเข้มข้นของทองแดง คือ 350.18 ± 34.29 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง และ 337.76 ± 25.81 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ตามลำดับ และที่ความเข้มข้น 0.14 โมลต่อลิตรได้ความเข้มข้นของทองแดงน้อยที่สุด คือ 308.78 ± 40.14 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.1 ภาคผนวก ข) จากการทดสอบทางสถิติ พบว่า ความเข้มข้นที่ใช้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค) นั่นก็แสดงว่าสามารถเลือกใช้ความเข้มข้นของกรดได้ในช่วงตั้งแต่ 0.4-2 โมลต่อลิตร แต่จากการทดลองนี้ได้เลือกใช้ที่ความเข้มข้น 1.06 โมลต่อลิตร เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่ให้ปริมาณทองแดงที่ชะออกมาได้ปริมาณมากที่สุด



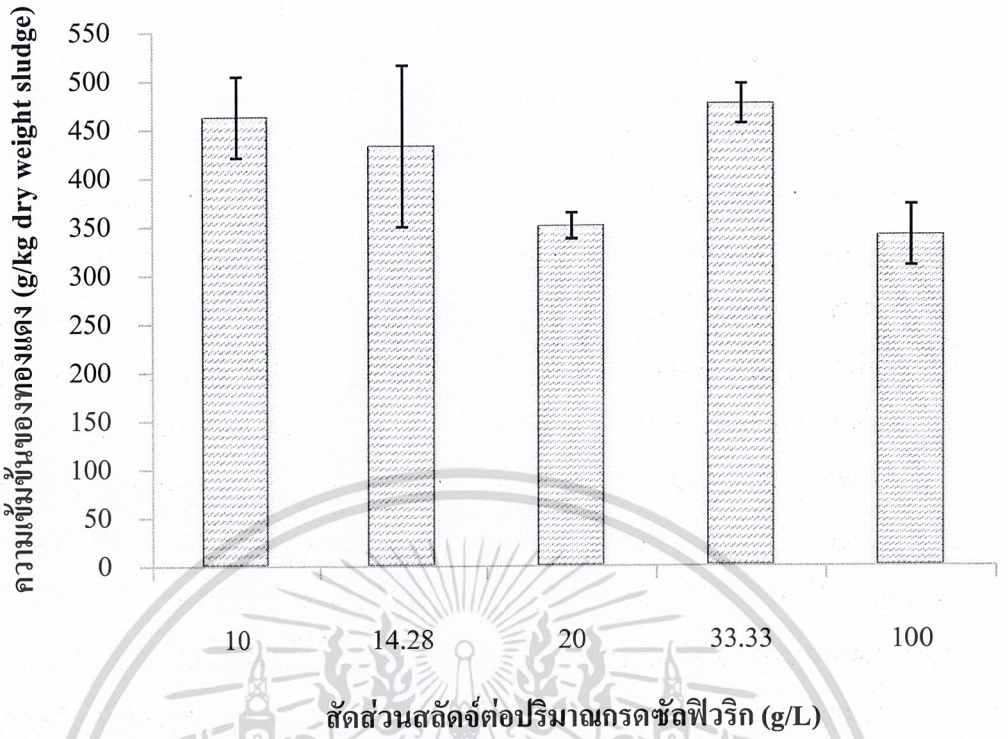
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการชะกับความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้ [illegible] ไม่ว่ากรณีใดๆ [illegible] และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลของสัดส่วนของสลัดจ์ต่อปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม

จากการศึกษาสัดส่วนของสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ โดยแปรค่าปีน 10, 14.28, 20, 33.33, และ 100 กรัมต่อลิตร (โดยใช้สลัดจ์ 0.1 กรัมต่อปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็น 10, 7, 5, 3, และ 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ) ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลอง 4.3.1 ร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคที่กำลัง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ผลการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 33.33 กรัมต่อลิตร สามารถชะทองแดงได้มากที่สุด 476.07 ± 20.36 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง รองลงมาคือที่สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 10, 14.28 และ 20 กรัมต่อลิตร ได้ความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 463.00 ± 41.69 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง, 433.54 ± 83.03 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง และ 350.97 ± 13.27 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ตามลำดับ และน้อยที่สุดคือที่สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 100 กรัมต่อลิตร ได้ความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 340.76 ± 31.47 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (รายละเอียดในตารางที่ ข-2.2 ภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่า ค่าความเข้มข้นของทองแดงที่สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 33.33, 14.28 และ 10 กรัมต่อลิตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค) ดังนั้น สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณ กรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ ช่วงตั้งแต่ 10-33.33 กรัมต่อลิตร แต่จากการทดลองเลือกใช้สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 33.33 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่มากที่สุด นั่นคือที่ปริมาตรกรด 1 ลิตร สามารถใช้ชะสลัดจ์จำนวน 33.33 กรัม ซึ่งที่ปริมาตรกรดเท่ากันสามารถชะปริมาณสลัดจ์ได้มากกว่าแล้วให้ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันกับที่สัดส่วนของสลัดจ์น้อยกว่า จึงเป็นการประหยัดสารและค่าใช้จ่าย ซึ่งจากงานวิจัยของ Kuan *et al.* (2010) พบว่าอัตราส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่เหมาะสมในการนำสลัดจ์กลับมาใช้ใหม่ คือ 5 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ประสิทธิภาพ 99.9 % ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับการทดลองนี้ พบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 ลิตร สามารถใช้กับปริมาณสลัดจ์ได้มากกว่า และใช้เวลาในการชะน้อยกว่า เนื่องจากมีการใช้อัลตร้าโซนิคร่วมกับการใช้กรดซัลฟิวริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



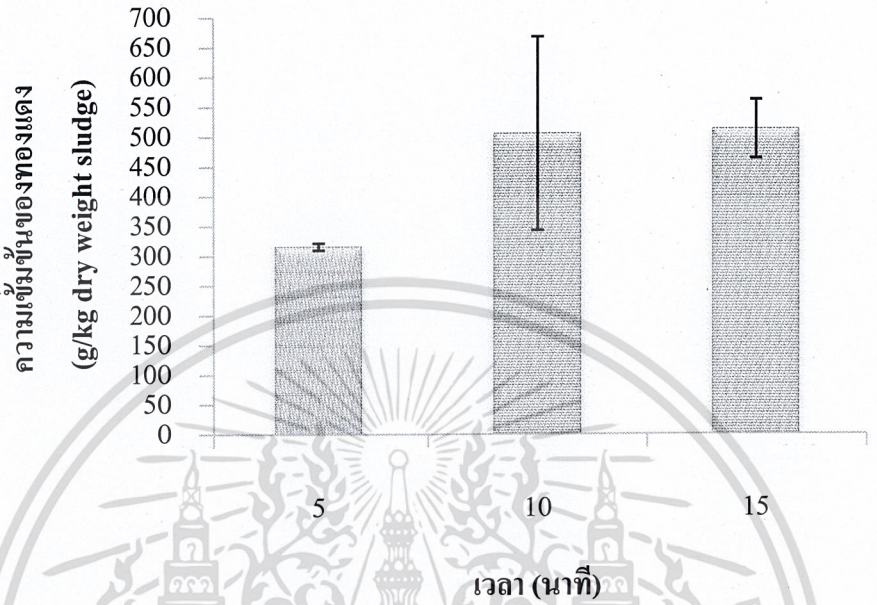
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการชะกับสัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกที่แตกต่างกัน

4.3.3 ผลของเวลาในการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคที่เหมาะสม

จากการศึกษาเวลาที่ใช้ในการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคกำลัง 600 วัตต์ ร่วมกับการใช้กรด-ซัลฟิวริกในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ โดยแปรค่าเวลาเป็น 5, 10 และ 15 นาที โดยใช้สลัดจ์ปริมาณ 0.1 กรัม ใช้ความเข้มข้นของกรด 1 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลอง 4.3.1 และสัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 33.33 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 4.3.2 ผลการทดลองพบว่า การใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคที่กำลัง 600 วัตต์ เวลา 15 นาที สามารถชะทองแดงได้มากที่สุด 512.24 ± 49.06 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง รองลงมาคือเวลา 10 นาที ได้ความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 505.5 ± 162.17 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง และน้อยที่สุดคือ เวลา 5 นาที ได้ความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 316.28 ± 5.94 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (รายละเอียดในตารางที่ ข-2.3 ภาคผนวก ข) จากการทดสอบทางสถิติพบว่า ความเข้มข้นของทองแดงที่ชะได้ที่เวลา 5, 10 เละ 15 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตารางที่ ค-3 ภาคผนวก ค) นั่นก็แสดงว่าสามารถเลือกใช้ช่วงเวลาในการชะทองแดงด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคได้ตั้งแต่ 5-15 นาที แต่ในการทดลองนี้เลือกใช้ที่เวลา 10 นาที เนื่องจากที่เวลา 10 และ 15 นาที ให้ปริมาณทองแดงออกมาปริมาณ

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากใกล้เคียงกัน แต่การเลือกใช้ที่เวลา 10 นาที จะเป็นช่วยการประหยัดเวลาและพลังงานในการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

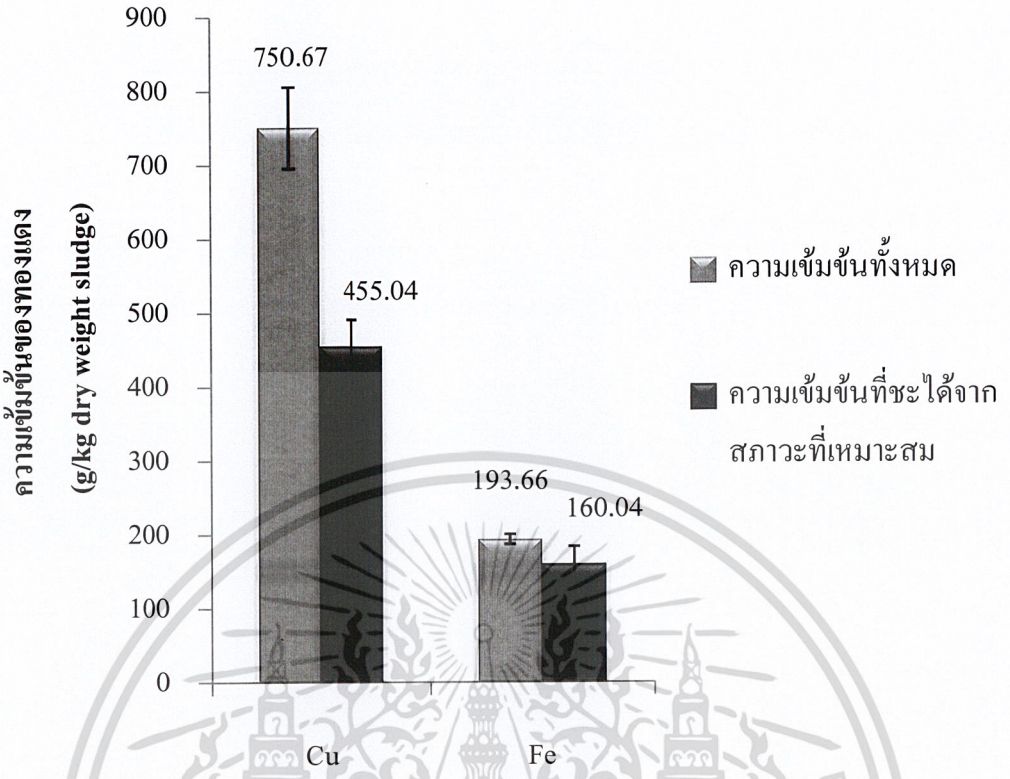


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการชะกับเวลาในการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

4.4 ประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้สภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค พบว่าได้สภาวะในการชะทองแดงจากสลัดจ์ คือ การใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคร่วมกับการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก ใช้สารละลายกรดความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 33.33 กรัมต่อลิตรและเวลาที่ใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค 10 นาที พบว่าสามารถชะความเข้มข้นของทองแดงได้ 455.04 ± 36.23 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง และเหล็ก 160.04 ± 23.83 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ดังรูปที่ 4.6 (รายละเอียดในตารางที่ ข-3.1 และข-3.2 ภาคผนวก ข) นำสภาวะที่ได้มาทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการชะทองแดงและเหล็กจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จะพบว่าประสิทธิภาพในการชะทองแดงเท่ากับ 60.62 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการชะเหล็กเท่ากับ 82.62 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตารางที่ ข-3.3 ภาคผนวก ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cai *et al.* (2009) ที่พบว่าประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ของเหล็กมากกว่าทองแดง แต่ปริมาณทองแดงทั้งหมดในกากตะกอนมีมากกว่าปริมาณเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ปริมาณทองแดงและเหล็กที่ชะได้จากการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคในสภาวะที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับปริมาณทองแดงและเหล็กทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่จากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่โดยการชะด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัลตร้าโซนิค ได้สภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ ดังนี้

1. สภาวะที่เหมาะสมในการชะทองแดงออกจากสลัดจ์โดยใช้กรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค คือ ที่ความเข้มข้นของกรดเท่ากับ 1 โมลต่อลิตร สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 33.33 กรัมต่อลิตร และเวลาในการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคคือ 10 นาที

2. สามารถชะทองแดงได้ 455.04±36.23 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง และชะเหล็กได้ 160.04 ±23.83 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้งที่สภาวะที่เหมาะสม

3. ประสิทธิภาพในการชะทองแดงด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่อง-อัลตร้าโซนิคในสภาวะที่เหมาะสม เท่ากับ 60.62 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณเหล็กในสลัดจ์ที่ถูกชะออกมาคิดเป็นประสิทธิภาพในการชะได้ 82.64 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรแปรค่ากำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิคและศึกษาประสิทธิภาพที่ได้จากการชะทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ค่ากำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิคต่างๆ

2. ควรศึกษาปริมาณทองแดงที่เหลือในกากตะกอนหลังการชะ เพื่อหาวิธีในการจัดการกับสลัดจ์ต่อไป

3. ควรศึกษาการนำทองแดงในรูปของสารละลายที่ชะได้ไปใช้ประโยชน์

4. ควรศึกษาการสกัดสารละลายทองแดงให้บริสุทธิ์ เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ และลดการใช้ทรัพยากร

5. ควรศึกษาวิธีการชะทองแดงออกจากสลัดจ์ของกระบวนการชุบโลหะจากโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการชะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2551. **คู่มือการจัดการซากผลิตภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.** กรุงเทพฯ : สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2550. **การผลิตแผงวงจรพิมพ์ PCB**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.diw.go.th/diw/m6_index.html.

กรีนพีซ. 2550. **บทคัดย่อจากรายงาน 'มลพิษจากอุตสาหกรรมไฮเทค' การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมระหว่างการผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.greenpeace.org/seasia/th/Global/seasia/report/2008/5/electronics- pollution.pdf.

จุฑามณี ยาดี, โชติรส สุขเปี้ย และ วสุ พิทยโสภณกิจ. 2551. **"การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะโดยกระบวนการไฮดรอกไซด์พรีซิพิเตชันและกระบวนการเฟอร์ไรท์."** โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2536. **หลักเคมี 2** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2543. **Erbium (Er)เออร์เบียม.** [Online]. Available: http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Er.html

ณรงค์ ศิขิรัมย์. 2553 "**เคมีในคหกรรมศาสตร์**" [Online]. Available : http://www.human.cmu.ac.th/home//hc/ebook/006123/254903/006-alkaline.pdf.

บริษัท ไทยเนเจอร์ ซัพพลาย จำกัด. 2552.**ความรู้เกี่ยวกับพลังงานไมโครเวฟ.** [Online]. Available : http://thainature.co.th/main/index.php?option=com_content&view=article&id=5 7 &Itemid=82

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2543. **วิศวกรรมประปา.** เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศพนธ์ ฉัตรจรัสแสง, ยุวฉัตร ปั้นแก้ว, วรรณภา พฤนทวิลาส และ อรรณพ สุทธิแก้ว. 2551. **"การสกัดสารสำคัญจากผลส้มแขกด้วยคลื่นอุลตร้าโซนิค."** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สาขาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. 2010. **Copper (Cu) ทองแดง.** [Online]. เข้าถึงได้จาก:http://www.rmutphysics.com/CHARUD/naturemystery/sci3/periodic-table/Cu.html.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2553. **รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมรายไตรมาส ไตรมาส 2 ปี 2553 (เมษายน-มิถุนายน 2553)**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : www.oie.go.th.

อิทธิภูมิ บุญพิคำ.2551 **บทที่ 6 PRODUCTION OF PRINTED CIRCUIT BOARDS.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.kmitl.ac.th/~kbittibh/home2/BOOKS/Packaging/CHVI.pdf.

อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2539. **เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์.** พิมพ์ครั้งที่ 6. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ: หน้า 495.

American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA)., Water Environment Federation (WEF). 2005. **Standardmethods for the examination of water and wastewater**, Wasshington, DC: American Public Health Association.

Buzzle.com. 2010. **Chemical Properties of Copper.** [Online]. Available: http://www.buzzle.com /articles/chemical-properties-of-copper.html. 2010.

Buurman, P., Van Lagen, B.and Velthorest, E.J. 1996. **Manual for Soil and Water Analysis.** Netherlands: Backhuys Publishers.

Cai, T., Xie, F., Ma, Y., Li, H., Li, C., Huang, Z. and Yuan, G. 2009. "Recovery of Cu and Fe from Printed Circuit Board Waste Sludge by Ultrasound : Evaluation of Industrial Application." **Journal of Cleaner Production.** 17(1), 1494–1498.

Chaudry, M.A, Ahmad, S. and Malik, M.T. 1997. "Supported Liquid Membrane Technique Applicability for Removal of Chromium from Tannery Wastes". **Waste Management**. 17(4), 211-218.

China Direct Buy.com. 2010. **"Multi layer pcb."** [Online]. Available : http://board.china-direct- buy.com/v/4/product_detail/4915721/Multi-Layer_pcb.html.

Coombs, C.F., Jr. 1990. **Printed Circults Handbook.** 2nd ed. New York: McGraw–Hill.

Deng, J., Feng, X. and Qiu, X. 2009. "Extraction of Heavy Metal from Sewage Sludge Using Ultrasound-Assisted Nitric Acid." **Chemical Engineering Journal**. 152(1), 177–182.

De Souza e Silva, P.T., De Mello, N.T., Menezes Duarte, M.M., Montenegro, M.B., Araújo, A.N., De Barros Neto, B. and Da Silva,V.L. 2006. "Extraction and Recovery of Chromium from Electroplating Sludge." **Journal of Hazardous Materials**. B128(1), 39–43.

De Villiers, P.R., Van Deventer, J.J. and Lorenzen L. 1995. "The Extraction of Species From Slurries of Insoluble Solids with Ion-exchange Resins". **Minerals Engineering**. 8(11), 1309-1326.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Eachem.net. 2010.**"การตัดข้อมูลที่แตกต่างทิ้ง (Q-test) ."**. [Online]. Available : http://www.eachem.net/mcontents/marticle.php?headtitle=mcontents&id=51958&Ntype=3.

Graf, M., Lair, G.J., Zehetner, F. and Gerzabek, M.H. 2007. **Institute for Soil Research,** University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Peter Jordan Stra, A1190 Vienna, Austria.

Kuan, Y.C., Lee, I.H. and Chern, J.M. 2010. "Heavy Metal Extraction from PCB Wastewater Treatment Sludge by Sulfuric Acid." **Journal of Hazardous Materials**. 177(1), 881–886.

Li, C., Xie, F., Ma, Y., Cai, T., Li, H., Huang, Z. and Yuan, G. 2010. "Multiple Heavy Metals Extraction and Recovery from Hazardous Electroplating Sludge Waste via Ultrasonically Enchanced Two-Stage Acid Leaching." **Journal of Hazardous Materials.** 178(1), 823–833.

Silva, J.E., Paiva, A.P., Soares D., Labrincha, A. and Castro, F. 2005. "Solvent Extraction Applied to the Recovery of Heavy Metals from Galvanic Sludge." **Journal of Hazardous Materials.** B120(1), 113–118.

Soil and Plant Analysis Council Inc., 2000. **Soil Analysis: Handbook of Reference Methods**. CRC Press, Boca Raton.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel. 2003. **Constituents in Wastewater.** In Waste Water Engineering, Treatment and Reuse 4th ed. The McGraw-Hill Companies Inc., Singapore. pp. 81-97

Veglio, F., Quaresima, R., Fornari, P. and Ubaldini, S. 2003. "Recovery of Valuable Metals from Electronic and Galvanic Industrial Wastes by Leaching and Electrowinning". **Waste Management.** 23(1), 245–252.

Xie, F., Li, H., Ma, Y., Li, C., Cai, T., Huang, Z. and Yuan, G. 2009. "The Ultrasonically Assisted Metals Recovery Treatment of Printed Circuit Board Waste Sludge by Leaching Separation." **Journal of Hazardous Materials**. 170(1), 430–435.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์

ก 1.1 อนินทรียวัตถุในตัวอย่างสลัดจ์

จากผลการวิเคราะห์อนินทรียวัตถุในตัวอย่างสลัดจ์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์-สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ ก-1.1

ตารางที่ ก-1.1 อนินทรียวัตถุในตัวอย่างสลัดจ์

สารประกอบอนินทรีย์	ค่าที่วัดได้ ครั้งที่ (%)		ค่าที่วัดได้เฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
	1	2		
CuO	36.700	30.600	33.65	4.31
Er_2O_3	14.800	21.700	18.25	4.88
Fe_2O_3	12.000	10.000	11.00	1.41
Tb_4O_7	11.200	7.030	9.12	2.95
Ho_2O_3	9.020	8.020	8.52	0.71
Dy_2O_3	8.580	6.84	7.71	1.23
BaO	2.680	2.570	2.63	0.03
CaO	2.080	1.950	2.02	0.09
ZnO	1.500	1.310	1.41	0.13
MgO	1.190	0.964	1.08	0.16
Br	0.133	0.109	0.12	0.02
Other	0.117	8.907	4.51	6.22
Total	**100**	**100**	**100**	

ก 1.2 การวัดค่าพีเอช (Soil and Plant Analysis Council. Inc, 2000)

1. ชั่งสลัดจ์แห้ง 10 กรัม ลงในบีกเกอร์พลาสติก เติมน้ำกลั่นลงไป 10 มิลลิลิตร
2. กวนให้เข้ากันอย่างน้อย 5 วินาที และตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
3. ขณะที่ตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้ทำการปรับเทียบเครื่องวัดพีเอชกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 4 และ 7 (ปฏิบัติตามคู่มือการใช้เครื่องวัดพีเอช)
4. จุ่มอิเลคโทรดลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายที่กวนครบตามเวลา โดยใช้การหมุนอิเลคโทรดเบาๆ อ่านค่าพีเอช
5. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชของตัวอย่างสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ตัวอย่างสลัดจ์	น้ำหนักสลัดจ์ (กรัม)	ค่าพีเอช	ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	10.0046	8.88	8.87	0.04
2	9.9994	8.90		
3	10.0412	8.83		

ก 1.3 การหาค่าความชื้น (Buurman *et al.*, 1996)

1. ชั่งกระจกนาฬิกาที่สะอาด
2. นำตัวอย่างสลัดจ์มาชั่ง 10 กรัม ลงบนกระจกนาฬิกา จดบันทึกน้ำหนักเปียก
3. นำไปเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 – 110 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ก-1.3 ผลการศึกษาค่าความชื้นของตัวอย่างสลัดจ์จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ตัวอย่างสลัดจ์	น้ำหนักสลัดจ์ ก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักสลัดจ์ หลังอบ (กรัม)	ค่าความชื้น (%)	ค่าเฉลี่ย (%)	S.D.
1	9.9872	2.4020	75.95	75.44	0.48
2	9.9981	2.4625	75.37		
3	10.0261	2.5079	74.99		

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ})}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100$$

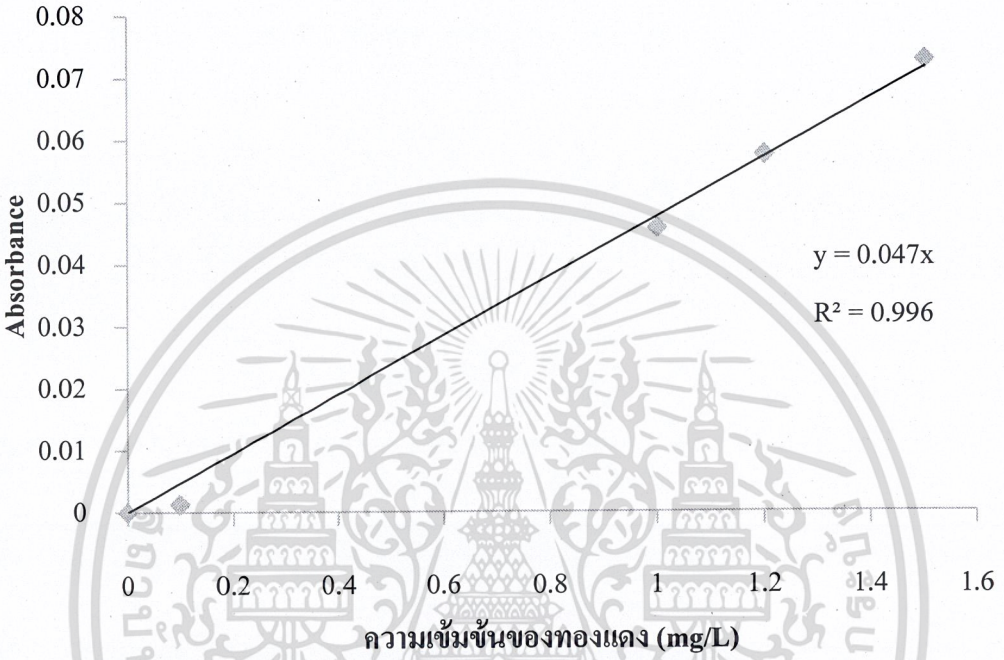
$$\text{ตัวอย่างสลัดจ์ครั้งที่ } 1 = \frac{(9.9872 - 2.4020)}{9.9872} \times 100$$

$$= 75.95\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในตัวอย่างสลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษา

การนำสลัดจ์ไปย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จากนั้นนำส่วนที่เป็นของเหลว ไปวัดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผลดังนี้



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง

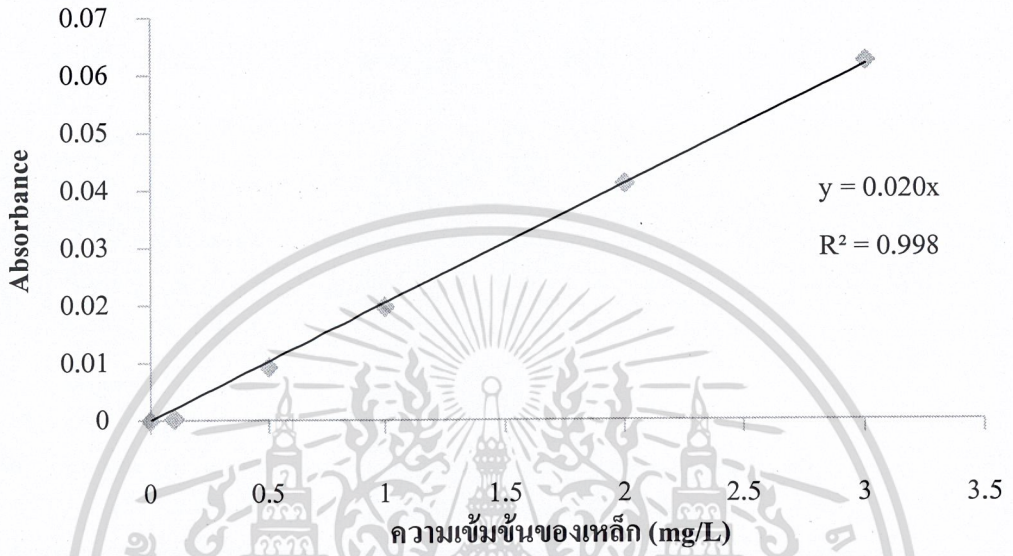
ตารางที่ ก-2 ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในสลัดจ์ตัวอย่าง

ชุดทดลอง	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Cu (mg/L)	Cu (g/kg sludge)	Avg. (g/kg sludge)	S.D.
1	2.0057	100	20,000	0.048	0.757	706.99	750.67	55.03
2	2.0012	100	20,000	0.048	0.781	732.56		
3	2.0013	100	20,000	0.048	0.861	812.47		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 ความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดในตัวอย่างสลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษา

การนำสลัดจ์ไปย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จากนั้นนำส่วนที่เป็นของเหลว ไปวัดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผลดังนี้



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก

ตารางที่ ก-3 ความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดในสลัดจ์ตัวอย่าง

ชุดทดลอง	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Fe (mg/L)	Fe (g/kg sludge)	Avg. (g/kg sludge)	S.D.
1	2.0057	100	20,000	0.095	0.294	198.43	193.66	6.75
2	2.0012	100	20,000	0.095	0.284	188.89		
3	2.0013	100	20,000	0.095	0.454	358.77*		

หมายเหตุ * คือ การตัดค่าที่สงสัยออก (Outlier)

ตัวอย่างการคำนวณ

การหาความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในหน่วยกรัมต่อกิโลกรัม

$$\text{Total Cu} = \frac{[\text{Cu ที่ได้จากการวัด} - \text{แบลงค์}(mg/L)]\times 100\ mL \times 20{,}000\ \text{เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times \text{น้ำหนักสลัดจ์}\ (g) \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

$$\text{จากชุดทดลองที่ 1} = \frac{[0.757 - 0.048(mg/L)]\times 100\ mL \times 20{,}000\ \text{เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times 2.0057\ g \times 1\ kg \times 1{,}000\ mg}$$

= 706.99 กรัมต่อกิโลกรัม

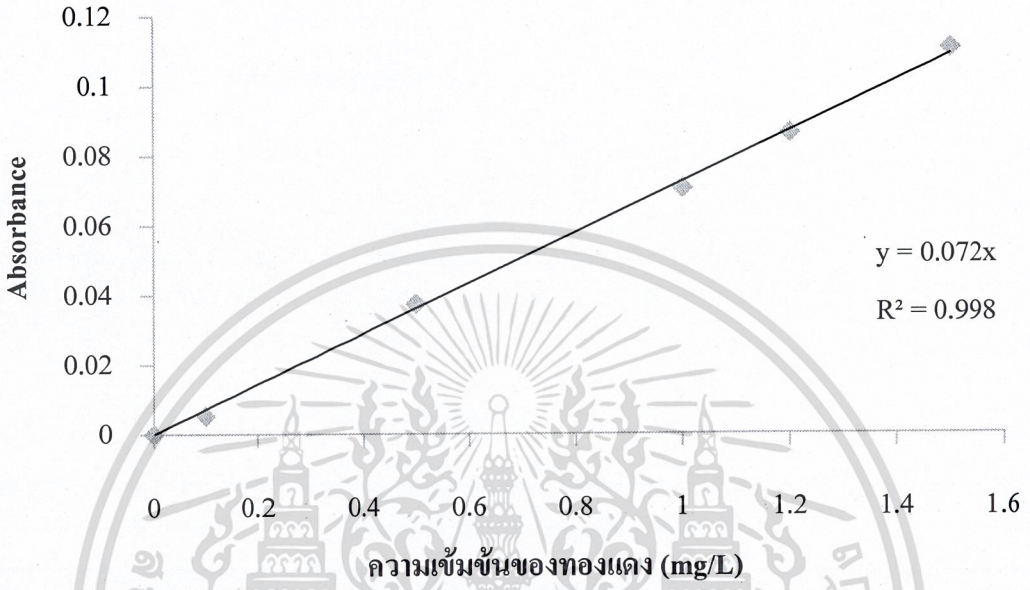
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้วิธีอัลตร้าโซนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การศึกษาการชะทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง

ตารางที่ ข-1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่ชะได้จากการใช้กรดร่วมกับอัลตร้าโซนิคและการใช้น้ำปราศจากไอออน

ชุดทดลอง	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Cu (mg/L)	Cu (g/kg sludge dry weight)	Avg. (g/kg sludge dry weight)	S.D.
1	0.1060	100	1,000	0.065	0.374	291.51	285.16	7.12
	0.1038	100	1,000	0.065	0.350	277.46		
	0.1054	100	1,000	0.065	0.367	286.53		
2	0.1064	100	1,000	0.065	0.064	38.53*	55.26	1.19
	0.1029	100	1,000	0.065	0.079	54.42		
	0.1016	100	1,000	0.065	0.080	56.10		

หมายเหตุ *การตัดค่าที่สงสัยออก (Outlier)

ชุดการทดลองที่ 1 คือ การใช้อัลตร้าโซนิคในการสกัด

ชุดการทดลองที่ 2 คือ ชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

การหาความเข้มข้นของทองแดงในหน่วยกรัมต่อกิโลกรัม

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{[\text{Cu ที่ได้จากการวัด–แบลงค์}(mg/L)]\times 100\ mL \times 20{,}000 \text{ เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times \text{น้ำหนักสลัดจ์}\ (g) \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

$$\text{จากชุดทดลองที่ 1} = \frac{[0.374 - 0.065(mg/L)]\times 100\ mL \times 20{,}000 \text{ เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times 0.1060\ g \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

= 291.51 กรัมต่อกิโลกรัม

การตัดค่าที่สงสัยออก (Outlier) (Eachem.net)

1. เรียงลำดับข้อมูล ค่าที่สงสัยจะเป็นค่าที่สงสัย (outliers) คือ ค่าต่ำสุด หรือสูงสุด
2. คำนวณค่า Q (τ_{10})
3. เปรียบเทียบกับค่า Q ในตารางที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ
4. ถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าในตาราง ให้ตัดข้อมูลที่สงสัยนั้นทิ้งได้

สมการที่ใช้ในการทดสอบค่ามากที่สุด

$$\tau_{10} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$$

สมการที่ใช้ในการทดสอบค่าน้อยที่สุด

$$\tau_{10} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$$

จากสมการข้างต้นนี้จะใช้คำนวณข้อมูล 3 – 7 ข้อมูล นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางด้านล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.2 ค่า Q ที่ระดับความเชื่อมั่นต่างๆ

Risk of false rejection					
Statistic	**n**	**0.5 %**	**1 %**	**5 %**	**10 %**
τ_{10}	3	0.994	0.988	0.941	0.886
	4	0.926	0.889	0.765	0.679
	5	0.821	0.780	0.642	0.557
	6	0.740	0.698	0.560	0.482
	7	0.680	0.673	0.507	0.434

การคำนวณ

จากชุดการทดลองที่ 3 คือชุดควบคุม ค่าที่สงสัยคือ 38.53 กรัมต่อกิโลกรัมของสลัดจ์แห้ง เรียงลำดับข้อมูลได้เท่ากับ 38.53, 54.42 และ 56.10 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้ง ตามลำดับ

ทดสอบค่าสูงสุด

$$\tau_{10} = \frac{56.10 - 54.42}{56.10 - 38.53}$$

$$= 0.096$$

ทดสอบค่าต่ำสุด

$$\tau_{10} = \frac{54.42 - 38.53}{56.10 - 38.53}$$

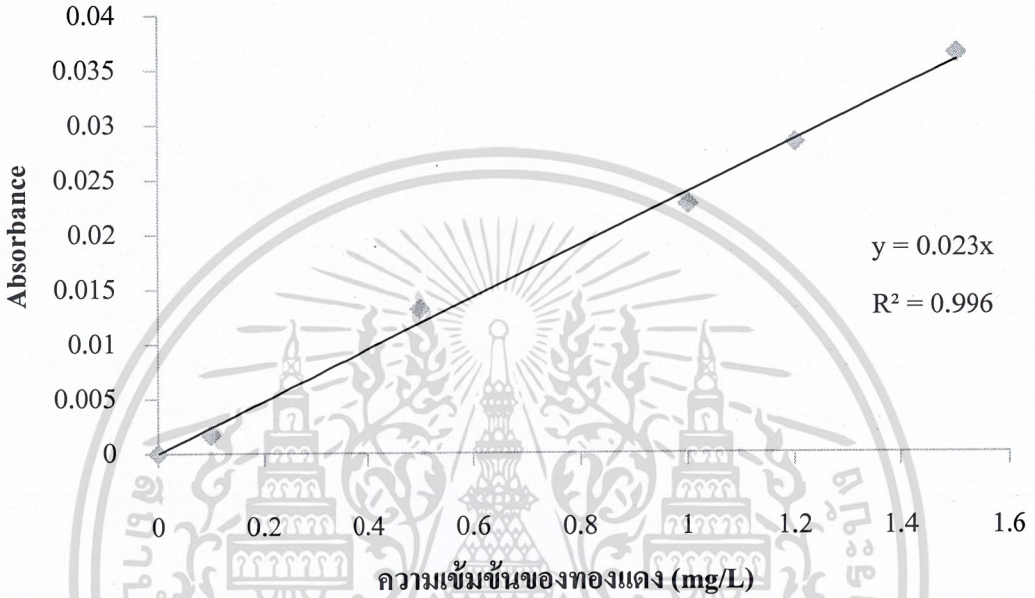
$$= 0.904$$

นำค่า 0.096 และ 0.904 มาเปรียบเทียบกับตารางที่ใช้ในการคำนวณนี้ โดยดูค่า n ที่ 3 และระดับความเชื่อมั่น 90 % พบว่ามีค่ามากกว่า จึงตัดค่า 38.53 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์แห้งทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

ข 2.1 ศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมในการชะทองแดง



รูปที่ ข-2.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง

ตารางที่ ข-2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่สกัดได้จากสลัดจ์โดยแปรค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเป็น 0.14, 0.39, 0.60, 1.06 และ 2.02 โมลต่อลิตร

H_2SO_4 (mol/L)	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Cu (mg/L)	Cu (g/kg sludge dry weight)	Avg. (g/kg sludge dry weight)	S.D.
0.14	0.1014	100	1,000	0.030	0.371	336.29	308.78	40.14
	0.1054	100	1,000	0.030	0.375	327.32		
	0.1081	100	1,000	0.030	0.314	262.72		
0.39	0.1073	100	1,000	0.046	0.386	316.87	350.18	34.29
	0.1025	100	1,000	0.046	0.403	348.29		
	0.1025	100	1,000	0.046	0.441	385.37		
0.60	0.1026	100	1,000	0.035	0.386	342.11		
	0.1011	100	1,000	0.035	0.416	376.85		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่สกัดได้จากสลัดจ์โดยแปรค่าความเข้มข้นของ กรดซัลฟิวริกเป็น 0.14, 0.39, 0.60, 1.06 และ 2.02 โมลต่อลิตร

H_2SO_4 (mol/L)	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Cu (mg/L)	Cu (g/kg sludge dry weight)	Avg. (g/kg sludge dry weight)	S.D.
0.60	0.1020	100	1,000	0.035	0.405	362.75	360.57	17.48
1.06	0.1060	100	1,000	0.029	0.430	378.20	379.84	7.31
	0.1031	100	1,000	0.029	0.414	373.42		
	0.1065	100	1,000	0.029	0.442	387.79		
2.02	0.1035	100	1,000	0.060	0.389	317.87	337.76	25.81
	0.1022	100	1,000	0.060	0.435	366.93		
	0.1032	100	1,000	0.060	0.399	328.49		

ตัวอย่างการคำนวณ

ความเข้มข้น Cu $= \frac{[\text{Cu ที่ได้จากการวัด} - \text{แบลงค์}(mg/L)] \times 100\ mL \times 20{,}000\ \text{เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times \text{น้ำหนักสลัดจ์}\ (g) \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$

ชุดทดลองที่ 0.14 M $= \frac{[0.371 - 0.030(mg/L)] \times 100\ mL \times 20{,}000\ \text{เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times 0.1014\ g \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$

$= 336.29$ กรัมต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข 2.2 การศึกษาสัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมในการชะทองแดง

ตารางที่ ข-2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงได้จากการชะสลัดจ์โดยแปรค่าสัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็น 10, 14.28, 20, 33.33, และ 100 กรัมต่อลิตร

สัดส่วน (g/L)	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Cu (mg/L)	Cu (g/kg sludge dry weight)	Avg. (g/kg sludge dry weight)	S.D.
10	0.1003	100	1,000	0.044	0.477	431.70	463.00	41.69
	0.1017	100	1,000	0.044	0.563	510.32		
	0.1009	100	1,000	0.044	0.495	446.98		
14.28	0.1006	100	1,000	0.113	0.405	290.26*	433.54	83.03
	0.1019	100	1,000	0.113	0.562	440.63		
	0.1013	100	1,000	0.113	0.545	426.46		
20	0.1023	100	1,000	0.010	0.557	534.70*	350.97	13.27
	0.1051	100	1,000	0.010	0.369	341.58		
	0.1024	100	1,000	0.010	0.379	360.35		
33.33	0.1006	100	1,000	0.024	0.518	491.05	476.07	20.36
	0.1049	100	1,000	0.024	0.532	484.27		
	0.1040	100	1,000	0.024	0.495	452.88		
100	0.1077	100	1,000	0.047	0.402	329.62	340.76	31.47
	0.1081	100	1,000	0.047	0.380	316.37		
	0.1071	100	1,000	0.047	0.450	376.28		

หมายเหตุ * คือ การตัดค่าที่สงสัยออก (Outlier)

ตัวอย่างการคำนวณ

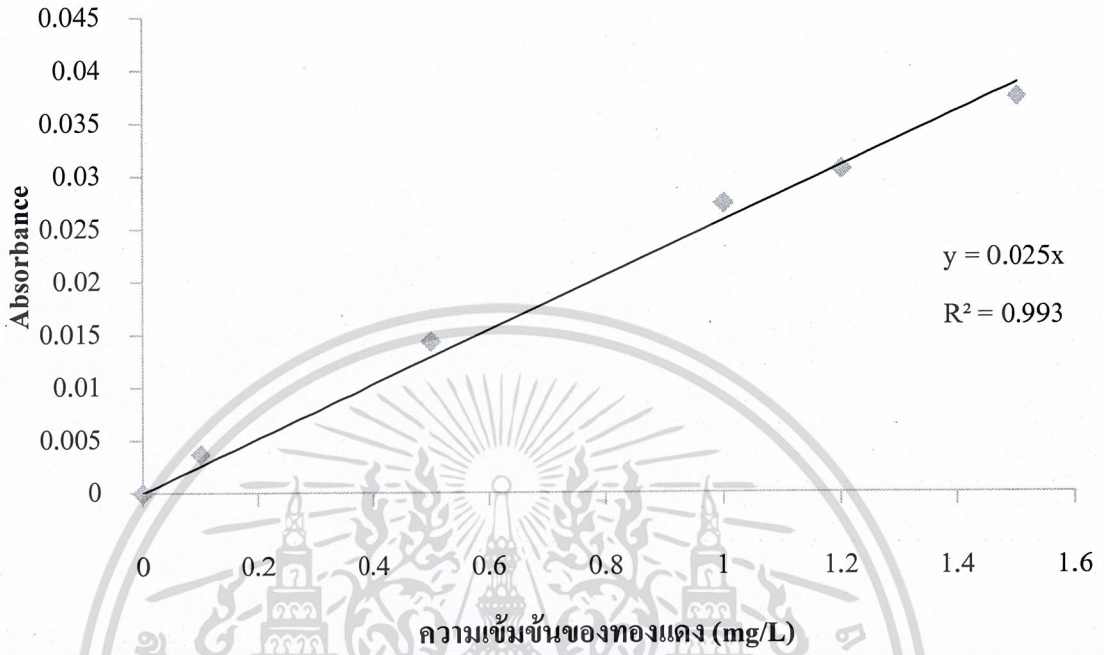
$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{[\text{Cu ที่ได้จากการวัด} - \text{แบลงค์}(mg/L)]\times 100\ mL \times 20{,}000\ \text{เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times \text{น้ำหนักสลัดจ์}\ (g) \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

$$\text{การทดลองสัดส่วน 100 g/L} = \frac{[0.402 - 0.047(mg/L)]\times 100\ mL \times 20{,}000\ \text{เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times 0.1077\ g \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

$$= 329.62\ \text{กรัมต่อกิโลกรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข 2.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมของการสกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคในการชะทองแดง



รูปที่ ข-2.3 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง

ตารางที่ ข-2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่ได้จากการชะสลัดจ์โดยแปรค่าเวลาที่ใช้ในการสกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค 5, 10 และ 15 นาที

เวลา (min)	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Cu (mg/L)	Cu (g/kg sludge dry weight)	Avg. (g/kg sludge dry weight)	S.D.
5	0.1080	100	1,000	0.207	0.743	496.30*	316.28	5.94
	0.1089	100	1,000	0.207	0.556	320.48		
	0.1051	100	1,000	0.207	0.535	312.08		
10	0.1026	100	1,000	0.215	0.920	687.13	505.50	162.17
	0.1079	100	1,000	0.215	0.705	454.12		
	0.1042	100	1,000	0.215	0.606	375.24		
15	0.1041	100	1,000	0.153	0.677	503.36	512.24	49.06
	0.1023	100	1,000	0.153	0.632	468.23		
	0.1044	100	1,000	0.153	0.743	565.13		

หมายเหตุ * คือ การตัดค่าที่สงสัยออก (Outlier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{[\text{Cu ที่ได้จากการวัด}-\text{แบลงค์}(mg/L)]\times 100\ mL \times 20{,}000\ \text{เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times \text{น้ำหนักสลัดจ์}\ (g) \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

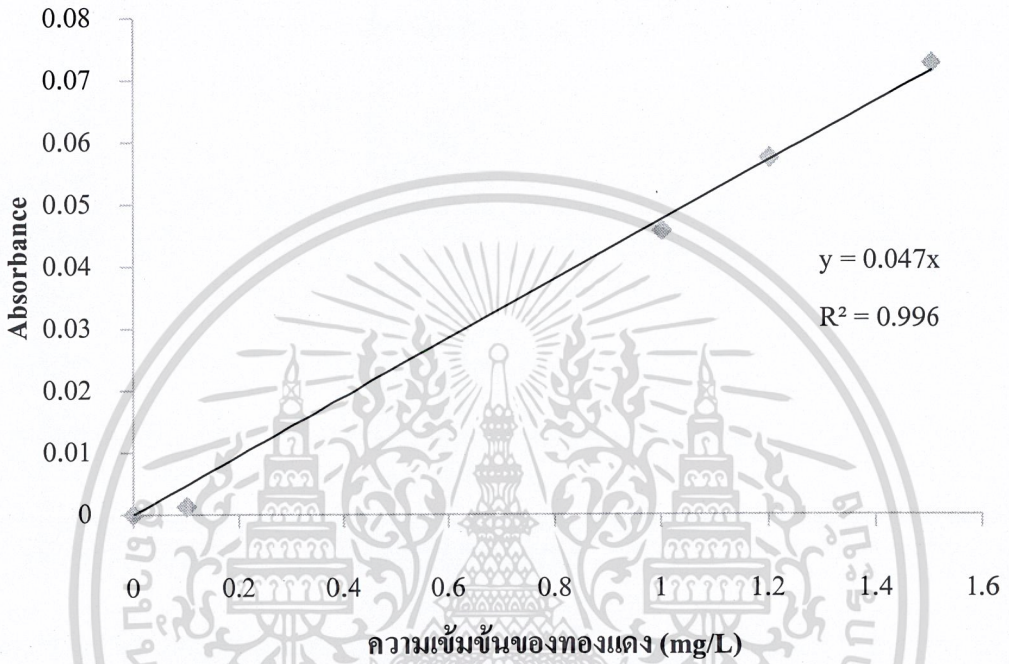
$$\text{จากผลที่เวลา 5 นาที} = \frac{[0.743 - 0.207(mg/L)]\times 100\ mL \times 20{,}000\ \text{เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times 0.1080\ g \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

$$= 496.30 \text{ กรัมต่อกิโลกรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 การศึกษาประสิทธิภาพการชะทองแดงจากสลัดจ์ด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

ข 3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่ได้จากการชะสลัดจ์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ ข-3.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง

ตารางที่ ข-3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่ได้จากการชะสลัดจ์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม

ชุดทดลอง	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Cu (mg/L)	Cu (g/kg sludge dry weight)	Avg. (g/kg sludge dry weight)	S.D.
1	0.1070	100	1,000	0.041	0.527	454.21	455.04	36.23
2	0.1012	100	1,000	0.041	0.565	517.79*		
3	0.1020	100	1,000	0.041	0.506	455.88		

หมายเหตุ * คือ การตัดค่าที่สงสัยออก (Outlier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

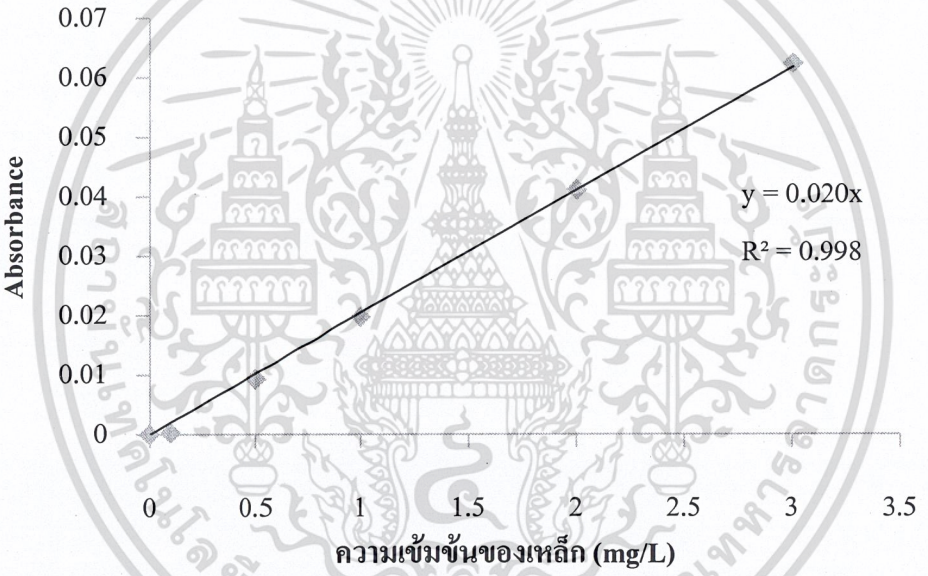
ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{[\text{Cu ที่ได้จากการวัด} - \text{แบลงค์}(mg/L)] \times 100\ mL \times 20{,}000 \text{ เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times \text{น้ำหนักสลัดจ์}\ (g) \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

$$\text{จากชุดทดลองที่ 1} = \frac{[0.527 - 0.041(mg/L)] \times 100\ mL \times 20{,}000 \text{ เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times 0.1070\ g \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

$$= 454.21 \text{ กรัมต่อกิโลกรัม}$$

ข 3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่ได้จากการชะสลัดจ์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ ข-3.2 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก

ตารางที่ ข-3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่ได้จากการชะสลัดจ์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม

ชุดทดลอง	สลัดจ์ (g)	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	แบลงค์ (mg/L)	Fe (mg/L)	Fe (g/kg sludge dry weight)	Avg. (g/kg sludge dry weight)	S.D.
1	0.1070	100	1,000	0.024	0.168	134.58		
2	0.1012	100	1,000	0.024	0.184	181.82	160.04	23.83
3	0.1020	100	1,000	0.024	0.167	163.73		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้น Fe} = \frac{[Fe \text{ ที่ได้จากการวัด} - \text{แบลงค์}(mg/L)] \times 100\ mL \times 20{,}000 \text{ เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times \text{น้ำหนักสลัดจ์}\ (g) \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

$$\text{จากชุดทดลองที่ 1} = \frac{[0.168 - 0.024(mg/L)] \times 100\ mL \times 20{,}000 \text{ เท่า} \times 1{,}000\ g \times 1\ g}{1{,}000\ mL \times 0.1070\ g \times 1kg \times 1{,}000\ mg}$$

= 134.58 กรัมต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.3 ผลของประสิทธิภาพในการชะทองแดงและเหล็กจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

สาร	ความเข้มข้นทั้งหมดในสลัดจ์ (g/kg sludge dry weight)	การทดลอง	ความเข้มข้นที่ชะได้ (g/kg sludge dry weight)	ประสิทธิภาพในการการชะ (%)	Avg. (%)	S.D.
Cu	750.67	1	454.21	60.51	60.62	0.16
		2	517.79*			
		3	455.88	60.73		
Fe	193.66	1	134.58	69.49	82.62	12.31
		2	181.82	93.89		
		3	163.73	84.55		

หมายเหตุ * คือ การตัดค่าที่สงสัยออก (Outlier)

ตัวอย่างการคำนวณ

ประสิทธิภาพในการชะทองแดง

$$= \frac{\text{ความเข้มข้นของทองแดงที่ชะได้จากสภาวะที่เหมาะสม}}{\text{ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมด}} \times 100\ \%$$

แทนค่า

ประสิทธิภาพในการชะทองแดง $= \frac{454.21}{750.67} \times 100\ \%$

$= 60.51\ \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ที่ความเข้มข้น 0.14, 0.39, 0.60, 1.06 และ 2.02 โมลต่อลิตร

ตารางที่ ค-1 การวิเคราะห์ ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8453.761	4	2113.440	2.772	.087
Within Groups	7623.306	10	762.331		
Total	16077.067	14			

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ค่า Sig = 0.087 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) นั่นคือ ข้อมูลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ค.2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยการใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ที่สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็น 10, 14.28, 20, 33.33 และ 100 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ ค-2.1 การวิเคราะห์ ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	43510.429	4	10877.607	13.261	.001
Within Groups	6562.122	8	820.265		
Total	50072.551	12			

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ค่า Sig = 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) นั่นคือ มีข้อมูลอย่างน้อย 1 คู่ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.2 การทดสอบ Duncan

group	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
100	3	340.7567	
20	2	350.9650	
14.28	2		433.5450
10	3		463.0000
33.33	3		476.0667
sig		0.701	0.150

ตารางที่ ค-2.3 การแปรผล Duncan

สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก (กรัมต่อลิตร)		ผลการทดสอบทางสถิติ
10.00	14.28	ND
	20.00	D
	33.33	ND
	100.00	D
14.28	10.00	ND
	20.00	D
	33.33	ND
	100.00	ND
20.00	10.00	D
	14.28	D
	33.33	D
	100.00	ND
33.33	10.00	ND
	14.28	ND
	20.00	D
	100.00	D
100.00	10.00	D
	14.28	D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนสลัดจ์ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก (กรัมต่อลิตร)		ผลการทดสอบทางสถิติ
100.00	20.00	ND
	33.33	D

* ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ค.3 ผลที่ได้จาการทดสอบสมมติฐาน โดยการใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ที่เวลาที่ใช้ในการชะโดยการใช้อัลตร้าโซนิค 5, 10 และ 15 นาที

ตารางที่ ค-3 การวิเคราะห์ ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	55703.608	2	27851.804	2.424	.184
Within Groups	57445.395	5	11489.079		
Total	113149.003	7			

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ค่า Sig = 0.184 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) นั่นคือ ข้อมูลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้