

การนำทองแดงจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่
ด้วยสารละลายอีดีทีเอและกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก

**RECOVERY OF COPPER FROM ELECTROPLATING SLUDGE
BY EDTA AND CEMENTATION WITH IRON POWDER**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-016-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**RECOVERY OF COPPER FROM ELECTROPLATING SLUDGE BY
EDTA AND CEMENTATION WITH IRON POWDER**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL-2010-SC-M-016-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การนำทองแดงจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่
ด้วยสารละลายอีดีทีเอและกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก
Recovery of copper from electroplating sludge by EDTA and cementation
with iron powder

นักศึกษา นายวิรัช ชันดี
รหัสประจำตัว 49068151
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
ผศ.ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวศ	
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2553 เวลา 9.30 – 12.30 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่



(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณณี ธนะบริพัตน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 17 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 53

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ 17 เดือน มิ.ย. พ.ศ. 53
ถึงชื่อ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำทองแดงจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ด้วยสารละลายอีดีทีเอและกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก
นักศึกษา	นายวิชัย ชันดี
รหัสประจำตัว	49068151
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาการนำโลหะทองแดงออกจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่โดยการสกัดด้วยสารละลายอีดีทีเอ และตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลายสกัด โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็กเพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและลดปริมาณของเสียอันตราย การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสลัดจ์ 2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์โดยใช้สารละลายอีดีทีเอ 3) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลาย Cu-EDTA โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก และ 4) ศึกษาการนำสารละลายอีดีทีเอกลับมาใช้สกัดทองแดงซ้ำ โดยวิธีตกตะกอนเหล็ก (II) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายอีดีทีเอ ปริมาณสลัดจ์ พีเอชในการสกัดและระยะเวลาในการสกัด พีเอชในกระบวนการซีเมนเตชัน สัดส่วนโดยโมล Fe : Cu จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์คือ ใช้สารละลายอีดีทีเอความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ จำนวน 20 มิลลิลิตรที่พีเอช 8 ในการสกัดสลัดจ์ 0.5 กรัม เป็นเวลา 9 ชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมในการแยกทองแดงออกจากสารละลาย Cu-EDTA คือ ปรับพีเอชเป็น 2 และอัตราส่วนโดยโมลผงเหล็กต่อทองแดงที่ใช้เท่ากับ 6:1 จากการวิเคราะห์ทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ มากกว่า 90% นอกจากนี้ยังสามารถนำสารละลายอีดีทีเอกลับไปใช้ซ้ำในการสกัดทองแดงได้มากกว่า 5 ครั้งโดยมีประสิทธิภาพการสกัดทองแดงมากกว่า 90 %

คำสำคัญ : กระบวนการซีเมนเตชัน, ทองแดง, ผงเหล็ก, สลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า, สารละลายอีดีทีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Recovery of Copper from Electroplating Sludge by EDTA and Cementation with Iron Powder
Student	Mr. Wichai Kantee
Student ID.	49068151
Degree	Master of Science
Program	Environmental Chemistry
Year	2010
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon

ABSTRACT

This research studied a recovery of copper from electroplating sludge using EDTA extraction and cementation process with powdered iron. The objectives of this study are to recover copper from electroplating sludge and reduce amounts of toxic waste. The experiment was divided into four steps: 1) to study physical and chemical characteristics of sludge 2) to extract copper from electroplating sludge using EDTA solution 3) to precipitate copper metals from extracting solution by cementation with iron powders and 4) to recover EDTA solution by precipitating iron (II) with sodium hydroxide. The influences of EDTA concentration, amounts of sludge, pH of extraction solution, extraction time, pH of solution in cementation process, mole ratio of Fe: Cu were examined. The results showed that extraction 0.5 grams of sludge with 20 ml of 0.2 M EDTA at pH 8 for 9 hours were the optimum conditions for copper extraction. The use of iron powder to copper 6:1 by mol under pH 2 were the optimum conditions of cementation process. It was found that more than 90% of copper metals were recovered. In addition, EDTA could be recovered for re-use 5 times with extraction efficiency of greater than 90 %.

Keywords: Cementation process, Copper metals, Iron powder, Electroplating sludge, EDTA solution,

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ อาจารย์สุจิตรา สุคนธมัต และ ผศ.ชูใจ กุฬารัตนไชย ที่ได้ขอแนะนำในการคำนวณทางสถิติ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เสวภาค สุขตระกูลเวส อาจารย์ประจำภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณสินชัย ถนอมรอด และคุณจักรกฤษณ์ ชูตเจือเงิน ASPOCOMP (Thailand) Co., Ltd. ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างสตั๊ดจ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณะครู โรงเรียนกะทู้วิทยา จังหวัดภูเก็ต ทุกท่านที่ให้โอกาสและให้กำลังใจมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าได้ทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ภรรยาและบุตรธิดาที่รักยิ่งเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งน้อง ๆ ปริญญาโทสาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายวิชัย ชันดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทองแดง.....	4
2.1.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	4
2.1.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์.....	6
2.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	7
2.1.4 ประโยชน์ของทองแดง.....	9
2.1.5 ความเป็นพิษของทองแดง.....	9
2.1.6 การศึกษารูปทองแดงโดยสกัดแบบลำดับขั้น.....	10
2.2 กระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า.....	12
2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์.....	15
2.2.2 การบำบัดสลัดจ์.....	16
2.3 การกำจัดโลหะหนักโดยการตกตะกอนทางเคมี.....	17
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนทางเคมี.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ประเภทของกระบวนการชะละลายโลหะหนักออกจากตะกอน.....	20
2.4.1 กระบวนการทางชีวภาพ.....	20
2.4.2 การชะโลหะหนักโดยกระบวนการทางเคมี.....	21
2.4.3 การชะโลหะด้วยสารละลายคีเลตติ้งเอเจนต์.....	22
2.4.4 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอิตีทีเอกับคอปเปอร์.....	26
2.5 กระบวนการเกิดซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก.....	26
2.5.1 กระบวนการเกิดซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก.....	30
2.5.2 การตก Cu ออกจากสารละลาย Cu-EDTA.....	31
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	34
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	34
3.1.1 อุปกรณ์.....	34
3.1.2 สารเคมี.....	34
3.1.2 แหล่งที่มาของสลัดจ์.....	35
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์.....	36
3.2.1.1 วิธีการเตรียมสลัดจ์.....	36
3.2.1.2 การศึกษาสมบัติของสลัดจ์.....	37
3.2.1.3 การศึกษารูปของทองแดงในสลัดจ์ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น.....	38
3.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ด้วยเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด.....	40
3.2.2.1 ศึกษาความเข้มข้นอิตีทีเอที่เหมาะสม.....	40
3.2.2.2 ศึกษาสัดส่วนสลัดจ์ต่อสารละลายอิตีทีเอโดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	41
3.2.2.3 ศึกษาระยะเวลาสกัดที่เหมาะสม.....	42
3.2.2.4 ศึกษาพีเอชของสารละลายอิตีทีเอที่เหมาะสม.....	42
3.2.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการสกัดทองแดง.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.5 การแยกทองแดงออกจากสารละลายเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซีติก โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็กในงานวิจัยนี้ใช้วิธีของ (Chang et al, 2007).....	43
3.2.3.1 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม.....	43
3.2.3.2 ศึกษาสัดส่วนโดยโมลของเหล็กต่อทองแดงที่เหมาะสม.....	44
3.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของสารละลายเอทิลีน ไดเอมีน เตตระอะซีติกแอซิดในการสกัดทองแดง.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	47
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์.....	47
4.1.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์.....	47
4.1.2 ผลการศึกษาสัดส่วนของทองแดงในรูปแบบต่างๆ ที่ยึดเกาะในสลัดจ์โดยการสกัด แบบลำดับขั้น.....	49
4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์โดยใช้เออีทีเอ.....	50
4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเออีทีเอที่เหมาะสม.....	50
4.2.2 ผลของปริมาณน้ำหนักสลัดจ์ที่เหมาะสม.....	51
4.2.3 ผลของเวลาสกัดสลัดจ์ที่เหมาะสม.....	52
4.2.4 ผลของพีเอชของสารสกัดที่เหมาะสม.....	53
4.3 สภาวะที่เหมาะสมและการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลายเออีทีเอ โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก.....	54
4.3.1 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการซีเมนเตชัน.....	54
4.3.2 ผลของสัดส่วนเหล็กต่อทองแดงโดยโมลที่เหมาะสม.....	55
4.3.3 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	56
4.3.4 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของผลึกทองแดง.....	58
4.4 ผลการศึกษาการนสารละลายเออีทีเอกลับมาใช้ซ้ำ.....	59
4.4.1 ผลพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนเหล็ก.....	59
4.4.2 ผลประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของสารละลายเออีทีเอในการสกัดทองแดง ออกจากสลัดจ์.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์.....	70
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ของ โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายอีดีทีเอและการนำทองแดง กลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการซีเมนเตชัน.....	75
ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	87
ภาคผนวก ง. วิธีการคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กต่อทองแดงและอีดีทีเอต่อทองแดง.....	97
ภาคผนวก จ. หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	107

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะทองแดง.....	6
2.2 ข้อมูลศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐานของทองแดง.....	7
2.3 ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของครึ่งเซลล์ที่ 25°C.....	8
2.4 แหล่งกำเนิดสารพิษที่มาจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยไฟฟ้า.....	14
2.5 ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะบางชนิด.....	18
2.6 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	20
2.7 คุณสมบัติของ EDTA.....	23
2.8 ค่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะต่าง ๆ.....	25
3.1 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสัลดิจ.....	38
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสัลดิจ.....	48
ก-1.1 อนินทรีย์วัตถุในตัวอย่างสัลดิจ.....	71
ก-1.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชของตัวอย่างสัลดิจโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	72
ก-1.3 ผลการศึกษาค่าไออาร์พีของตัวอย่างสัลดิจโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	72
ก-1.4 ความเข้มข้นของคอปเปอร์ทั้งหมดในสัลดิจตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	72
ก-2.1 ผลการศึกษารูปของคอปเปอร์ที่พบในสัลดิจแห่งจาก โรงงานผลิตแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์.....	73
ข-1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์ที่สกัดได้จากสัลดิจโดยแปรค่าความเข้มข้น สารละลายอีดีทีเอ 0.05 M, 0.1 M, 0.2 M, 0.3 M.....	76
ข-1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์ที่สกัดได้จากสัลดิจโดยแปรค่าน้ำหนักสัลดิจ 0.1 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 กรัม.....	77
ข-1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์ที่สกัดได้จากสัลดิจโดยแปรค่าเวลาในการสกัด ที่ 1, 3, 6, 9, 12, 24 ชั่วโมง.....	78
ข-1.4 ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายอีดีทีเอที่เหมาะสมในการสกัดคอปเปอร์ออก จาสัลดิจของ โรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	79
ข-1.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการสกัดทองแดงด้วยสารละลายอีดีทีเอในสภาวะที่เหมาะสม.....	80
ข-2.1 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนทองแดงโดยกระบวนการซีเมนต์ชันที่ อัตราส่วน โมลเหล็กต่อทองแดงเท่ากับ 8:1	81

ข-2.2 ผลการศึกษาอัตราส่วน โดยโมลของผงเหล็กต่อคอปเปอร์ที่เหมาะสมในการตกตะกอน ทองแดงโดยกระบวนการซีเมนเตชันที่พีเอช 2.....	82
ข-2.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการตกตะกอนทองแดงโดยกระบวนการซีเมนเตชัน ที่สภาวะเหมาะสม.....	83
ข-3.1 การตกตะกอนเหล็ก Fe ออกจาก EDTA-Fe หาความบริสุทธิ์ EDTA โดยแปรค่า 9, 10, 11, 12, 13 และ 14.....	84
ข-3.2 การใช้ EDTA ซ้ำ ครั้งที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ผลของประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของสารละลายยัติที่เอ ในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์.....	85
ข-3.3 ปริมาณ DOC ของสารละลายยัติที่เอบริสุทธิ์และสารละลายยัติที่เอที่ใช้ซ้ำ วิเคราะห์ด้วย เครื่อง TOC.....	86
ค-1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA เมื่อแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายยัติที่เอที่ 0.05M, 0.1M, 0.2M และ 0.3M.....	88
ค-2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA เมื่อแปรค่าน้ำหนัก ของสลัดจ์ที่ 0.1, 0.5, 1.5, 1.0 และ 2.0.....	89
ค-3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA เมื่อแปรค่าเวลาในการสกัดเป็น 1, 3, 6, 9, 12, 24, ชั่วโมง.....	90
ค-4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA เมื่อแปรค่าพีเอชที่ 5, 6, 7, 8 และ 9.....	91
ค-5 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของ pH ที่ 1, 2, 3 และ 4 เพื่อตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลาย Cu-EDTA.....	92
ค-6 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ปริมาณผงเหล็กต่อคอปเปอร์ 1:1, 2:1, 4:1, 6:1, 8:1, 10:1.....	93
ค-7 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการ ตกตะกอน Fe ออกจาก EDTA-Fe หาความบริสุทธิ์ EDTA โดยแปรค่า 9, 10, 11, 12, 13 และ 14.....	94
ค-8 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการ ใช้ EDTA ซ้ำ ครั้งที่ 1, 2, 3, 4 และ 5.....	95
ค-9 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ความ บริสุทธิ์ของการใช้ EDTA ซ้ำ ครั้งที่ 1, 2, 3, 4 และ 5.....	96
ง-1 ค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบโลหะ.....	93

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผงวงจรไฟฟ้า.....	13
2.2 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า (Coombs, 1990).....	16
2.3 ขั้นตอนการกำจัดตะกอน.....	17
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลายของโลหะหนักต่าง ๆ.....	19
2.5 โครงสร้างของ EDTA.....	23
2.6 ค่า pH ต่ำสุดที่สามารถเกิดคีเลตชันกับโลหะชนิดต่างๆ ด้วย EDTA อย่างมีประสิทธิภาพ.....	25
2.7 โครงสร้างของไอออนเชิงซ้อนระหว่าง Cu^{2+} กับ EDTA	26
2.8 ขั้นตอนปฏิกิริยาซีเมนเตชัน (Strickland และ Lawson, 1973).....	27
2.9 รูปแบบของการเกิดซีเมนเตชัน (Khudenko, 1984).....	28
3.1 ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	35
3.2 ตัวอย่างสลัดจ์ก่อนทำการทดลอง.....	36
3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสลัดจ์.....	37
3.4 การศึกษารูปของทองแดงในสลัดจ์ด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น.....	39
3.5 แสดงสถานะที่เหมาะสม เพื่อหาปริมาณ Cu จากตัวอย่างสลัดจ์.....	46
4.1 เปรียบเทียบของธาตุต่างๆในสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า วิเคราะห์โดย XRF.....	49
4.2 สัดส่วนของรูปทองแดงที่พบในสลัดจ์ จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	50
4.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายอีดีทีเอต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์.....	51
4.4 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	52
4.5 ผลของเวลาในการสกัดต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์.....	53
4.6 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์.....	54
4.7 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนทองแดง.....	54
4.8 ผลของสัดส่วนโดยโมลของผงเหล็กต่อทองแดงต่อประสิทธิภาพในการแยกทองแดง.....	56
4.9 ความบริสุทธิ์ของทองแดงที่ตกตะกอนได้.....	57
4.10 ภาพถ่าย SEM ของผลึกทองแดงที่ได้จากกระบวนการซีเมนเตชัน.....	58
4.11 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากสลัดจ์โดยใช้ขี้สารละลายยีสต์ที่เอ.....	61
4.13 ความบริสุทธิ์ของสารละลายยีสต์ต่อจำนวนครั้งที่ทำการทดลอง.....	61
จ.1 แสดงการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	100
จ.2 แสดงขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย.....	101



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ XI อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
ml.	มิลลิลิตร
ml/g.	มิลลิกรัมต่อกรัม
g/Kg	กรัมต่อกิโลกรัม
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
mol/l	โมลต่อลิตร
mV	มิลลิโวลต์
pK _a	ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรด
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
K _{sp}	ค่าคงที่สมดุลการละลาย
Abs	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
S.D.	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
% RSD	ร้อยละของการเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
% recovery	ร้อยละการกลับคืนของสาร
N/A	ไม่มีข้อมูล (Not Available)
ND	ไม่สามารถอ่านค่าได้ (Not Detect)
Log K _{sp}	ลอการิทึมของค่าคงที่สมดุลการละลาย
°C	องศาเซลเซียส
H ₀	สมมุติฐานหลัก
EDTA	เอททิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด
XRD	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรค โทมิเตอร์
XRF	เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
SEM	เครื่องสแกนนิ่งอิมีชันไมโครสโคป
PCB	แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed circuit board)
E ^o _{cell}	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์
E ^o	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์
BCR	Bureau Communautaire de Reference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed circuit board, PCB) เป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น กระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย การชุบโลหะทองแดงบนแผ่นลาร์มินิต และการสกัดทองแดงออกให้เป็นเส้นวงจรไฟฟ้า ดังนั้น น้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตนี้ จึงมีโลหะทองแดงและโลหะหนักอื่น ๆ ปนอยู่เป็นจำนวนมาก จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยทั่วไป ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นิยมใช้การตกตะกอนโลหะหนักด้วยด่าง ดังนั้น สลัดจ์ที่ตกตะกอนจึงมีทองแดงและโลหะหนักอื่น ๆ ปนอยู่เป็นจำนวนมาก จัดเป็นของเสียอันตรายที่ต้องมีการกำจัดอย่างถูกวิธี และเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูง ก่อให้เกิดเหตุการณ์ลักลอบทิ้งของเสียอันตราย (จินดา, 2551) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษระหว่างปี พ.ศ. 2547-2549 พบว่ามีปริมาณของเสียอันตราย สูงถึง 1 ล้าน 8 แสน ตัน ซึ่งร้อยละ 55 จัดเป็นของเสียอันตราย ที่ไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธี (รังสรรค์, 2550) การนำโลหะหนักกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น การสกัดโลหะทองแดงออกจากสลัดจ์ ปัจจุบันนิยมใช้วิธีการล้างตะกอนดินด้วยสารละลายเอทีอี โคเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด (อีดีทีเอ) (Nair *et al.*, 2008 ; Abumaizar and Smith, 1999 ; Sun *et al.*, 2001; Petas, 1999; Neale *et al.*, 1997) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม สารละลายอีดีทีเอมีราคาสูงและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Tejowulan and Hendershot, 1998; Kari and Giger, 1996) การนำสารละลายอีดีทีเอกลับมาใช้ซ้ำ จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสกัดโลหะและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้ ศึกษาการนำโลหะทองแดงจากสลัดจ์ของโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่ โดยการสกัดด้วยสารละลายอีดีทีเอ และตกตะกอนทองแดงโดยกระบวนการซีเมนต์ชันด้วยผงเหล็ก และการนำสารละลายอีดีทีเอกลับมาใช้ใหม่โดยการตกตะกอนเหล็ก (II) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายอีดีทีเอ, ปริมาณสลัดจ์, พีเอชในการสกัด, ระยะเวลาในการสกัด, พีเอชในการเกิดซีเมนต์ชันด้วยผงเหล็ก, อัตราส่วน โดยโมลของเหล็กต่อทองแดง รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของสารละลายอีดีทีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายอีดีทีเอ
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกโลหะทองแดงออกจากสารละลายสกัดอีดีทีเอ โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก
3. ศึกษาประสิทธิภาพการนำสารละลายอีดีทีเอกลับมาใช้ใหม่ในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสลัดจ์จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF) และวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในสลัดจ์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)
2. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโลหะทองแดงออกจากสลัดจ์ โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายอีดีทีเอที่ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 โมลาร์ ปริมาณสลัดจ์ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 กรัม ระยะเวลาในการสกัด 3, 6, 9, 12, 24 ชั่วโมง และพีเอชในการสกัด 5, 6, 7, 8, 9 โดยวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
3. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกโลหะทองแดงออกจากสารละลายอีดีทีเอ โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก โดยแปรค่าพีเอชที่ 1, 2, 3, 4 และอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กต่อทองแดง ที่ 2:1, 4:1, 6:1, 8:1, 10:1 โดยวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) และวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของทองแดงที่สกัดได้ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD) และวิเคราะห์อัตราส่วนของทองแดงด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กโตรไมโครสโคป (SEM)
4. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำสารละลายอีดีทีเอกลับมาใช้ซ้ำ โดยแปรค่าพีเอชในการตกตะกอนเหล็กด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ววิเคราะห์การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลาย (Dissolution organic carbon, DOC) ด้วยเครื่อง Total Organic Carbon (TOC)
5. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของสารละลายอีดีทีเอในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ โดยเปรียบเทียบกับสารละลายอีดีทีเอบริสุทธิ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้โลหะทองแดงที่สกัดได้จากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นการนำทรัพยากรกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ และลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ
2. ได้สถานะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ โดยใช้สารละลายยัธิตีเอ และการแยกทองแดงออกจากสารละลายยัธิตีเอ โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก
3. ได้สารละลายยัธิตีเอกลับมาใช้ซ้ำในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์
4. ลดความเป็นพิษของสลัดจ์จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
5. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

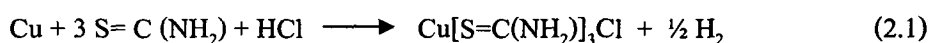
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีประโยชน์มากชนิดหนึ่ง และเป็นโลหะหนึ่งใน 2- 3 ชนิดที่อาจพบในรูปของโลหะตามธรรมชาติ ทองแดงมีสีส้มค่อนข้างแดง สามารถตีให้แผ่เป็นแผ่นบางๆได้ง่าย ทำให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ หรือทำให้เป็นเส้นลวดเล็ก ๆ ได้ นอกจากนี้ ยังไม่สึกกร่อนอย่างรวดเร็วในอากาศ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ทองแดงเป็นโลหะที่มีคุณค่ามากในการนำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ทองแดงถูกค้นพบทั้งในรูปอิสระ และในรูปสารประกอบของซัลไฟด์ ออกไซด์ และคาร์บอเนต สิ้นแร่พื้นฐานของทองแดงคือ chalcopyrite (CuFeS_2), bornits (Cu_3FeS_4) (Cordova *et al.*, 2008) โดยทั่วไปในธรรมชาติจะพบทองแดงในรูป chalcopyrite (CuFeS_2), chalcocite (Cu_2S), cuprite (Cu_2O), tenorite (CuO), malachite ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), azurite ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), brochantite ($\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$) และในดินพบทองแดง 20-30 มิลลิกรัมต่อลิตร (Graf *et al.*, 2007) ในดินตะกอนพบทองแดงปริมาณ 57 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำผิวดินพบทองแดง 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

ทองแดงเป็นธาตุทรานสิชันตัวแรกของหมู่ IB ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.546 ในตารางธาตุทองแดงอยู่ระหว่างธาตุนิเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) และมีธาตุอยู่ในกลุ่มเดียวกัน เรียกว่ากลุ่มโลหะ Coinage คือธาตุเงินและทอง ค่า Electronic configuration ของทองแดงคือ $[1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6] 3d^{10} 4s^1$ หรือ [Argon] $3d^{10} 4s^1$ (<http://th.wikipedia.org/wiki>) โดยทั่วไปทองแดงจะไม่ทำปฏิกิริยาและไม่ละลายใน Non oxidizing acid เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ค่า Oxidation potential ของปฏิกิริยาคือ -0.34 V ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แต่ทองแดงจะละลายใน Oxidizing acid เช่น กรดไนตริก (HNO_3) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือในสารละลายไทโอยูเรีย ($=\text{C}(\text{NH}_2)_2$) ได้สารละลายที่เสถียร คือ Cu^+ ดังปฏิกิริยาที่ 2.1



เมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน (O_2) และตัวทำละลาย เช่น แอมโมเนีย (NH_3) จะได้ Cu^{2+} (Keskitalo *et al.*, 2007) ดังปฏิกิริยาที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนของทองแดงมีเลขออกซิเดชัน +1, +2, +3 แต่โดยทั่วไปจะพบทองแดงที่มีเลขออกซิเดชัน +1 (cuprous ion) และ +2 (cupric ion) เท่านั้น ซึ่งในสารละลายคิวปริกไอออน (Cu^{2+}) จะเสถียรกว่า คิวปรัสไอออน (Cu^+) เนื่องจากคิวปรัสไอออนจะเกิดออกซิเดชันและรีดักชันได้ง่ายกว่า แต่ความเสถียรของทั้ง Cu^+ และ Cu^{2+} ขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนลบหรือลิแกนด์ ค่าคงที่ในการละลาย และชนิดของอะตอมในผลึกด้วย (<http://www.science.mju.ac.th/chemistry>)

Cu^+ มี Electronic Configuration เป็น [Argon] $3d^{10}$ ปกติจะไม่มีสี เพราะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มใน d-shell การที่มีสีปรากฏในสารประกอบของ Cu^+ เนื่องจากแสงวิสิเบิลทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจาก Cu^+ d orbital ไปสู่ orbital ที่ว่างของลิแกนด์ หรือเกิดจากสีในตัวของลิแกนด์เอง สารประกอบ Cu^+ ประกอบด้วยโมเลกุลหรือไอออน 2 หรือมากกว่า 2 จำนวนลิแกนด์ (Coordination number) ส่วนมากจะเท่ากับ 4 Coordination number 2 และ 3 พบน้อย ขณะที่ Coordination number 5 พบยากมาก และ Coordination number 6 ไม่เคยพบเลย

Cu^{2+} มีอิเล็กตรอนใน d-shell ไม่เต็ม ทำให้เกิดสารเชิงซ้อนใน Cu^{2+} มีสีและแสดงสมบัติแม่เหล็กเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ไม่เข้าคู่ สมบัติแม่เหล็กนี้ทำให้โครงสร้างสารเชิงซ้อนของ Cu^{2+} บิดเบี้ยวอย่างชัดเจน เกือบของ Cu^{2+} ละลายได้ดีในน้ำ และในตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เช่น เมทานอล (metanol) และอะซิโตไนไตรล์ (acetonitrile)

ทองแดงกระทบต่อสภาพแวดล้อมในสภาพธรรมชาติ แร่ปฐมภูมิของทองแดงเกิดอยู่ในรูปซัลไฟด์เป็นจำนวนมาก แร่เหล่านี้ละลายตัวได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพกรด ทำให้ทองแดงถูกปลดปล่อยออกมาในรูปไอออน ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับธาตุโลหะหนักอื่นๆ ทองแดงจึงจัดได้ว่าเป็นพวกเคลื่อนที่ได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำและตะกอนดินบริเวณฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) พบทองแดงมีค่าเกินค่ามาตรฐาน และเป็นโลหะหนักที่สะสมมากที่สุดใต้น้ำ (สารโรจน์, 2550)

เมื่อหินหรือแร่กลายสภาพมาเป็นดิน ทองแดงเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับแร่และอินทรียสารในดินได้ง่าย จึงสามารถตกตะกอนได้กับแอนไอออนหลายชนิด เช่น ซัลไฟด์ คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ โดยทั่วไป ทองแดงจะสะสมในดินชั้นบน และถูกดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคของแร่ดินเหนียวในดิน และเกิดคีเลตกับสารอินทรีย์ ในกรณีที่เกิดดังกล่าวอยู่ในสภาพละลายได้หรือในดิน เนื้อหยาบก็อาจจะพบว่ามี การสะสมทองแดงในดินชั้นล่างได้ โดยเกิดจากการละลายของสารประกอบทองแดงจากแหล่งน้ำในธรรมชาติแต่เป็นเพียงส่วนน้อย ส่วนใหญ่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การใช้ทองแดงในอุตสาหกรรมโลหะผสม โดยเฉพาะทองเหลือง การถลุงแร่ทำให้ทองแดงฟุ้งกระจายขึ้นไปในอากาศแล้วถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชยากำจัดเชื้อราในดิน การเติม CuSO_4 เพื่อควบคุมการเจริญของสาหร่ายในอ่างเก็บน้ำ ทำให้เกิดการ

สะสมของทองแดงในแหล่งน้ำ (Mc Neely และคณะ, 1998) โดยปริมาณทองแดง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถเป็นพิษต่อปลาในแหล่งน้ำนั้นได้ และที่ระดับสูงกว่านี้จะทำให้น้ำมีรสชาติ (Sawyer and McCarty, 1978) ดังนั้น กระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ให้มีปริมาณทองแดงอยู่ได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (<http://www.pcd.go.th>) จากประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2537) ออกตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง กำหนดให้ทองแดงมีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุม, 2548)

2.1.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

ทองแดงมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะทองแดง

โลหะทองแดง	คุณสมบัติทางฟิสิกส์
สี	แดงหรือส้ม
ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า	0.15328 โอห์มเมตรต่อกรัม ที่ 20 °C
ค่าการนำไฟฟ้า	60.0 เมตรต่อโอห์ม ตารางมิลลิเมตร
ค่าความแข็ง	35 x 10 ³ นิวตันต่อตารางเมตร
จุดหลอมเหลว	1,083 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2,595 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	8.9592 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 °C
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	1.65x10 ⁻⁵ ที่ 20 °C
ค่าความร้อนจำเพาะของของแข็ง	0.092 แคลอรีต่อกรัม ที่ 20 °C
ค่าความร้อนจำเพาะของของเหลว	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>.

2.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

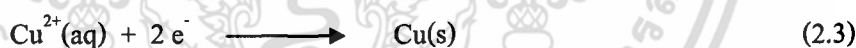
ศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐานของทองแดง (Standard electrode potentials) แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐานของทองแดง

ปฏิกิริยา	E° (Volts)
$\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+} + 2 e^- \rightleftharpoons \text{Cu} + 4 \text{NH}_3$	- 0.05
$\text{Cu}^{2+} + e^- \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	0.167
$2\text{CuCl} + e^- \rightleftharpoons 2\text{Cu} + 2 \text{Cl}^-$	0.19
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.3448
$\text{Cu}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.522
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{I}^- + e^- \rightleftharpoons \text{CuI}_2$	0.690
$\text{Cu}^{2+} + \text{I}^- + e^- \rightleftharpoons \text{CuI}$	0.377

ที่มา : ชัยวัฒน์, 2536

ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานไอออนแต่ละชนิดต่างมีแนวโน้มที่จะชิงอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า หรือถูกรีดิวซ์ได้แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการแบบรีดักชันได้ดังปฏิกิริยาที่ 2.3 (อินทริา, 2539) ถ้าปฏิกิริยาใดมีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันสูง แสดงว่าสามารถชิงอิเล็กตรอนได้ดี



ศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ใด ๆ ที่สภาวะมาตรฐาน คือที่อุณหภูมิ 25 °C ความเข้มข้นของสารละลาย 1 โมล และความดัน 1 บรรยากาศ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์ ใช้สัญลักษณ์เป็น E° ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของครึ่งเซลล์

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ (E°_{cell}) คือ ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันของสารที่ถูกรีดิวซ์และสารที่ถูกออกซิไดส์ โดยศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์ที่เป็นฝ่ายรับอิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายเป็นบวก และศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์ที่เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอน จะมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงดังสมการที่ 2.4

$$E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ_{\text{แคโทด}} - E^\circ_{\text{แอโนด}} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 ถ้าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ (E°_{cell}) มีค่ามากกว่า จะทำหน้าที่เป็นขั้วคาโทด (Cathod: ขั้วไฟฟ้าที่มีปฏิกิริยารีดักชัน) การใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของครึ่งเซลล์มีประโยชน์ในการศึกษาปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้า เช่น บอกได้ว่าสารหรือไอออนใดเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีหรือเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี ตลอดจนบอกได้ว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ตามทิศทางที่กำหนดในสมการเคมี ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (E°_{cell}) ของธาตุต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ของธาตุต่าง ๆ ที่ 25°C

Half-Reaction	E° (volts)
$\text{Li}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.05
$\text{K}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{K}$	-2.92
$\text{Ba}^{2+} + e^- \rightleftharpoons \text{Ba}$	-2.90
$\text{Ca}^{2+} + e^- \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2.76
$\text{Na}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Na}$	-2.71
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.37
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.67
$\text{Mn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mn}$	-0.83
$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.83
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.76
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0.74
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.44
$\text{PbSO}_4 + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	-0.36
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0.25
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0.14
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0.13
$\text{Fe}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.14
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.00
$\text{AgCl} + e^- \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$	0.22
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Hg}^+ + 2\text{Cl}^-$	0.27

ที่มา : LaGrege *et al.*, 1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ประโยชน์ของทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะสีแดง มีลักษณะเป็นก้อน ไม่มีกลิ่น มีสมบัติการนำไฟฟ้าสูง และมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น Cu ประมาณมากกว่า 50% ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสายไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์และเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า อุตสาหกรรมชุบ-เคลือบโลหะ อุตสาหกรรมเครื่องประดับและอีกประมาณ 20% ใช้ทำเครื่องมือถ่ายเทความร้อน เช่น condenser, evaporator และอื่น ๆ ทองแดงยังใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ (Cu + Ag) ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ ปลอกกระสุน รั้ง (Cu + Sn) สปริงชนิดต่าง ๆ (ทำจากบรอนซ์ ดีบุก ผสมฟอสฟอรัส) การ์บูเรเตอร์ (Cu + Sn + Zn + Pb) บูชและแบร็ง เป็นต้น นอกจากนี้ ยังใช้ทองแดงเป็นส่วนประกอบของยารักษาโรค ยาฆ่าเชื้อรา ยาแก้แมลง อุตสาหกรรมทอผ้า ผลิตภัณฑ์เซรามิก (Hammond, 1990)

2.1.5 ความเป็นพิษของทองแดง

ทองแดงในรูปของก้อนโลหะจะไม่ติดไฟ แต่หากอยู่ในรูปของผงโลหะจะสามารถติดไฟได้ เมื่อถูกความร้อนจะให้ไอโลหะหรือฟุ้งที่เป็นพิษ (copper fumes) เมื่อได้สัมผัสทำให้ระคายเคือง ผื่นหรือผองทองแดงอาจมีผลทำให้ระคายเคืองตาและตาบอดได้ การหายใจไอโลหะหรือฟุ้งของทองแดงอาจทำให้เกิดไข้โลหะ (metal fume fever) ได้ ซึ่งจะมีอาการระสมโลหะในปาก เป็นไข้หนาวสั่น ปวดศีรษะ ไอ เจ็บหน้าอก ซึ่งอาการอาจแสดงในเวลา 2-3 ชั่วโมง หรือภายใน 1-2 วัน ภายหลังจากได้รับสารนี้ทำให้ระคายเคืองจมูกและอาจทำให้จมูกเป็นแผลได้ ทำให้เป็นโรคมะเร็งที่ผิวหนัง โดยจะมีอาการผื่นแดงและคัน ผิวหนังบาง ผดและผิวหนังอาจเปลี่ยนเป็นสีเขียวคล้ำ ถ้าได้รับทองแดงเป็นระยะเวลาสั้นและในระดับความเข้มข้นสูงมากจะมีผลทำลายตับได้

ผลเสียของทองแดงจากการศึกษาการปนเปื้อนของทองแดงปริมาณสูงในนา บริเวณเหมืองทองแดงในประเทศญี่ปุ่นพบว่า ทำให้ปริมาณแบคทีเรียในดินลดลง แต่มีผลต่อปริมาณเชื้อราไม่มาก อย่างไรก็ตาม นาในบริเวณเหมืองทองแดงที่ได้รับน้ำจากแหล่งที่มีปริมาณทองแดงปนเปื้อนในดิน 30-50 ppm (<http://www.tnhpit.com/mahidol>) พบว่า วัชพืชที่ทนต่อพิษของทองแดงจะสะสมทองแดงไว้ที่ราก แต่ปริมาณทองแดงในใบไม่เพิ่มขึ้น แต่ทองแดงเป็นพิษต่อพืชได้ง่าย คือถ้าหากเกิดการสะสมทองแดงเป็นปริมาณสูงในรากพืช จะทำให้พืชหยุดการเจริญเติบโตและแคระแกร็น และเมื่อมีสิ่งมีชีวิตมากินวัชพืชเหล่านี้จะทำให้เกิดการสะสมของทองแดงในเนื้อเยื่อในปริมาณที่สูงขึ้น ผลเสียของทองแดงต่อมนุษย์ โอกาสที่จะพบทองแดงในดินแล้วเป็นอันตรายต่อมนุษย์นั้นแทบจะไม่มีเลย

2.1.6 การศึกษารูปของทองแดงโดยสกัดแบบลำดับขั้น

การสกัดแบบลำดับขั้นเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษารูปและปริมาณของโลหะในดิน (Mosso and Davidson, 2003) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการสกัด แต่ละลำดับของการสกัดและปริมาณของโลหะที่ออกมาในแต่ละขั้นสามารถนำไปทำนายพฤติกรรมของโลหะที่เป็นพิษในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังทำให้เข้าใจเคมีของดินที่สัมพันธ์ระหว่างโลหะและชนิดของดินมากยิ่งขึ้น ประสิทธิภาพของการสกัดแบบลำดับขั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือ การเลือกหรือเรียงลำดับการใช้สารสกัดที่เหมาะสมในแต่ละส่วน หรือขั้นตอนของการสกัด ระดับความแรงของสารสกัดที่ต้องเพิ่มขึ้นในแต่ละลำดับขั้น เพื่อสามารถสกัดโลหะที่อยู่ในรูปต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและลดการปนเปื้อนระหว่างขั้น ระยะเวลาของการสกัดแต่ละขั้นเพื่อให้เพียงพอสำหรับการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้ ยังรวมถึงความเข้มข้นของสารสกัด อัตราส่วนของสารสกัดและตัวอย่าง พีเอช และอุณหภูมิ (Kaasalainen and Yli-Halla, 2003)

วิธีการและสารเคมีที่ใช้ในการสกัดลำดับขั้นมีอยู่หลายวิธีการในที่นี้จะกล่าวถึงการสกัดแบบลำดับขั้นตามวิธีที่ปรับปรุงจาก BCR (BCR Sequential Extraction) ซึ่งเป็นการสกัดแบบ 4 ลำดับขั้น เพื่อแยกโลหะที่สนใจออกเป็นส่วน ๆ ตามการใช้สารละลายสกัดที่ความแรงเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปริมาณโลหะที่ออกมาในแต่ละส่วนสามารถทำนายองค์ประกอบและพฤติกรรมของโลหะในสัจฉัตว์อย่าง การเคลื่อนที่ของโลหะขึ้นอยู่กับพีเอช ศักย์รีดอกซ์ และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิแกนด์ (Chang *et al.*, 2007; Nemati *et al.*, 2009) สรุปดังนี้

ขั้นที่ 1: ส่วนที่ละลายได้ในกรดอะซิติก (CH_3COOH) 1 โมลาร์ เป็นการชะโลหะที่จับอยู่กับคาร์บอเนต ซึ่งโลหะที่ถูกชะในขั้นนี้อยู่ในรูปคาร์บอเนตและในรูปการแลกเปลี่ยนไอออนที่ผิวสัจฉัตว์

ขั้นที่ 2: ส่วนที่ถูกรีดิวซ์โดยไฮดรอกซิลามีนไฮดรอกไซด์ ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) 0.5 โมลาร์ เป็นการสกัดโลหะที่ยึดเกาะอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก หรือแมงกานีสออกไซด์ในดินตะกอนหรือกากตะกอน ซึ่งรูปของออกไซด์นี้เรียกว่า รีดิวซ์เฟส โดยช่วงอยู่ระหว่าง amorphous และ crystalline

ขั้นที่ 3: ส่วนที่ออกซิไดซ์โดย 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) /1.0 M แอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAC) เป็นการสกัดโลหะหนักในดินและตะกอนที่เชื่อมอยู่กับสารอินทรีย์ การเกิดคีเลตภายใต้การสกัดแบบลำดับขั้น จะมีสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์เพื่อละลายสารอินทรีย์หรือสารที่ถูกออกซิไดซ์ได้ เช่น ออกไซด์และซัลเฟอร์ของโลหะบางตัว ทำให้ได้โลหะที่ถูกละลายออกจากการสกัด และนิยมใช้ H_2O_2 ที่ถูกทำให้มีสภาพความเป็นกรด เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ เนื่องจากอาจเกิดการดูดซับกลับอีกครั้งของโลหะที่ถูกสกัด หากมีสภาพที่สามารถออกซิไดซ์ได้ ดังนั้น ต้องควบคุมให้สารละลาย NH_4OAC เป็นกรดด้วย HNO_3 ที่ pH เท่ากับ 2 (Quevauviller *et al.*, 1994 ; Lacal *et al.*, 2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 4: การย่อยสลายกากตะกอนโดยใช้ HNO_3 65% ย่อยด้วยไมโครเวฟแล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ตามวิธีของ SW-846 Method 3050 (US EPA, 1996)

ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดลำดับชั้น (Tsang *et al.*, 2007)

การสกัดลำดับชั้นต้องมีการเรียงลำดับให้เหมาะสม เพื่อลดการเคลื่อนย้ายของสารละลายในแต่ละลำดับและความแตกต่างของไอออนที่สกัดให้มากที่สุด เพื่อป้องกันการสกัดที่ไม่สมบูรณ์และการดูดซับไอออนกลับ ไปอยู่ในสภาพเดิมก่อนการสกัด ดังนั้น การสกัดตามลำดับชั้นจึงมีปัจจัยที่ต้องควบคุม ดังนี้

1. การกระจายตัว

การกระจายตัวของตะกอนอาจจะใช้ Ultrasonic ตูบไมโครเวฟ หรือเครื่องเขย่า ทำให้ตะกอนกระจายตัว ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ปลดปล่อยและระยะเวลาในการบำบัด นอกจากนี้ การกระจายตัวของตะกอนต้องเหมาะสมกับตัวอย่างตะกอน

2. อัตราส่วนของตัวอย่าง

ความแตกต่างของอัตราสกัดตะกอนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของสารตัวอย่างกับสารสกัดตะกอน จากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้การคนอย่างรวดเร็วให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกับตะกอน การผสมกันของสารสกัดจะชะงักไปเล็กน้อยและหลีกเลี่ยงปัญหาชนิดรูปร่างภาชนะ ความเร็วของเครื่องเขย่า ทั้งนี้ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคและช่วยขจัดสารเคลือบของตัวอย่างด้วย วิธีนี้เป็นการเพิ่มปฏิริยาระหว่างสารสกัดกับตะกอน ทำให้มั่นใจได้ว่าการสกัดเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

3. ผลการเปลี่ยนพีเอช

ปฏิริยาระหว่างสารสกัดกับตะกอนตัวอย่างมักจะเกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ทำให้พีเอชของระบบการสกัดเปลี่ยน และมีผลกระทบต่อความเข้มข้นของธาตุที่ต้องการสกัด ดังนั้น เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงพีเอชของระบบการสกัด สารสกัดควรมีความเข้มข้นสูง

4. ความเข้มข้นของสารสกัด

จากการทดลองสกัด โลหะจากสารตัวอย่าง พบว่ามีการสูญเสียโลหะไปสู่ดิน โดยการดูดซับ ทำให้ผลการชะโลหะจากของแข็งต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้น เพื่อลดความผิดพลาดจากการดูดซับระหว่างการสกัด จึงใช้สารสกัดที่มีความเข้มข้นสูงพอที่จะเกิดปฏิริยาสมบูรณ์

5. อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบตะกอน ร้อยละความชื้น โดยกากตะกอนที่ศึกษาเป็นกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีคอปเปอร์ผสมอยู่ จากการศึกษา พบว่า เมื่อสภาวะอื่น ๆ คงที่ ค่าร้อยละของความชื้นลดลง ค่าการละลายจะลดลงด้วย (เก็จวิติ และคณะ, 2542) และถ้าอบตะกอนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการละลายลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายของตะกอน พบว่า ตะกอนที่อบเป็น

เวลานาน จะทำให้ความชื้นในตัวตะกอนระเหยออกไป ส่งผลให้ตะกอนจัดเรียงตัวกันแน่นขึ้น การละลายจึงลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดตะกอน จึงต้องปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับสารสกัดตะกอน

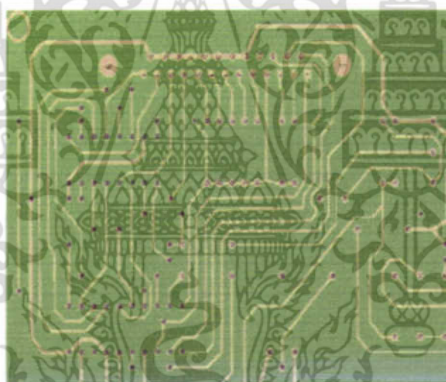
6. ระยะเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล (Anxiang *et al.*, 2004)

การสกัดอาศัยการสัมผัสกันระหว่างตะกอนตัวอย่างกับสารสกัด ดังนั้น ระยะเวลาที่ตะกอนสัมผัสกับสารสกัดต้องเพียงพอที่จะเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยา โดยปกติการควบคุมสถานะในการทดลองนั้น พบว่าปัจจัยทางองค์ประกอบของตัวอย่างมีผลมากกว่าปัจจัยทางจลนศาสตร์

2.2 กระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า

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

แผงวงจรไฟฟ้า (Printed circuit boards, PCB) เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆ บนแผ่น thin fiber epoxy ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แผงวงจรที่ได้จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ รวมทั้งเครื่องไฟฟ้าภายในบ้าน



รูปที่ 2.1 แผงวงจรไฟฟ้า

แผงวงจรไฟฟ้าสามารถจำแนกเป็น 4 ประเภท

1. Single-Sided Boards แบบที่มีลายวงจรเพียงหน้าเดียว
2. Double-Sided Boards แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดลายวงจรสองด้าน
3. Multi-Layer Boards แผ่นวงจรพิมพ์หลายชั้น
4. Flexible Circuit PCB แผ่นวงจรชนิดอ่อน เห็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานเฉพาะที่

ขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

1. Artwork Generation ทำอาร์ตเวิร์คด้วยคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่า Electronic Computer Aided Design จะได้ไฟล์เพื่อใช้ทำ PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Drilling หลังจากได้มาสเตอร์อาร์ตเวิร์ดแล้ว นำแผ่น PCB เปล่าชนิดสองหน้ามาเจาะรูด้วยเครื่องเจาะอัตโนมัติ
3. Copper Plating นำ PCB ที่ผ่านการเจาะและล้างทำความสะอาด มาชุบทองแดงด้วยเคมี จะได้ชั้นทองแดงบาง ๆ เคลือบไว้ จากนั้น นำมาชุบทองแดงด้วยไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อเพิ่มความหนาของชั้นทองแดงที่เคลือบ
4. Laminate ทำความสะอาดแผ่น PCB แล้วรีดประกบด้วยแผ่นฟิล์ม ไวแสง
5. Exposure นำแผ่นฟิล์ม Artwork master มาประกบแผ่น PCB ทั้งสองด้านให้ตรงกับรูที่เจาะไว้ ถ่ายผ่านด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในระยะเวลาที่กำหนด
6. Resist Stripper นำ PCB ที่ได้จากการอัดแสง มาผ่านกระบวนการ Developing ซึ่งจะใช้น้ำยาเคมีทำให้เนื้อฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสงหลุดออกไป จะได้ PCB ที่มีฟิล์มขึ้นลาย แต่ลายนี้จะกลับตรงข้ามกัน โดยด้านที่ไม่ต้องการจะถูกหุ้มด้วยฟิล์ม ส่วนด้านที่ต้องการจะไม่มีฟิล์มและเห็นเป็นทองแดงอย่างชัดเจน
7. Tin/Lead Plating นำ PCB ที่มีลายฟิล์มเคลือบอยู่มาชุบดีบุกด้วยไฟฟ้า ซึ่งดีบุกก็จะติดเข้ากับส่วนที่นำไฟฟ้า
8. Etching ล้างชั้นของลายเส้น Dry-Film ที่เคลือบ PCB อยู่ออก จะได้แผ่น PCB ที่มีเส้นดีบุกเคลือบอยู่ โดยส่วนที่ไม่ต้องการจะเป็นทองแดงอย่างเดิม ทำการกัดทองแดงออกด้วยวิธีการทางเคมี
9. Solder Re-flow อบแผ่น PCB ด้วยไอน้ำมันร้อน
10. Solder Resist ทำการพิมพ์ซิกสกรีนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ผ่านกระบวนการ Solder Reflow มาแล้วด้วยสีพิเศษที่มีคุณสมบัติทนความร้อน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของไฟฟ้า
11. Inspection ขั้นตอนสุดท้ายที่สำคัญ คือ การตรวจสอบความบกพร่อง ของ PCB

ในกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ จะเกิดน้ำเสียในขั้นตอนการล้างชิ้นงาน การชุบชิ้นงาน การกัดทำลายลายวงจรไฟฟ้า รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตทั้งหมดสภาพใช้งาน ซึ่งจะมี ความเข้มข้นของโลหะแตกต่างกัน ดังนี้

1. กระบวนการเตรียมชิ้นงาน น้ำเสียที่เกิดจากการล้างชิ้นงาน เป็นน้ำเสียที่เจือจาง
2. กระบวนการทำลายลายทองแดง (exposure + developer step)
3. การล้างชั้นฟิล์มออกจากชิ้นงาน ซึ่งล้างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์
4. การล้างชิ้นงานหลังจากล้างชั้นฟิล์มออก
5. กระบวนการกัดเนื้อทองแดงที่ไม่ต้องการ (etching step) ซึ่งมีทั้งสารเคมีที่เป็นด่าง (ammonical /alkaline solution) หรือมีคุณสมบัติเป็นกรด H_2SO_4 / H_2O_2 หรือ $CuCl_2/HCl$ โดยน้ำเสียที่ได้มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การล้างชิ้นงานที่ผ่านการกัดทองแดง

7. กระบวนการชุบแบบใช้ไฟฟ้าและไม่ใช้ไฟฟ้า (Electro Plating และ Electroless Plating)

ในกระบวนการชุบแบบใช้ไฟฟ้า อาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยสารละลาย $\text{CuSO}_4 / \text{H}_2\text{SO}_4$ ซึ่งเมื่อหมดอายุการใช้งาน น้ำเสียที่ได้จะมีสมบัติเป็นกรด และมีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก ในกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า อาศัยกระบวนการทางเคมีซึ่งประกอบด้วย $\text{CuSO}_4 / \text{CH}_2\text{O} / \text{NaOH}$ ซึ่งจะได้ น้ำเสียที่มีความเป็นด่างและมีทองแดงที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับฟอร์มัลดีไฮด์

8. น้ำเสียที่เกิดจากการล้างชิ้นงานจากกระบวนการต่าง ๆ จะมีความเข้มข้นของโลหะต่ำกว่า แต่จะมีปริมาณมาก ส่วนใหญ่จะถูกนำกลับมาใช้ โดยอาศัยเทคนิคการแยกทองแดงและโลหะอื่น ออกจากน้ำเสีย วิธีที่นิยมใช้ คือ ion exchange resin ส่วนน้ำเสียที่เกิดจากสารเคมีในกระบวนการกัด (etching) และการชุบ (plating) ที่หมดอายุซึ่งมีความเข้มข้นของสารเคมีมากกว่าน้ำเสียจากการล้างและมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ โดยน้ำเสียที่มี chelating agent ปะปน ก็จะแยกไปบำบัด ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ต่อไป

ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะ มีความเป็นพิษ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แหล่งกำเนิดสารพิษจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

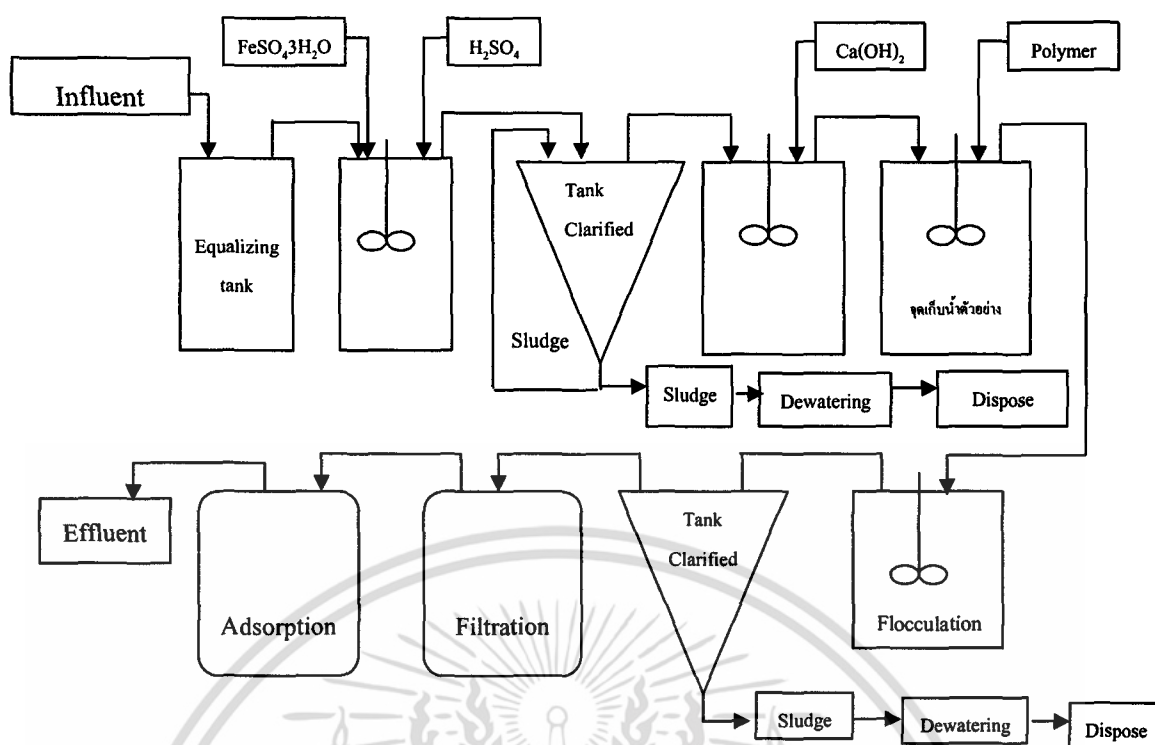
	สารที่เป็นพิษ	แหล่งกำเนิด	วิธีบำบัด
น้ำมัน	สารประเภทไขมัน	การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ	การแยกไขมัน
ของแข็ง	ยาขัด ทRAY	การขัดและการยิงทราย	การตกตะกอน
กรด	กรดกำมะถัน กรดเกลือ กรดไนตริก กรดกัดแก้ว กรดฟอสฟอริก กรดน้ำส้ม	การจุ่มกรดกระตุ้นผิว การขัดเงาด้วยสารเคมี	ทำให้เป็นกลาง
ด่าง	โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซัลเฟต โซดาไฟ โซเดียมฟอสเฟต	ต้มล้างไขมัน กัดผิว-อลูมิเนียม	ทำให้เป็นกลาง
ไซยาไนด์	สารประกอบไซยาไนด์ต่าง ๆ	ล้างด้วยไฟฟ้าหรือจากถังชุบ	ทำกาออกซิเดชัน โดยใช้สาร ประเภทคลอรีน

ที่มา : สิรินุช (2547)

2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์

มีขั้นตอนการบำบัดดังนี้

1. น้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกรวบรวมและส่งไปบ่อรวมน้ำเสียซึ่งทำหน้าที่ รวบรวมและปรับสภาพให้น้ำเสียมีคุณสมบัติค่อนข้างคงที่ น้ำเสียที่อยู่ในถังนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์จำพวก photosensitive organic monomer โลหะต่าง ๆ และ chelating agent ในถังปรับสภาพนี้ จะมีความเข้มข้นของน้ำเสียสูงสุด
2. หลังจากผ่านถังปรับสภาพ น้ำเสียจะผ่านไปสู่ถังปรับพีเอชด้วยกรด H_2SO_4 ให้มีค่าพีเอชประมาณ 2 – 4
3. น้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชแล้วจะถูกส่งไปยังถังเติม $FeSO_4 \cdot 3H_2O$ เพื่อตกตะกอน Chelating agent ต่าง ๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียและมีการเติมอากาศ หลังจากการเติม $FeSO_4 \cdot 3H_2O$ แล้ว น้ำเสียจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอน $Fe(OH)_3$ ออกไป โดยปล่อยให้ไหลล้นออกจากถังไปเข้าสู่ถังเติมค่า
4. ถังเติมค่าเป็นถังสำหรับตกตะกอนโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย โดยในถังนี้จะควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียระหว่าง 9 – 10.5 ด้วยการเติมปูนขาว หลังจากที่มีค่าพีเอชคงที่แล้ว โลหะที่ปะปนในน้ำเสียจะตกตะกอนอยู่ในรูปของแข็งแขวนลอย
5. น้ำเสียที่มีตะกอนไฮดรอกไซด์แขวนลอยอยู่ จะถูกส่งไปยังถังเติมพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มขนาดของตะกอนสำหรับจับตะกอนของไฮดรอกไซด์ โดยกระบวนการ Flocculation ซึ่งมีทั้งถึงกวนเร็วและกวนช้า ทั้งไว้ให้ตะกอนจมตัวลงในถัง Thickener
6. หลังจากทีตะกอนจมตัวลงแล้ว จะเกิดการแยกชั้นของน้ำใสและตะกอนจะตกอยู่ที่ก้น ถัง น้ำส่วนใสที่ด้านบนจะไหลล้นไปสู่ถังกรอง
7. ถังกรองทำหน้าที่กรองของแข็งที่ยังแขวนลอยปะปนอยู่กับน้ำเสีย ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ถังถ่านกัมมันต์ เพื่อกำจัดโลหะที่ยังหลงเหลืออยู่ในสภาพไอออนต่อไป
8. ถังถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่กำจัดโลหะที่ยังอาจปะปนอยู่ในน้ำเสียอยู่ด้วยกระบวนการดูดติดผิว (Adsorption) เมื่อน้ำเสียที่ผ่านออกจากถังถ่านกัมมันต์นี้ จะถูกตรวจสอบก่อนที่จะปล่อยออกไปสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (effluent)
9. ตะกอนในข้อ 6 จะผ่านเครื่องรีดน้ำเพื่อกำจัดน้ำออก จะได้ตะกอนที่มีโลหะปนเปื้อนจากกระบวนการบำบัดข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียได้ ดังรูปที่ 2.2



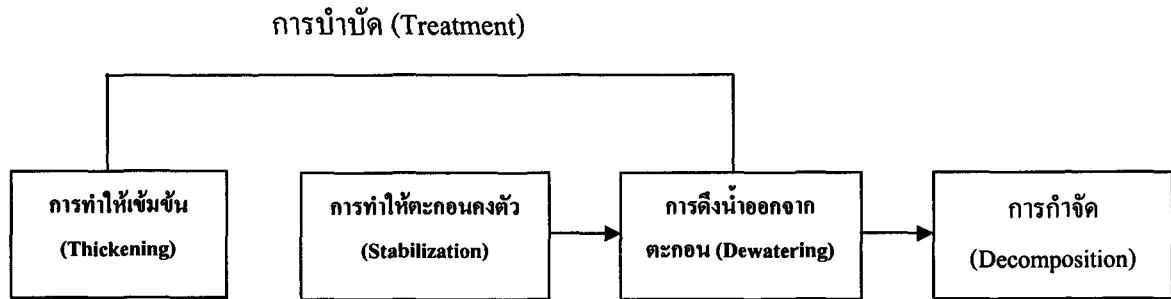
รูปที่ 2.2 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า (Coombs, 1990)

2.2.2 การบำบัดสลัดจ์

สลัดจ์ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการทางชีววิทยาหรือการบำบัดทางเคมี

1. สลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical sludge) เกิดจากการตกตะกอนของแข็งที่แขวนลอยหรือละลายน้ำออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการเคมีที่เรียกว่า การสร้างตะกอน (Coagulation) และตกตะกอน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเสียในรูปไอออน จะอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการตกตะกอนไอออนของโลหะเหล่านั้นให้อยู่ในรูปเกลือ เช่น เกลือไฮดรอกไซด์ หรือเกลือซัลไฟด์ เป็นต้น ส่วนในกรณีสารแขวนลอยจะอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการทำให้สารแขวนลอยเหล่านั้นเป็นกลางและจับตัวเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำ (Chudoba, *et al* 1982) โดยตะกอนเหล่านี้มีความเข้มข้นประมาณ 3-4% (30,000-40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

2. สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา (Bio-sludge) ส่วนใหญ่เป็นตะกอนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์จากการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ ตะกอนเหล่านี้สามารถตกตะกอนออกจากน้ำเสียในถังตกตะกอน ขั้นตอนในการบำบัด แสดงดังรูปที่ 2.3

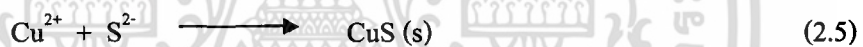


รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการกำจัดตะกอน

2.3 การกำจัดโลหะโดยการตกตะกอนทางเคมี

เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปสารละลายให้อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายน้ำของสารนั้น ซึ่งมีหลายวิธีโดยอาจใช้เป็นกระบวนการใด กระบวนการหนึ่งหรือหลายกระบวนการร่วมกัน

1. การตกผลึกเนื่องจากการเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายอยู่ในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยลง ซึ่งในการกำจัดโลหะก็อาจใช้หลักการนี้ได้ เช่น ในการกำจัดคอปเปอร์ที่ละลายในน้ำ (Cu^{2+}) จะเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซึ่งละลายน้ำได้ดีจะเกิดปฏิกิริยาได้คอปเปอร์ซัลไฟด์ (CuS) ซึ่งละลายน้ำน้อยมาก ดังปฏิกิริยาที่ 2.5



2. การตกผลึกเนื่องจากการเปลี่ยนสมดุลการละลาย (Solubility equilibrium) ในการกำจัดโลหะที่ละลายในน้ำด้วยวิธีนี้ ทำโดยการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอช จากการศึกษาพบว่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกำจัดโครเมียมอยู่ในช่วง 9 – 11 กำจัดทองแดงอยู่ในช่วง 7.5 – 11 กำจัดนิกเกิลอยู่ในช่วง 10.5 – 11 กำจัดสังกะสีอยู่ในช่วง 9.5 – 11 กำจัดทองแดงร่วมกับนิกเกิล และสังกะสีอยู่ในช่วง 9.5 – 11 (สารโรซ, 2535)

ในการกำจัดโลหะที่ละลายในน้ำด้วยวิธีนี้ ทำโดยการเติมด่างเพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้สูงขึ้น ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำ จะทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะ ทำให้เกิดเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ 2.6



โดยที่สถานะสมดุล ค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบ Cu(OH)_2 มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} ดังสมการที่ 2.7

$$K_{sp} = [\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^2 = 1.6 \times 10^{-19} \quad (2.7)$$

จะเห็นว่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์จะมีผลต่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงละลายโดยตรง คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์โดยการเพิ่ม pH ทำให้เกิดการลดความเข้มข้นของทองแดงละลายเพื่อรักษาสสมดุล ตัวอย่างค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.5

3. การเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัวหรือเกือบอิ่มตัวไปในทิศทางที่ทำให้มีค่าการละลายน้ำลดลง จนเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะของแข็ง เนื่องจากค่าการละลายน้ำขึ้นกับอุณหภูมิ

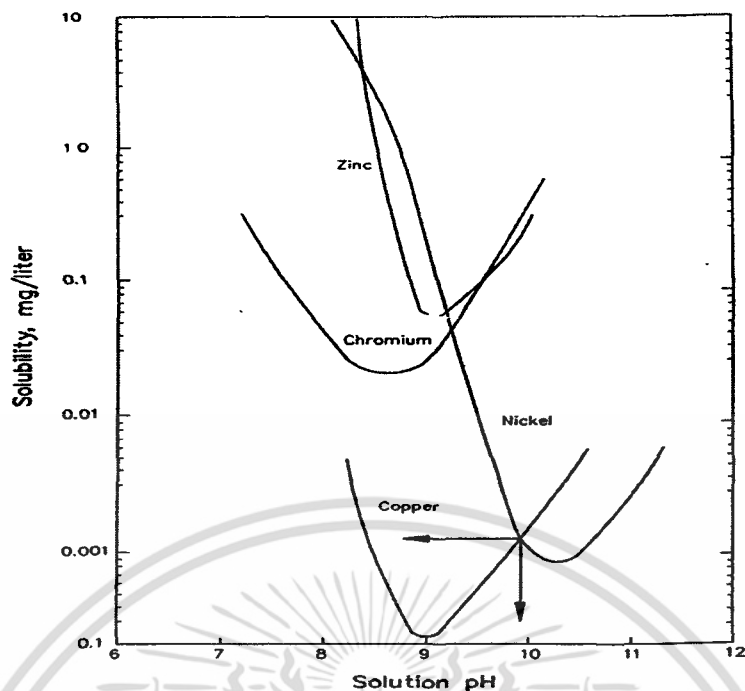
ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะบางชนิด

โลหะไฮดรอกไซด์	ค่าคงที่ผลคูณการละลาย (K_{sp})
$Al(OH)_3 \rightleftharpoons Al^{3+} + 3 OH^-$	1.0×10^{-32}
$Ca(OH)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2 OH^-$	5.0×10^{-9}
$Cd(OH)_2 \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2 OH^-$	2.0×10^{-14}
$Cr(OH)_3 \rightleftharpoons Cr^{3+} + 3 OH^-$	2.0×10^{-31}
$Cu(OH)_2 \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2 OH^-$	5.0×10^{-19}
$Fe(OH)_2 \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2 OH^-$	6.0×10^{-15}
$Mg(OH)_2 \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2 OH^-$	2.0×10^{-38}
$Ni(OH)_2 \rightleftharpoons Ni^{2+} + 2 OH^-$	2.0×10^{-12}
$Pb(OH)_2 \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2 OH^-$	2.5×10^{-18}
$Zn(OH)_2 \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2 OH^-$	8.0×10^{-18}

ที่มา : Sawyer, 1994

ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนเคมี (Eilbeck และ Mattock, 1998)

1. ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะ สารประกอบโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายน้ำที่ pH ต่างๆ ไม่เท่ากัน โลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก เช่น ทองแดง สังกะสี โครเมียม นิกเกิล เหล็ก จะละลายน้ำได้น้อยลง เมื่อ pH เพิ่มขึ้นจนถึง pH ค่าหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะนั้นต่ำที่สุด และเมื่อเลย pH นี้แล้วโลหะแอมโฟเทอริกจะกลับละลายน้ำได้มากขึ้นอีก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การกำจัดโลหะออกจากน้ำโดยการตกตะกอนทางเคมีให้มีปริมาณโลหะละลายเหลือต่ำกว่าค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดเป็นไปได้ยาก ยกเว้นแต่จะมีกลไกอย่างอื่นร่วมด้วย เช่น มีการดูดซับไอออนของโลหะบนตะกอนเคมี เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลายของโลหะหนักต่างๆ (มันสิน, 2542)

2. พีเอช (pH) สารช่วยในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ pH ช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่อยู่ในช่วงนี้จะทำให้ผลการตกตะกอนไม่ดีเท่าที่ควร

3. คุณสมบัติและชนิดของสารตกตะกอน (precipitant) สารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับสารหรือโลหะที่ต้องการตกตะกอนไม่เหมือนกัน รวมทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น การละลายของไอออนโลหะ (residual metal ion solubility) ลักษณะของตะกอน ความเร็วของการตกตะกอน ราคาและความยากง่ายในการใช้งาน ดังนั้น จึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

4. ปริมาณของสารตกตะกอน มีผลต่อความสามารถในการตกตะกอน เพราะในการละลายของสารประกอบใดๆ ถ้ามีค่าผลคูณของไอออน (ion product) น้อยกว่าค่า K_{sp} หรือค่าคงที่การละลายน้ำของสารนั้นแล้ว สารนั้นจะไม่ตกตะกอน แต่ถ้ามากกว่าค่า K_{sp} จะเกิดการตกตะกอน ดังนั้น ปริมาณของสารตกตะกอนที่ใช้จะต้องมากพอ โดยไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้เกิด resolubilization ได้

5. อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิขึ้นกับปฏิกิริยาการตกตะกอนทางเคมีว่าเป็นปฏิกิริยาคูดหรือคายความร้อน ถ้าเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนจะตกตะกอนเคมีได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะตกตะกอนเคมีได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

6. การกวน (mixing) เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำ ต้องมีความเร็วที่เหมาะสม การกวนเร็วช่วยให้สารเคมีกระจายได้อย่างทั่วถึง ส่วนการกวนช้า จะทำให้สารตกตะกอนทำปฏิกิริยากับสารหรือโลหะที่ต้องการตกตะกอนได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และทำให้มวลตะกอนรวมตัวเป็นตะกอนได้ดี มีความเสถียรสูง และสามารถแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนได้ง่าย ความเร็วของการกวนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับค่า G (velocity gradient) สำหรับการกวนเร็วค่า G ประมาณ 100-1,000 วินาที⁻¹ กวนช้า 10-75 วินาที⁻¹ เวลาในการกวนเร็ว 30-60 วินาที กวนช้า 15-30 นาที และค่า G สำหรับการกวนเร็วควรอยู่ในช่วง 3,000-60,000 และกวนช้าควรมีค่า G ประมาณ 10,000-100,000 (Peavy *et al.*, 1986)

7. สารประกอบเชิงซ้อน (Complexing agent) เช่น โซยาไนต์ แอมโมเนีย และ สารคีเลต เช่น EDTA สามารถเกิดอออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ และเสถียรกับโลหะหลายชนิด ในน้ำเสีย ซึ่งอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการตกตะกอนทางเคมีของโลหะ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักลดลง

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5 – 9.0
โซยาไนต์ (HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
สังกะสี (Zn^{2+})	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Cr^{3+})	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.
ทองแดง (Cu^{2+})	ไม่เกิน 2 มก./ล.
นิกเกิล (Ni^{2+})	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.

ที่มา : อุตสาหกรรม, 2543

2.4 ประเภทของกระบวนการชะละลายโลหะหนักออกจากตะกอน

กระบวนการชะละลายโลหะหนักออกจากตะกอนแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

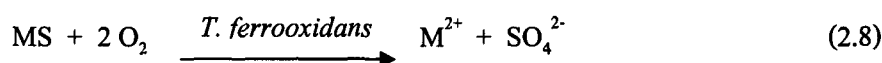
2.4.1 การชะโลหะหนักโดยกระบวนการทางชีวภาพ

เป็นกระบวนการชะละลายโลหะหนักโดยอาศัยกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่สร้างกรด ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นจะไปละลายโลหะหนักออกจากตะกอนอีกทีหนึ่ง จุลินทรีย์ที่ใช้ ได้แก่ จุลินทรีย์ในตระกูล *Thiobacillus* เช่น *Thiobacillus thiooxidans* จัดอยู่ในจุลินทรีย์ที่สร้างอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

1. แบบทางตรง (direct process) เป็นการเปลี่ยนโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายให้อยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์ที่ละลาย ดังปฏิกิริยาที่ 2.8



2. แบบทางอ้อม (indirect process) ในขั้นแรกโลหะซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์ด้วย Fe^{3+} ดังปฏิกิริยาที่ 2.9



จากนั้นแบคทีเรียจะออกซิไดซ์ซัลเฟอร์และเหล็ก (Fe (II)) ดังปฏิกิริยาที่ 2.10 และ 2.11 จากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มต้นใหม่ในปฏิกิริยาที่ 2.8 และ 2.9 เป็นวงจรต่อเนื่อง



วิธีการนี้ จะเกิดกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาที่ 2.10 ที่ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสลดลง ช่วยในการละลายของโลหะอีกทางหนึ่ง

2.4.2 การชะโลหะหนักโดยกระบวนการทางเคมี

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

ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายโลหะ คือ

1. ชนิดของกรด กรดเกลือ เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4), กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) สามารถละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ มีงานวิจัยที่บ่งบอกว่าความสามารถในการละลายโลหะทองแดงของกรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก มีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่กรดที่นิยมใช้ คือ กรดซัลฟูริก เนื่องจากเป็นกรดที่มีราคาถูกและง่ายในการกรองแยก

2. ปริมาณกรด ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นกับชนิดของตะกอน โดยเฉพาะปริมาณตะกอนแห้ง (dry matter) ซึ่งถ้าปริมาณตะกอนแห้งมีมาก ปริมาณกรดที่ใช้ในการละลายก็จะมากขึ้นด้วย
3. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ความสามารถในการละลายจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรด-เบส ลดลง ค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1-2 โดยถ้าค่าความเป็นกรด-เบส สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 9-10 โลหะทองแดงจะละลายได้น้อยที่สุด

2.4.3 การชะโลหะด้วยสารคีเลตติ้งเอเจนต์

คีเลตติ้งเอเจนต์ (Chelating agent) คือสารอินทรีย์ที่มีความสามารถผูกยึดไอออนบวกบางชนิดให้มาอยู่ร่วมกันอย่างเหนียวแน่นโดยไม่ยอมให้ไอออนอื่นเข้าทำปฏิกิริยา เช่น การทำปฏิกิริยาของจุลธาตุไอออนบวกกับไฮดรอกไซด์หรือซัลเฟตไอออน เป็นต้น

สมบัติโดยทั่วไปของสารคีเลตติ้งเอเจนต์ที่สำคัญคือ ต้องมีลักษณะที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับธาตุโลหะต่าง ๆ ในรูปของโลหะคีเลตเชิงซ้อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ระดับความสัมพันธ์ของการเกาะยึดธาตุโลหะไว้ได้แน่นหรือไม่นั้นของสารคีเลตชนิดต่างๆ นั้น ได้มีการตรวจสอบหาค่าคงที่ ซึ่งแสดงเปรียบเทียบความคงสภาพสัมพันธ์ระหว่างสารคีเลตแต่ละชนิดกับธาตุโลหะต่าง ๆ หรือเรียกว่าค่าคงที่ของความเสถียร (Stability constant) โดยปกติตารางที่แสดงความเสถียรคงที่ของโลหะคีเลตชนิดต่าง ๆ นิยมบอกเป็นค่าของลอการิทึม (\log_{10}) ประเมินค่าความเสถียรคงที่ของธาตุโลหะชนิดหนึ่งเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น ๆ ที่เกาะยึดอยู่กับสารคีเลตประเภทต่าง ๆ

การกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้สารประเภทคีเลตติ้งเอเจนต์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง เนื่องจากสารดังกล่าวสามารถเกิดคีเลตชันกับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แต่สารชนิดนี้มีราคาสูงจึงไม่นิยมใช้

การใช้สารคีเลตติ้งเอเจนต์ในการแก้ปัญหาดิน ควรคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ 4 ข้อ (Allen, 1995) ดังนี้

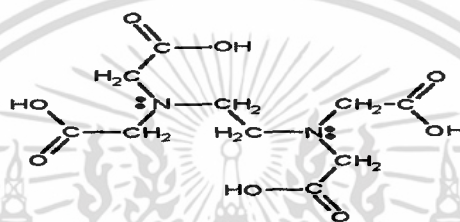
1. สารเคมีควรมีความสามารถเกิดในสารเชิงซ้อนที่เสถียรในช่วงพีเอชที่กว้าง ที่อัตราส่วนลิแกนด์ต่อโลหะ 1:1
2. การย่อยสลายทางชีวภาพของสารคีเลตติ้งเอเจนต์และสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักควรมีค่าต่ำ (ยกเว้นกรณีที่ใช้สารคีเลตติ้งเอเจนต์ที่ผ่านการนำมาแล้ว)
3. สารคีเลตติ้งเอเจนต์ควรมีความเป็นพิษและอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ
4. สารคีเลตติ้งเอเจนต์ควรมีต้นทุนต่ำต่อการนำมาใช้

สารละลายเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (Ethylenediamine tetraacetic acid, EDTA)

สารละลายเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA) คือตัวคีเลตติ้งเอเจนต์ และเป็นพอลิเดนเทอริก ลิแกนด์ อะตอมง่ายมี 6 อะตอม สามารถจับอะตอมโลหะได้ในลักษณะคล้าย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรงเล็บ (มีรากศัพท์มาจากคำว่า “ chele” ในภาษากรีก แปลว่ากรงเล็บ) ซึ่งทำให้เป็นคีเลตติ้งลิแกนด์ที่ดี และเป็นสารประเภท Tertiary amine ที่ประกอบด้วยหมู่ Carboxyl สามารถเกิดสารเชิงซ้อนแบบคีเลตที่เสถียรกับไอออนของโลหะหลายชนิด (รูปที่ 2.5) สารนี้ใช้เป็นลิแกนด์เมื่อจับโลหะไอออนจะได้ไอออนเชิงซ้อนหรือโมเลกุลที่มีความเสถียรสูง คือ สามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับโลหะในรูปของคีเลตใช้ในการควบคุมการปนเปื้อนโลหะไอออนอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากธาตุทรานซิชันสามารถสร้างพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับกลุ่มของโมเลกุลหรือไอออนเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนที่สามารถจับกับไอออนเกิดเป็นโมเลกุลเชิงซ้อน เรียกว่าสารประกอบโคออดิเนชัน ซึ่งโลหะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนคู่ และลิแกนด์ คือ ตัวคีเลตติ้งเอเจนต์เป็นอะตอม จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านการบำบัดน้ำเสียต่างๆ มากมาย



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ EDTA

EDTA เป็นกรดอ่อนชนิด Tetrprotic acid มีค่า $k_1 = 1.02 \times 10^{-2}$, $k_2 = 2.14 \times 10^{-3}$, $k_3 = 6.92 \times 10^{-7}$, $k_4 = 5.50 \times 10^{-11}$ ค่าเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าโปรตอนสองตัวแรกจะหลุดได้ง่ายกว่าสองตัวหลังที่เหลือ ในสารละลายของกรดนี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบดับเบิลซวิตเตอร์ไอออน (Double zwitterions) คุณสมบัติของ EDTA แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของ EDTA

สูตร โมเลกุล	$C_{14}H_{23}N_3O_{10}$
น้ำหนัก โมเลกุล	393.35
ลักษณะ	ผลึกสีขาว
ค่าการละลายน้ำ	<0.5 กรัม/100 มิลลิลิตร
จุดหลอมละลาย	220 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	106 องศาเซลเซียส
จุดวาบไฟ	ไม่ติดไฟ
ค่าการเกิดคีเลต	2.5 มิลลิโมลต่อกรัม

ที่มา : <http://www.hebeichengxin.com/cgi/search->

[en.cgi?f=product_en_1_+company_en_1_&id=431931&t=product_en_1_](http://www.hebeichengxin.com/cgi/search-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนคู่โคเวเลนต์ของ O แต่ละหมู่ใน OH ของ N แต่ละตัว ทำให้โมเลกุลของ EDTA เป็นลิแกนด์เฮกซะเดนเตต ซึ่งสามารถรวมกับไอออนของโลหะได้ สูตรอย่างย่อของ EDTA คือ H_4Y การละลายของสารนี้ต้องเติมเบสลงไปเล็กน้อยจะเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ ส่วนเกลือโซเดียมไดไฮดรตของ EDTA เป็นที่นิยมมาก ถึงแม้จะมีความเข้มข้นประมาณ 3% แต่ละลายน้ำได้และเมื่อเก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดโพลีเอทิลีน ก็เสถียรเป็นเวลาหลายเดือน (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

1. การเกิดสารเชิงซ้อนของ EDTA กับโลหะ (ชูติมา, 2547)

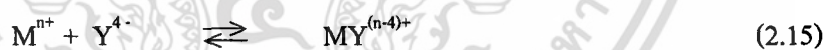
สมบัติที่ดีของ EDTA เป็นลิแกนด์ที่รวมตัวกับไอออนของโลหะส่วนใหญ่ด้วยอัตราส่วนโดยโมล เท่ากับ 1:1 ตัวอย่างเช่น ซิลเวอร์ไอออน คอปเปอร์ไอออน และอลูมิเนียมไอออน เมื่อรวมกับ EDTA จะได้สารเชิงซ้อนดัง ปฏิกิริยาที่ 2.12– 2.14



สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเป็นแบบคีเลตที่เป็นตัวการที่ทำให้สารเหล่านี้เสถียร เป็นผลเนื่องมาจากลักษณะการเกิดพันธะเคมีของลิแกนด์ที่มีทิศทางทำให้ไอออนของโลหะอยู่ตรงกลางและล้อมรอบด้วยลิแกนด์ ทำให้ไอออนของโลหะแยกตัวออกจากโมเลกุลของตัวทำละลายได้

2. ค่าคงที่ของการเกิดสารเชิงซ้อนสำหรับ EDTA

ค่าคงที่ของการเกิดสารเชิงซ้อนสำหรับ EDTA คือ K_{MY} ของไอออนของโลหะต่าง ๆ ที่มี EDTA เป็นลิแกนด์ ค่านี้เกี่ยวกับความเข้มข้นของ Y^{4-} ดังสมการที่ 2.15-2.16



$$K_{MY} = \frac{[MY^{(n-4)+}]}{[M^{n+}][Y^{4-}]} \quad (2.16)$$

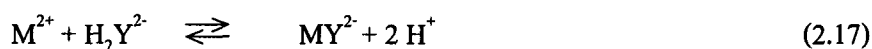
ถ้าค่า K_{MY} สูง แสดงว่า Stability ของ complex ดี

ถ้าค่า K_{MY} ต่ำ แสดงว่า Stability ของ complex ต่ำ

3. ผลของ pH ที่มีต่อองค์ประกอบของ EDTA

เนื่องจาก K_{MY} มีความเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของ Y^{4-} แต่ในสารละลายของ EDTA จะประกอบด้วยไอออนและโมเลกุลนอกเหนือไปจาก Y^{4-} , HY^{3-} , H_2Y^{2-} , H_3Y^- , และ H_4Y สารเหล่านี้มีความเข้มข้นมากน้อยแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช จะเห็นว่าที่ pH 3-6 คือที่สารละลายเป็นกรดอ่อนเกือบเป็นกลาง H_2Y^{2-} จะเป็นสารที่มีมากที่สุด แต่ถ้าสารละลายเป็นกลางหรือค่อนข้างเป็นเบสเล็กน้อย คือ pH ระหว่าง 6-10 EDTA ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป HY^{3-} แต่ถ้า pH สูงกว่า 10 EDTA จะอยู่

ในรูป Y^4 มากที่สุด ดังนั้น ปฏิกิริยาของการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะโควาเลนต์กับ EDTA ในสารละลายที่เป็นกรดเล็กน้อย แสดงดังสมการที่ 2.17



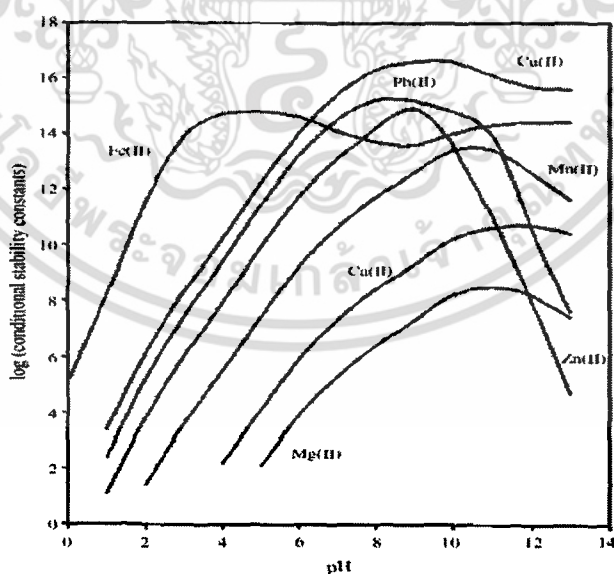
ค่า K_{MY} ของการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะต่าง ๆ

Cation	Log K_{MY}	Cation	Log K_{MY}
Ba ²⁺	7.8	Cu ²⁺	15.5
Mg ²⁺	8.7	Co ³⁺	26.0
Ca ²⁺	10.6	Al ³⁺	15.5
Cr ²⁺	13.0	Zn ²⁺	16.5
Cd ²⁺	16.4	Pb ²⁺	17.0

ที่มา : อรุณี, 2540

โลหะที่มีค่า $\log K_{MY} < 8$ จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียรกับ EDTA จากค่า $\log K_{MY}$ และ pH ที่เหมาะสมในการหาปริมาณโลหะไอออนที่เหมาะสม สามารถพล็อตเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\log K$ และ pH ได้ดังรูปที่ 2.6



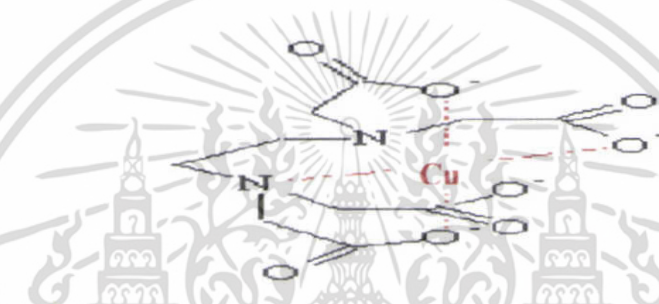
รูปที่ 2.6 ค่า pH ต่ำสุดที่สามารถเกิดคีเลตชันกับโลหะชนิดต่างๆ ด้วย EDTA อย่างมีประสิทธิภาพ

ที่มา : Chang *et al.* (2007) ; Kim and Ong (1999)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอีดีทีเอกับคอปเปอร์

EDTA เป็นเฮกซะเดนเตทลิแกนด์ (hexadentate ligand) อยู่ในรูป Y^{4-} และเกิดไอออนเชิงซ้อนกับโลหะไอออนในอัตราส่วน 1:1 โดยโมล โดยที่อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวที่ $-COO^-$ (หมู่คาร์บอกซิเลต) 4 คู่ จึงมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว 4 คู่ ไปสร้างพันธะโคเวเลนต์กับโลหะไอออนได้ 4 พันธะ นอกจากนี้ ยังมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอีก 2 คู่ ตรงอะตอมไนโตรเจน ไปสร้างพันธะโควาเลนต์กับโลหะไอออนอีก 2 พันธะ รวมเป็น 6 พันธะ ดังสูตรโครงสร้างของไอออนเชิงซ้อนของไอออนคอปเปอร์กับ EDTA ดังรูปที่ 2.7 สมการการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของคอปเปอร์อีดีทีเอ แสดงดังสมการที่ 2.18

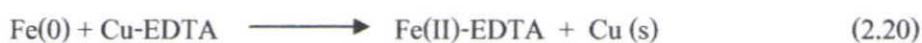
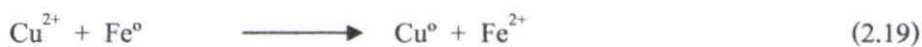


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ ไอออนเชิงซ้อนระหว่าง Cu^{2+} กับ EDTA

2.5 กระบวนการซีเมนเตชัน

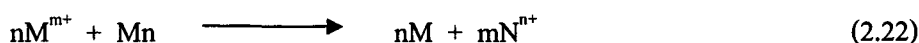
ในต้นปี ค.ศ. 1871 Gladstone และ Tribe ได้สังเกตพบผลึกของเงินเกาะอยู่บนผิวของทองแดงที่แช่อยู่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเข้มข้น และมีผู้สังเกตพบผลึกของโลหะจากสารละลายชนิดอื่น ๆ ทั้งในแบบที่เข้มข้น และเจือจางในลักษณะเดียวกันตามมามากอีกหลายคน ซึ่งอธิบายได้ในกระบวนการของซีเมนเตชัน (Dib and Makhloufi, 2004; Strickland and Lawson, 1993)

ซีเมนเตชัน (Cementation) เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยตัวเอง โดยธาตุที่มีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นลบกว่า (เช่น เหล็ก สังกะสี อลูมิเนียม) เข้าไปทำปฏิกิริยารีดักชันกับธาตุที่มีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นบวกกว่า (เช่น ทองแดง เงิน พรอท ตะกั่ว เป็นต้น) ทำให้ไอออนศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นบวกกว่าเหล่านั้นถูกแยกออกจากสารละลายตกตะกอนลงมา ดังสมการที่ 2.19 - 2.21 (Stefanowicz *et al.*, 1997; Lide, 1995; Khudenko and Gould, 1991)

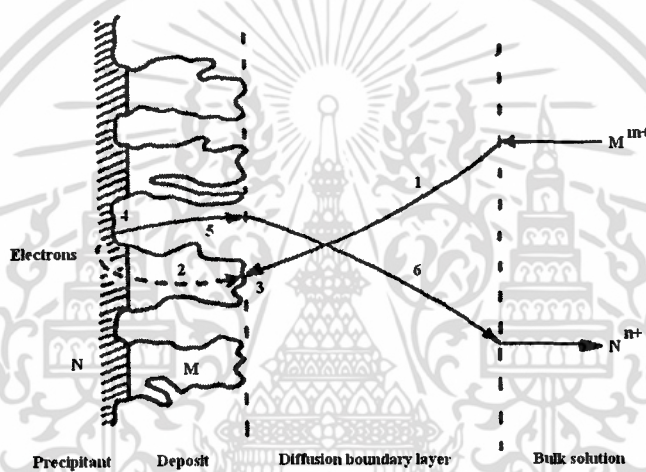


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนของการเกิดซีเมนต์ชั้นมีผู้อธิบายแตกต่างกันออกไป Strickland และ Lawson (1993) ได้อธิบายไว้ว่า ธาตุที่ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นลบ (N) จะให้อิเล็กตรอน (รูปที่ 2.8) ส่งผ่านชั้นตะกอน M ซึ่งเป็นธาตุศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นบวกในสารละลายตามรอยประหมายเลข 2 เมื่อไอออน M^{m+} ในสารละลาย (หมายเลข 1) รับอิเล็กตรอน (หมายเลข 3) ก็จะกลายเป็นธาตุ M ตกตะกอนลงมา ดังสมการที่ 2.22



ธาตุ N เมื่อให้อิเล็กตรอนไปแล้ว ตัวมันจะมีสภาพเป็น N^{n+} หลุดออกจากผิว (หมายเลข 4) ผ่านชั้นตะกอน M (หมายเลข 5) ออกสู่สารละลายต่อไป (หมายเลข 6) จะเกิดที่ผิวหน้าของธาตุที่ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นลบ โดยเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8

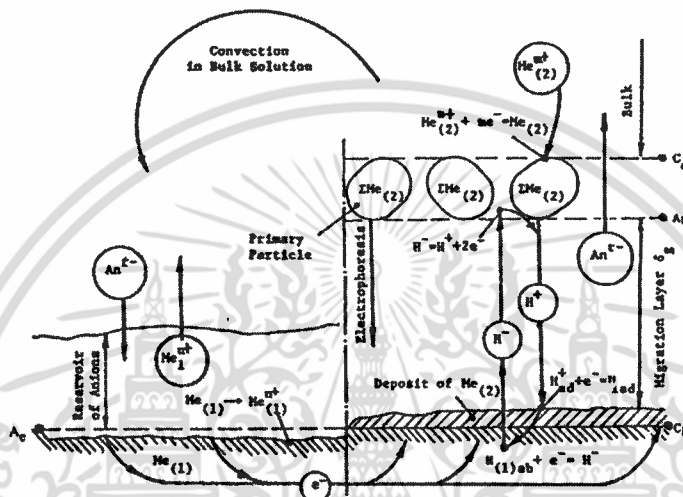


รูปที่ 2.8 ขั้นตอนปฏิกิริยาซีเมนต์ชั้น (Strickland and Lawson, 1993)

การควบคุมอัตราการเกิดซีเมนต์ชั้นนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ตั้งแต่ความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการจะแยกออกมาซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดสนามไฟฟ้าเหนือบริเวณตะกอนทั้งสิ้น รูปทรงของธาตุศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นลบ (เช่น rotating disc หรือ suspended spheres) ก็มีส่วนต่อการคำนวณกระแสของไอออนที่เคลื่อนที่ในสนามของขบวนการด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีซีเมนต์ชั้นของ Strickland และ Lawson นี้ มีผู้คัดค้านในแง่การเกิดสนามไฟฟ้านี้ไม่ได้อยู่ที่ผิวหน้าของตะกอนเสมอไป โดย Khudenko (1991) ได้อธิบายปฏิกิริยาใหม่ ซึ่งไฮโดรเจนเข้ามามีบทบาทด้วยเป็นอย่างมาก สอดคล้องกับ Nadkarny และ Wadsworth (1968) และ Biswas และ Reid (1973) แสดงไว้ว่า ภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อัตราของขบวนการ และอัตราการลดไอออนบวก (ปริมาณไอออนบวกที่ลดลงต่อปริมาณธาตุศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นลบที่ใช้) จะเพิ่มขึ้น และในบรรยากาศของไฮโดรเจน ปริมาณการใช้ธาตุศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นลบจะน้อยกว่าการใช้ตามอัตราส่วนของสมการปริมาณสัมพันธ์อีกด้วย ซึ่งไฮโดรเจนถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

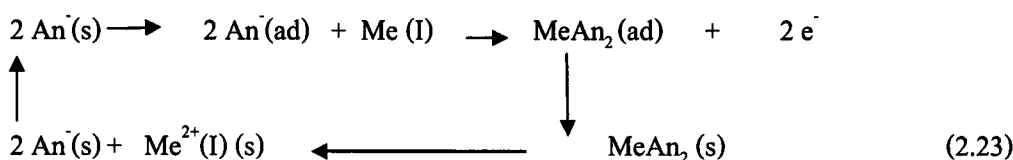
จัดให้เป็นตัวรีดิวซ์ธาตุศุกย์ไฟฟ้ารีดักชันที่เป็นลบที่เกิดได้เอง ทั้งยังสามารถรีดิวซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จำนวนมากได้อีกด้วย ไอออนจากไฮโดรเจนทั้งไอออนบวก (H^+) และไอออนลบ (H^-) จึงเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาซีเมนเตชันที่สำคัญยิ่ง

การอธิบายปฏิกิริยาซีเมนเตชันของ Ku and Chen (1992) และ Khudenko and Gould (1991) (รูปที่ 2.9) เนื่องจากที่ผิวหน้าของโลหะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงเหนี่ยวนำให้เกิดเซลล์อิเล็กโตรไลติกชนิดต่างๆ พร้อมทั้งเซลล์กลวานิก ขึ้นมาได้เอง



รูปที่ 2.9 รูปแบบของการเกิดซีเมนเตชัน (Khudenko, 1991)

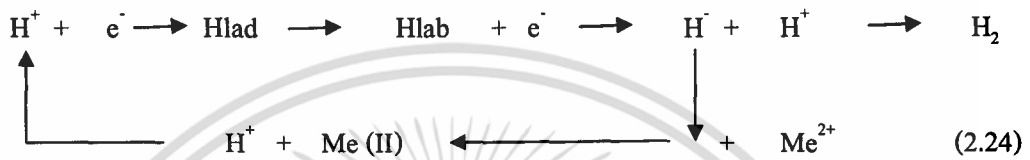
ในขบวนการจะเกิดเซลล์อิเล็กโตรไลติก คือ ขั้วแอโนด (Ae) และขั้วคาโทด (Ce) ที่อยู่เหนือคาโทดของเซลล์กลวานิกขึ้นไป (รูปที่ 2.9) สำหรับเซลล์กลวานิกจะประกอบด้วยขั้วคาโทด (Cg) ขั้วแอโนด (Ag) และ δ_g ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่าง Cg กับ Ag ในชั้นต้นขั้วแอโนดของเซลล์อิเล็กโตรไลติก จะดูดซับไอออนลบ (An^-) จากส่วนของสารละลายบนผิวของธาตุที่ศุกย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นลบ (Me(1)) กลายเป็นสารประกอบเกลือ และจะปล่อยอิเล็กตรอนให้เคลื่อนไปยังขั้วคาโทด (Cg) ของเซลล์กลวานิก สารประกอบเกลือเมื่อเสียดีอิเล็กตรอนแตกตัวเป็นโลหะไอออนบวกและลบ ซึ่งเป็นสารละลายไอออนบวกจะกลับไปยังส่วนของสารละลาย ส่วนไอออนลบจะเข้าสู่ขั้วแอโนด (Ae) ต่อไป ซึ่งแสดงในรูปสมการที่ 2.23



(s = solution, ad = adsorption)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของขั้วคาโทด (Cg) ของปฏิกิริยาซีเมนเตชันนั้น จะเกิดเป็นชั้นกระแสไฟฟ้าขึ้นมาสองชั้นได้เอง ชั้นนอก ได้แก่ ชั้น Helmholtz ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนไอออน ไอออนบวกของโลหะที่จะแยก และไอออนอื่นๆ ที่อาจพบได้ (เช่น โซเดียมไอออน) ไฮโดรเจนไอออนจะรับอิเล็กตรอนที่มาจากขั้วแอโนด (Ae) ในลักษณะดูดซับ (HI_{ad}) และกลายเป็นดูดซึม (HI_{ab}) แต่เมื่อรับอิเล็กตรอนเพิ่มจะกลายเป็นไฮโดรด์ (H) ซึ่งมีประจุลบ ดังนั้น ไฮโดรด์จึงถูกขับออกจากขั้วคาโทดเข้าสู่ส่วนของสารละลายไปรีดิวซ์ไอออนบวกของโลหะที่ต้องการจะแยก ($Me^{2+}(2)$) ให้ตกตะกอนลงมาพร้อมไฮโดรเจนไอออน ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 2.24 (Peters, 1999)



(ad = adsorption, ab = absorption)

การที่ไฮโดรด์ไอออนเคลื่อนออกจากขั้วคาโทดไปสู่สารละลาย ไอออนบวกในสารละลายก็เคลื่อนเข้าสู่ขั้วคาโทด ก่อให้เกิดกระแสตรงข้ามกันขึ้น ถ้ากระแสของไฮโดรด์มีมากกว่า ก็จะไม่พบไอออนบวกในส่วนของขั้วคาโทด โดยปฏิกิริยาจะเลื่อนไปเกิดที่ระยะห่างออกไป (δg) อันเป็นจุดที่กระแสทั้งสองเท่ากัน ซึ่งที่ระยะนั้นจะเกิดขั้วแอโนดของเซลล์กัลวานิก (Ag) และคาโทดของเซลล์อิเล็กโตรไลติก (Ce) ขึ้น ที่ขั้วแอโนด (Ag) ไฮโดรด์ไอออนจะแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนนี้เป็นตัวรีดิวซ์ไอออนบวกของโลหะให้เป็นอนุภาค (Me(II)) ส่วนไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนกลับขั้วคาโทด (Cg) ไปรับอิเล็กตรอนเป็นไฮโดรด์กลับมาใหม่ บางส่วนจะถูกอนุภาคโลหะดูดซึมไว้กลายเป็นอนุภาคที่มีประจุบวกทำให้เคลื่อนที่ผ่านชั้น δg ไปยังขั้วคาโทด (Cg) ด้วยปฏิกิริยา electrophoresis เกิดเป็นตะกอนแบบขรุขระ มีกิ่งสาขา (dendritic) ที่ขั้วนั้นได้ สำหรับกรณีที่กระแสของไอออนบวกมากกว่ากระแสของไฮโดรด์ ปฏิกิริยาทั้งหมดก็จะเกิดอยู่ที่ขั้วคาโทดบนผิวของธาตุที่มีศักย์รีดักชันเป็นลบนั่นเอง ตะกอนที่ได้จะมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ

ในส่วนของสารละลาย ได้มีผู้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาซีเมนเตชันแบบที่มีก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซออกซิเจน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกลาง เป็นตัวรีดิวซ์และตัวออกซิไดซ์ตามลำดับ ในแบบที่มีก๊าซไฮโดรเจนนั้น ยังไม่พบรายงานที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา หรือสมการปริมาณสัมพันธ์ (Khudenko และ Gould, 1991) แต่ในแบบที่มีก๊าซไฮโดรเจน พบว่าก๊าซนี้จะช่วยเพิ่มอัตราการรีดิวซ์ทองแดงโดยเหล็กเล็กน้อย (Nadkamy และ Wadsworth, 1968) ส่วนก๊าซออกซิเจนจะมีผลในการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ถ้าไม่มีออกซิเจน อัตราของปฏิกิริยาเริ่มต้น 0.3 เซนติเมตรต่ออนาที และจะสูงสุดที่ 1.7 เซนติเมตรต่ออนาที แต่เมื่อมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจน 0.02 บรรยากาศ อัตราปฏิกิริยาจะลดลงเป็น 0.1 เซนติเมตรต่ออนาที (Lee *et al.*, 2007) ทั้งนี้เนื่องจากการรีดิวซ์ก๊าซออกซิเจน ไฮโดรด์ และไฮโดรเจนไอออนจะถูกใช้ไปและกลายเป็นน้ำในที่สุด ($O_2 + 2H^+ + 2H \rightleftharpoons 2H_2O$)

การแยกโลหะหนักด้วยวิธีซีเมนเตชัน พบในวงการแยกโลหะด้านวัสดุศาสตร์เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสามารถแยกไอออนของโลหะที่มีค่าและราคาแพงให้ตกตะกอนในรูปของโลหะบริสุทธิ์กลับมาใช้ใหม่ได้

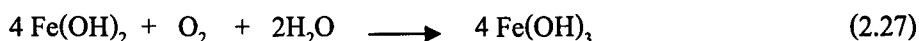
2.5.1 กระบวนการเกิดซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก (Chang *et al.*, 2007; Hong *et al.*, 2000; Stefanowicz *et al.* 1997; Neale *et al.*, 1997).

เหล็กโดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชัน 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Zero valent iron) เท่านั้นที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อให้คุณสมบัติดีขึ้นหรือที่เรียกว่าเหล็กกล้า (Steel) เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) พร้อมกับสารที่เกิดจากการรีดิวซ์กรด คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

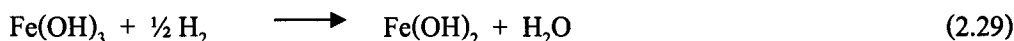
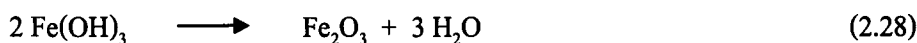
เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_2$ และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_3$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (Solubility constant) ดังแสดงในสมการที่ 2.25 และ 2.26 ตามลำดับ (Snoeyink and Jenkins, 1990)



เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้น้อย (Mehmet *et.al.*, 2003 และ Zaroual.*et.al.*, 2006) จึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็วและเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตาม เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็วดังสมการที่ 2.27



เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์และเฟอร์ริออกไซด์ โดยการคั่งน้ำออก ดังสมการที่ 2.28 และ 2.29 ตามลำดับ



กระบวนการซีเมนเตชันเป็นปฏิกิริยาเคมีเกิดจากคุณสมบัติทางเคมีของเหล็กศูนย์ เมื่ออยู่ในสมการรีดักชันมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -0.44 โวลต์ (สมการที่ 2.30) ซึ่งจะมีความสามารถให้อิเล็กตรอนกับทองแดงที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเท่ากับ 0.34 โวลต์ (สมการที่ 2.31) (Kim and Ong, 1999) จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ได้และมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเท่ากับ 0.78 โวลต์ (สมการที่ 2.32)

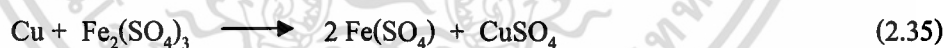


ซีเมนเตชันระหว่าง Cu^{2+} กับ Fe^0 ในสารละลายที่มีสภาวะพีเอชต่ำ ทำให้เหล็กในสถานะศูนย์ละลายเป็น Fe^{2+} แล้ว ทองแดงไอออนจะเกาะบริเวณผิวเหล็กที่สึกกร่อนดังปฏิกิริยาที่ 2.32

ในสารละลายเหล็กไอออนเปลี่ยนเลขออกซิเดชันจาก Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน ($E^0 = +0.771$ โวลต์) สมการที่ 2.33 (Stefanowicz *et al.*, 1997)



ในกรณีที่ทองแดงอยู่ในสารละลายที่มี Fe^{3+} ไอออนทองแดงสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับดังสมการที่ 2.34 และ 2.35



($E^0_{\text{Cell}} = +0.431$ โวลต์)

2.5.2 การตกตะกอน Cu ออกจากสารละลาย Cu-EDTA โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก

กระบวนการซีเมนเตชันเป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยตัวเองประสิทธิภาพขึ้นกับปริมาณของธาตุที่มีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นลบกว่า (เช่น เหล็กสังกะสี อลูมิเนียม) เข้าไปทำปฏิกิริยารีดักชันกับธาตุที่มีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นบวกกว่า อัตราส่วนโดยใช้ทฤษฎีปริมาณสัมพันธ์ของความเข้มข้นเหล็กต่อความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในสารละลายสกัดทองแดงมีค่าศักย์ไฟฟ้าเซลล์ (E^0_{Cell}) มีค่าเท่ากับ $= 0.34 \text{ V}$ ในขณะที่ค่าเหล็กในปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าคือเซลล์ศักย์ไฟฟ้าของเหล็ก $= -0.44 \text{ V}$

การตกตะกอนของคอปเปอร์โดยใช้ผงเหล็กด้วยวิธีซีเมนเตชัน ดังสมการ 2.36



ที่พีเอช 2 จะเกิดการตกตะกอนของคอปเปอร์ เนื่องจากที่พีเอชต่ำ ๆ คอปเปอร์เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอีดีทีเอได้ดีกว่าเหล็กและเมื่อเพิ่มสัดส่วน โมลเหล็กต่อคอปเปอร์ ที่พีเอชต่ำมีเปอร์เซ็นต์การสกัดคอปเปอร์ได้มากขึ้น ที่พีเอชต่ำ คอปเปอร์เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอีดีทีเอได้ไม่ดีเท่าเหล็ก ผลมาจากค่าคงที่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของคอปเปอร์ไอออนกับสารละลายอีดีทีเอมีค่าเท่ากับ $\text{Log } K_{MY} 15.5$ หรือเท่ากับพีเอช 7 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (อรุณี, 2540) สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chang *et al.* 2007) เนื่องจากการตกตะกอนของแดงใช้กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่สภาวะความเป็นกรด ตะกอนทองแดงในการเกิดซีเมนเตชันที่พีเอชต่ำ มีรูปของเหล็กไฮดรอกไซด์เมื่อผิวเหล็กถูกกัดกร่อน (Stefanowicz *et al.*, 1997) พบว่า เฟอร์ริก ไอออนมีสมรรถภาพสูงกว่าคิวปริก ไอออนของอีดีทีเอค่าพีเอชที่ต่ำ (Kim and Ong, 1999)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chang *et al.* (2007) ศึกษาการนำคอปเปอร์และคีเลตตั้งเองเจเนตกลับมาใช้ใหม่จากสารละลายที่ใช้ในการสกัดกากตะกอนของโรงงานผลิตแผงวงจรพิมพ์หุบ โลหะหนัก โดยวิธีซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก สารละลายคีเลตตั้งเองเจเนตที่ใช้ในการศึกษา คือ อีดีทีเอ และดีทีพีเอ การสกัดคอปเปอร์กลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการซีเมนเตชัน ขึ้นอยู่กับสัดส่วน โมลของเหล็กต่อคอปเปอร์และพีเอช พบว่าสัดส่วน โมลเหล็กต่อคอปเปอร์ที่เหมาะสมสำหรับตะกอน คือ 8:1 ประสิทธิภาพการสกัด คอปเปอร์เท่ากับ 100% และค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอช 2 นอกจากนี้ ยังพบว่าจะได้คอปเปอร์ใกล้เคียงกับคอปเปอร์บริสุทธิ์ จากการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติคอปเปอร์ที่สกัดได้พบว่ายังมีการปนเปื้อนของเหล็กในคอปเปอร์

Stefanowicz *et al.* (2007) ศึกษาการนำคอปเปอร์กลับมาใช้ใหม่ จากน้ำเสียโรงงานหุบ โลหะด้วยไฟฟ้า โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยเศษผงเหล็กจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมก่อนทำซีเมนเตชันต้องปรับพีเอชเป็น 9 ด้วยสารละลาย โซเดียม ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อลดตัวรบกวนให้ตกตะกอนไฮดรอกไซด์ นำสารละลายตัวอย่างแยกทองแดงด้วยกระบวนการซีเมนเตชัน จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 1.5 ปรับด้วยสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ใส่ผงเหล็กในอัตราส่วน โมลของคอปเปอร์ (กรัม/กรัม) เท่ากับ 0.728 และปั่นกวนด้วยความเร็ว 30 รอบต่อวินาที จะได้ประสิทธิภาพในการนำคอปเปอร์กลับมาใช้ใหม่ 99 %

Fouad และ Basir (2005) ศึกษาการนำกลับทองแดงด้วย กระบวนการซีเมนเตชันจาก สารละลายสกัดผงวงจรมพิมพ์ที่ไม่ใช่แล้ว พบว่าสภาวะที่เหมาะสมค่าพีเอชเท่ากับ 2 อุณหภูมิ 25 °C โดยอัตราส่วนเหล็ก 0.879 กรัมต่อ 1 กรัมทองแดง จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกทองแดงมีความบริสุทธิ์สูง 99 %

Dib และ Makhloufi (2004) ศึกษาการแยกทองแดงจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ เพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ด้วยวิธีซีเมนเตชัน โดยทำการทดลองกับน้ำเสียจริงมีไนโตรเจน ไนตริกและซัลเฟต นำมาปรับพีเอชเป็น 9 เพื่อให้โลหะที่ไม่ต้องการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ แยก ตะกอนออกโดยวิธีปั่นเหวี่ยง แล้วนำสารละลายปรับพีเอชเป็น 1.2 ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก จากนั้นตกตะกอนทองแดงด้วยวิธีซีเมนเตชันด้วยเศษผงเหล็ก โดยใช้อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่าง เหล็กต่อทองแดงเท่ากับ 0.872 เดิมเศษผงเหล็กแล้วปั่นกวนที่ความเร็ว 30 รอบต่อวินาที เวลา 30 นาที ณ อุณหภูมิห้อง ประสิทธิภาพการแยกทองแดง 95.8% หรือแยกทองแดงโดยใช้สารละลาย กรดไนตริกปรับพีเอชเป็น 0.5 ประสิทธิภาพในการแยกทองแดง 99% พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็ก กลับแยกทองแดงได้ลดลง

เก็จวดี และคณะ (1999) ศึกษาเกี่ยวกับ ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความเสถียรของตะกอน ทองแดงไฮดรอกไซด์ โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบตะกอน ร้อยละความชื้น เวลาที่ใช้ในการตกตะกอน และชนิดของกากตะกอน โดยกากตะกอนที่ศึกษาเป็นกากตะกอนที่มา จากการสังเคราะห์และกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีคอปเปอร์ผสมอยู่ จากการศึกษา พบว่า เมื่อสภาวะอื่นๆ คงที่ ร้อยละของค่าความชื้นลดลง ค่าการละลายจะลดลงด้วย และถ้าอบ ตะกอนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการละลายลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายของตะกอนในแต่ละวัน พบว่า ตะกอนที่อบระยะเวลาสั้น จะทำให้ความชื้นในตัวตะกอนระเหยออกไป ส่งผลให้ตะกอน จัดเรียงตัวกันแน่นขึ้น การละลายจึงลดลง เหตุผลนี้ใช้อธิบายผลของอุณหภูมิในการอบและร้อยละ ความชื้นได้อีกด้วย กล่าวคือ เมื่อทำการอบตะกอนที่อุณหภูมิสูงขึ้น น้ำระเหยออกไปได้เร็วและ จำนวนมาก ทำให้ตะกอนยึดตัวกันได้ดีขึ้น การละลายจึงมีค่าลดลง และผลงานการทดลองโดยใช้ ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมก็ให้ผลเช่นเดียวกับตะกอนสังเคราะห์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น GBC 932 บริษัท GBC Scientific Equipment PTY ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrophotometer) รุ่น SRS 3400 บริษัท Siemens ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่อง XRD (X-ray diffractometer) บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE ประเทศเยอรมัน
4. เครื่องสแกนนิ่งอิมิชันไมโครสโคป (Scanning Emission Microscope) รุ่น 1455 บริษัท VTF Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องวัดค่าพีเอช รุ่น 215 บริษัท Denver Instrument Company ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) รุ่น MLS-1200 MEGA, บริษัทMLS Ltd. ประเทศเยอรมัน
7. ตู้อบให้ความร้อน รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
8. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น-254 บริษัท Sartorius, ประเทศเยอรมัน
9. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 บริษัท Sunyo ประเทศญี่ปุ่น
10. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Buchner Filter) รุ่น B-169 บริษัท BU Chi ประเทศญี่ปุ่น
11. เครื่องเขย่าแนวตั้ง (Horizontal Shaker) รุ่นH-323 บริษัท BU Chi ประเทศญี่ปุ่น
12. ไมโครปิเปต รุ่น Nichipet EX บริษัท Nichiyo ประเทศญี่ปุ่น
13. ตะแกรงร่อนขนาด 10 mesh
14. กระดาษกรอง Whatman no 42
15. เครื่องแก้วและอุปกรณ์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

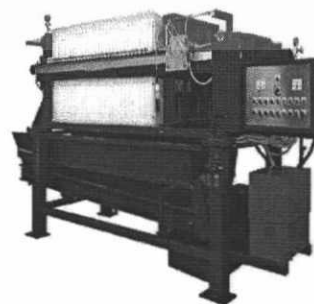
1. เอทีทีเอ็นไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด ($\text{CH}_2\text{CH}_2(\text{NH}_2)_2(\text{CH}_2\text{COOH})_4$, อีดีทีเอ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศออสเตรเลีย
2. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศออสเตรเลีย
3. กรดไนตริก (Nitric acid) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศแคนาดา
4. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศแคนาดา
5. กรดอะซิติก (Acetic acid) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศออสเตรเลีย
6. ไฮดรอกซิลแอมมีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxyl ammine hydrochloride) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศแคนาดา
7. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศแคนาดา
8. แอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium acetate) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศแคนาดา
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศแคนาดา
10. ผงเหล็ก (Fe (0)) บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
11. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.1.3 แหล่งที่มาของสลัดจ์

ตัวอย่างสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าของโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้รับความอนุเคราะห์จาก Aspocomp (Thailand) Co., Ltd นิคมอุตสาหกรรม สหพัฒน์ อำเภอ ศรีราชา จังหวัด ชลบุรี ซึ่งบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนโลหะหนักด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จากนั้น กำจัดน้ำออกจากสลัดจ์โดยเครื่องรีดตะกอนสลัดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก) บ่อตกตะกอนสลัดจ์



(ข) เครื่องรีดตะกอนสลัดจ์

รูปที่ 3.1 กำจัดน้ำจากสลัดจ์ด้วยเครื่องรีดตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์

3.2.1.1 วิธีการเตรียมสลัดจ์

1) นำตัวอย่างสลัดจ์ (รูปที่ 3.2ก) มาผึ่งแดดโดยกระจายให้ทั่วภาชนะที่บรรจุ เป็นเวลา 3 วัน จนสลัดจ์แห้ง (รูปที่ 3.2ข)

2) นำสลัดจ์ที่ผึ่งแดดแห้งแล้วมาบดด้วยครก

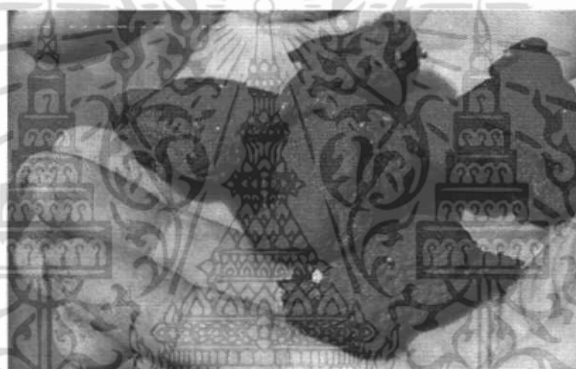
3) คัดแยกขนาด โดยร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร

4) นำสลัดจ์จากข้อ 3 ไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำตามวิธี

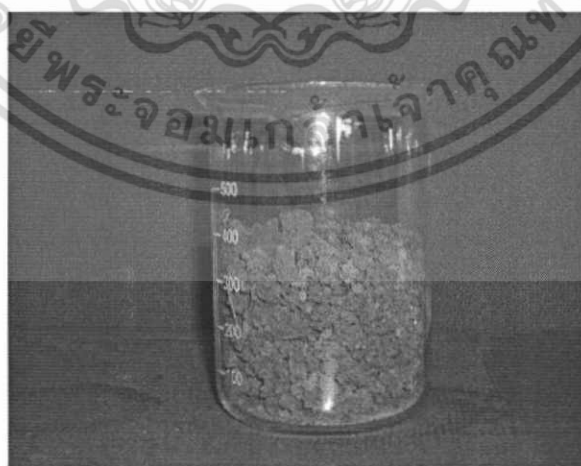
SW-846 Method 3050B (US EPA, 1996)

5) จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นใน โถดูดความชื้น

6) เก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติกแบบปิด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



(ก) ตัวอย่างสลัดจ์ก่อนทำการทดลอง

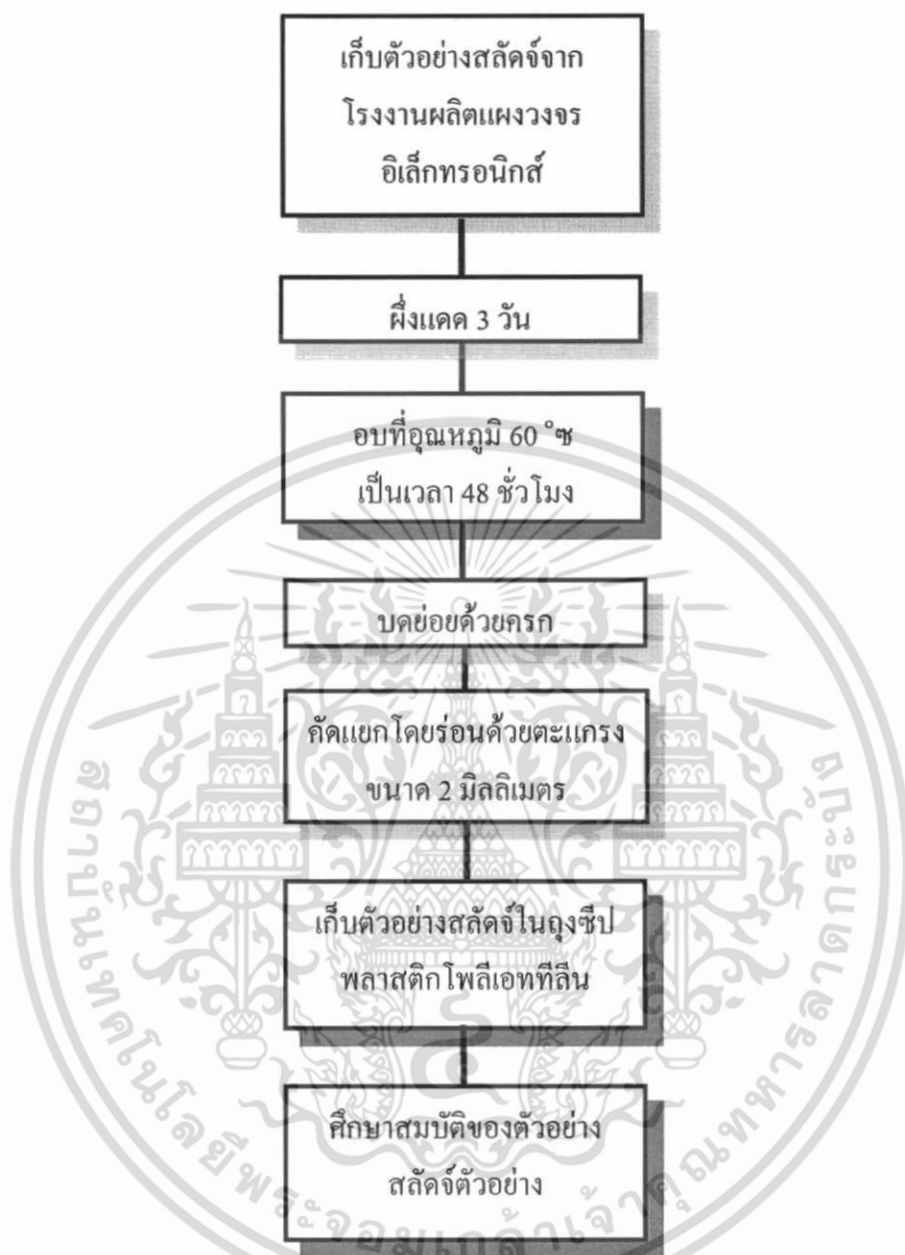


(ข) ตัวอย่างสลัดจ์หลังตากแห้ง

รูปที่ 3. 2 ตัวอย่างสลัดจ์จากโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสลัดจ์สามารถสรุปดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสลัดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 การศึกษาสมบัติของสลัดจ์

การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างสลัดจ์ โดยใช้วิธีและเครื่องมือต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสลัดจ์

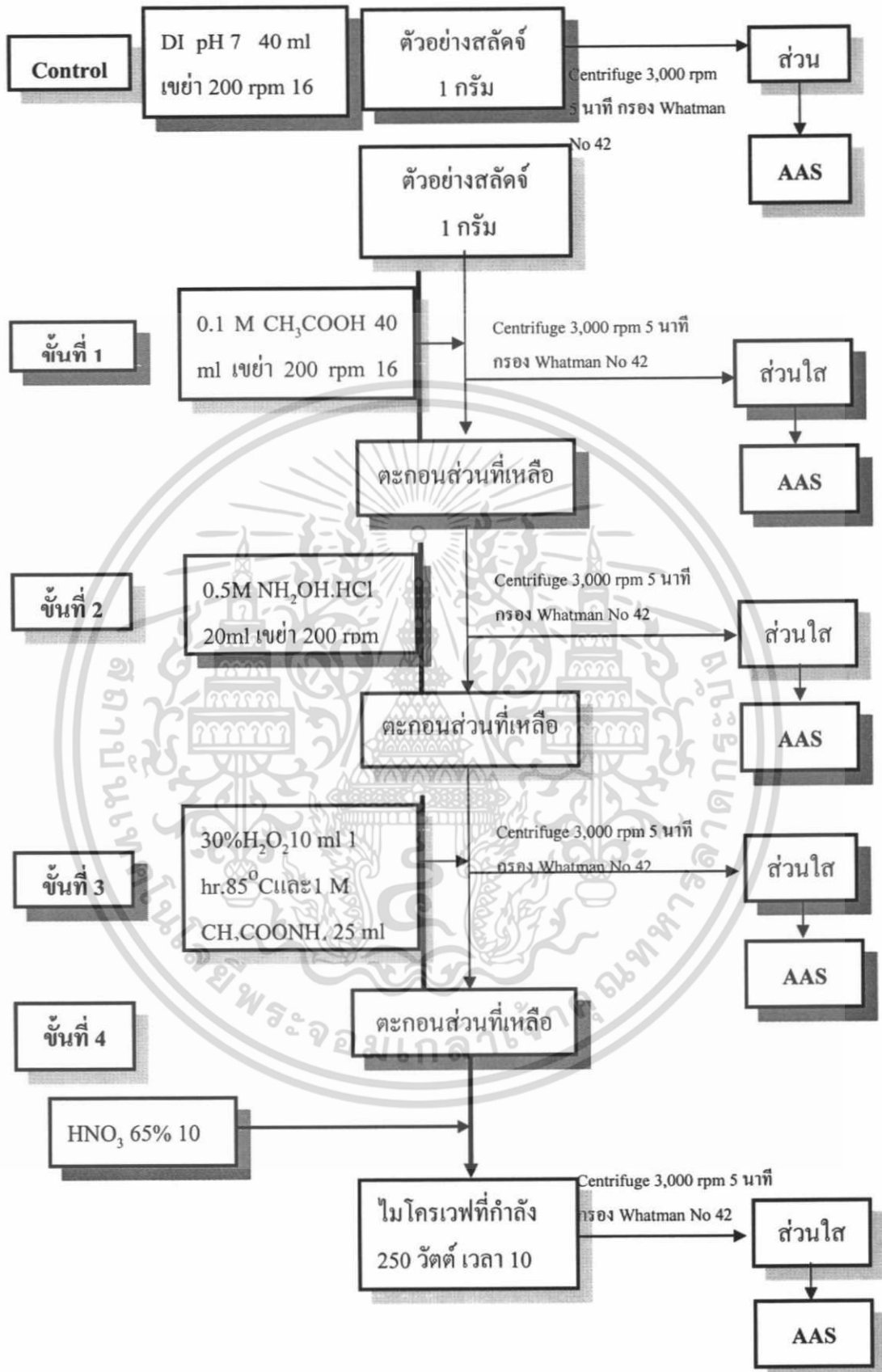
พารามิเตอร์	วิธีการ/เครื่องมือ
1. ค่าพีเอชและค่าไอออนพี	เครื่องวัดค่าพีเอช (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข)
2. ชนิดของสารอนินทรีย์ในสลัดจ์	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
3. ความเข้มข้นของทองแดงในการชะละลาย	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
4. ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมด	ย่อยด้วยไมโครเวฟแล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ตามวิธีของ SW-846 Method 3050B (US EPA, 1996)

3.2.1.3 การศึกษารูปของทองแดงในสลัดจ์ด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น

(Sequential extraction) ใช้วิธีสกัดตามวิธีของ BCR (Quevauviller *et al.*, 1994) มีขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4

- 1) ชั่งสลัดจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.1.1 จำนวน 1 กรัม ใส่หลอด Centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) ปิดเตาสารละลายกรดอะซิติค 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร
- 3) นำไปเขย่าในแนวตั้ง ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- 4) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42
- 5) ล้างตะกอนในหลอด Centrifuge ด้วยน้ำ DI แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 42 แผ่นเดียวกับกระดาษกรองในข้อ 4
- 6) นำส่วนใสจากข้อ 4 และข้อ 5 รวมกัน แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร ด้วยกรดไนตริก 2 เปอร์เซนต์
- 7) นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดง ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (กรณีที่ยังไม่วิเคราะห์ทันที ควรเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส)
- 8) นำส่วนที่เป็นตะกอนที่เหลือจากข้อ 5 ในหลอด Centrifuge และตะกอนบนกระดาษกรองจากข้อ 5 ผสมกัน โดยชะด้วยสารละลายไฮดรอกซิลลามีนไฮโดรคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การศึกษารูปของทองแดงในสลัดจ์ด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 9) นำส่วนตะกอนที่เหลือจากข้อ 8 ไปเติมสารละลายเปอร์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85°C
- 10) นำไปประเหย H₂O₂ ออกแล้ว ทำซ้ำอีกครั้งหนึ่ง โดยเติม 1 M CH₃COONH₄ 25 มิลลิลิตร นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25°C
- 11) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42
- 12) ล้างตะกอนในหลอด Centrifuge ด้วยน้ำ DI แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 42 แผ่นเดียวกับกระดาษกรองในข้อ 11
- 13) นำส่วนใสจากข้อ 11 และข้อ 12 รวมกันแล้วปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร ด้วยกรดไนตริก 2 เปอร์เซ็นต์
- 14) นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดง ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (กรณีที่ยังไม่วิเคราะห์ทันที ควรเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส)
- 15) นำตะกอนจาก ข้อ 12 ข่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้นด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 250 วัตต์ เวลา 10 นาที จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ตามวิธีของ SW-846 Method 3051 (US EPA, 1996)
- 16) นำส่วนใสไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 17) ทำแบลนด์ เช่นเดียวกับข้อ 1-16 แต่ไม่ใส่สลัดจ์
- 18) ทำการทดลอง เช่นเดียวกับข้อ 1-17 อีก 2 ซ้ำ

3.2.2 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ ด้วยเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด (อีดีทีเอ) ขั้นตอนการทดลองดังสรุปในรูปที่ 3.5

3.2.2.1 ศึกษาความเข้มข้นอีดีทีเอที่เหมาะสม

- 1) ชั่งสลัดจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.1 จำนวน 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร
- 2) ปิเปตสารละลายอีดีทีเอ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน (สถานะเหมาะสมจาก Nair *et al.*, 2008)
- 3) ปรับพีเอชให้เป็น 7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ หรือสารละลายกรด H₂SO₄ 1 โมลาร์ (สถานะเหมาะสมจาก Nair *et al.*, 2008)
- 4) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรด้วยกรด HNO_3 2 เปอร์เซ็นต์ ในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
- 7) นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 8) ทำเบลงค์ เช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่สลัดจ์
- 9) ทำการทดลอง เช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ
- 10) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-10 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของอีดีทีเอในข้อ 2 เป็น 0.05, 0.2, 0.3 โมลาร์ ตามลำดับ

3.2.2.2 ศึกษาสัดส่วนสลัดจ์ต่อสารละลายอีดีทีเอ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

- 1) ชั่งสลัดจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.1 จำนวน 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร
- 2) เติมสารละลาย อีดีทีเอที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.2.1 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- 3) ปรับพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ หรือสารละลายกรด HNO_3 1 โมลาร์
- 4) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรด้วยกรด HNO_3 2 เปอร์เซ็นต์ ในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
- 7) นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดง ด้วยเครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 8) ทำเบลงค์ เช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่สลัดจ์
- 9) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ
- 10) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่เปลี่ยนปริมาณของสลัดจ์ในข้อ 1 เป็น 0.1, 0.5, 1.5, 2.0 กรัม ตามลำดับ

3.2.2.3 ศึกษาระยะเวลาสกัดที่เหมาะสม

- 1) ชั่งสัลดิจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.2.2 ใส่ในขวดรูปชมพู่ พลาสติคขนาด 125 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำละลายอีดีทีเอที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.2.1 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- 3) ปรับพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ หรือสารละลายกรด HNO_3 1 โมลาร์
- 4) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรด้วยกรด HNO_3 2 เปอร์เซ็นต์ ในขวดวัดปริมาตร พลาสติคขนาด 50 มิลลิลิตร
- 7) นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดง ด้วยเครื่องอะตอมมิก แอปซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 8) ทำเบลงค์ เช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่สัลดิจ์
- 9) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ
- 10) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่เปลี่ยนระยะเวลาในการสกัดในข้อ 4 เป็น 3, 6, 9 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.2.2.4 ศึกษาพีเอชของสารละลายอีดีทีเอที่เหมาะสม

- 1) ชั่งสัลดิจ์ที่ได้จากข้อ 3.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.2.2 ใส่ในขวดรูปชมพู่ พลาสติคขนาด 125 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำละลายอีดีทีเอที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.2.1 ใน ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- 3) ปรับพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ หรือสารละลายกรด HNO_3 1 โมลาร์
- 4) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่ได้จาก ข้อ 3.2.2.3
- 5) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรด้วยกรด HNO_3 2 เปอร์เซ็นต์ ในขวดวัดปริมาตร พลาสติคขนาด 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดง ด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 8) ทำแบลนด์เช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่สลัดจ์
- 9) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ
- 10) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่เปลี่ยนพีเอชในการสกัดข้อ 3 เป็น 5, 6, 8 และ 9 ตามลำดับ

3.2.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการสกัดทองแดง

- 1) สกัดทองแดงจากสลัดจ์ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.2.1-3.2.2.4
- 2) นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42
- 3) นำสารละลายไปปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริก 2 เปอร์เซนต์ ในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
- 4) นำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณทองแดง ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 5) นำตะกอนหลังจากการสกัดไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
- 6) นำตะกอนมาชั่งด้วยไมโครเวฟแล้ว วิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ตามวิธีของ SW-846 Method 3050B (US EPA, 1996)
- 7) ทำแบลนด์เช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ไม่ใส่สลัดจ์
- 8) ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนสารละลายอีดีทีเอ
- 9) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ

3.2.3 การแยกทองแดงออกจากสารละลายเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก (Chang *et al.*, 2007)

3.2.3.1 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม

- 1) สกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ด้วยสารละลายอีดีทีเอ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง 3.2.2
- 2) ปรับพีเอชสารสกัดที่ได้ให้เป็น 3 ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์ (สภาวะเหมาะสมจาก Chang *et al.*, 2007)

3) เติมผงเหล็กต่อทองแดง (Fe: Cu) ในสัดส่วนโดยโมล 8:1 (สภาวะเหมาะสมจาก Chang *et al.*, 2007)

4) นำไปปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

5) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42

6) นำผงทองแดงไปวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์โดยใช้เครื่อง XRD

7) วิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

8) ทำเบลนค์ เช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่สลัดจ์

9) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 อีก 2 ซ้ำ

10) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-10 แต่เปลี่ยนพีเอชในข้อ 2 เป็น 1, 2 และ 4 ตามลำดับ

3.2.3.2 ศึกษาสัดส่วนโดยโมลของเหล็กต่อทองแดงที่เหมาะสม

1) สกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ด้วยสารละลายอีดีทีเอ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง 3.2.2

2) ปรับพีเอชสารสกัดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.3.1 ด้วย HNO_3 1 โมลาร์

3) เติมผงเหล็กต่อทองแดง (Fe : Cu) ในสัดส่วนโดยโมล 8:1 (สภาวะเหมาะสมจาก Chang *et al.*, 2007) ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ง

4) นำไปปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

5) นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No 42

6) นำผงทองแดงไปวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดีฟแฟกชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD)

7) วิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

8) ทำเบลนค์ เช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่สลัดจ์

9) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ

10) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่เปลี่ยนสัดส่วนโดยโมลเหล็กต่อทองแดงในข้อ 3 เป็น 2:1, 4:1, 6:1 และ 10:1 ตามลำดับ

3.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้อำนาจของสารละลายเอทีเอสไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด ในการสกัดทองแดง

1) สกัดทองแดงจากสลัดจ์ด้วยสารละลายเอทีเอส โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง 3.2.2 จะได้สารละลาย Cu-EDTA

2) แยกทองแดงออกจากสารละลายเอทีเอสที่ได้จากข้อ 1 (Cu-EDTA) โดยกระบวนการซีเมนต์ชันด้วยผงเหล็ก โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง 3.2.3 จะได้สารละลาย Fe-EDTA

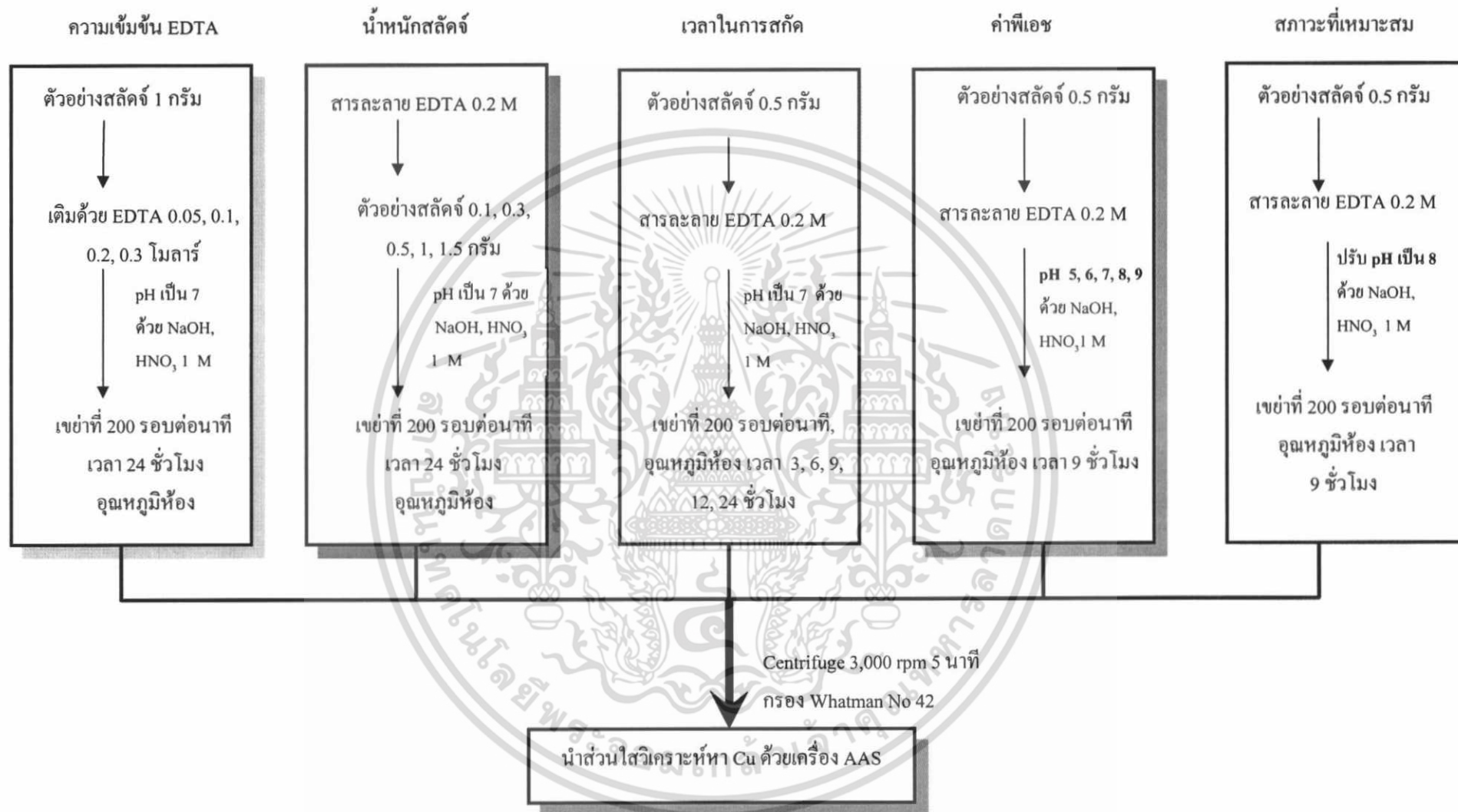
3) นำสารละลาย Fe-DETA ที่ได้จากข้อ 2 ไปปรับพีเอชเป็น 13 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อตกตะกอนเหล็ก

4) นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที

5) นำส่วนใสไปปรับพีเอชเป็น 8 ด้วยสารละลาย NaOH 1 โมลาร์ จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายเอทีเอสโดยวัดปริมาณ Dissolved organic carbon (DOC) ด้วยเครื่อง Total Organic Carbon (TOC) โดยเปรียบเทียบกับสารละลายเอทีเอสที่บริสุทธิ์ (Di Palma *et al.*, 2003)

6) นำสารละลายเอทีเอสจากข้อ 5 ไปใช้ซ้ำ โดยศึกษาจำนวนครั้งในการใช้อำนาจของสารละลายเอทีเอส โดยทำการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ และแยกทองแดงออกจากสารละลาย EDTA เช่นเดียวกับข้อ 1-5

7) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดทองแดงของสารละลายเอทีเอสที่ใช้ซ้ำกับสารละลายเอทีเอสบริสุทธิ์ที่สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.2



รูปที่ 3.5 สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากตัวอย่างสลัดจ์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโลหะทองแดงออกจากสลัดจ์ของกระบวนการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าในโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้สารละลายอีดีทีเอ และการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก เพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและลดปริมาณของเสียอันตรายที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์ 2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์โดยใช้สารละลายอีดีทีเอเป็นสารสกัด 3) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลาย Cu-EDTA โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก และ 4) ศึกษาการนำสารละลายอีดีทีเอกลับมาใช้ซ้ำ โดยวิธีตกตะกอนเหล็ก (II) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์

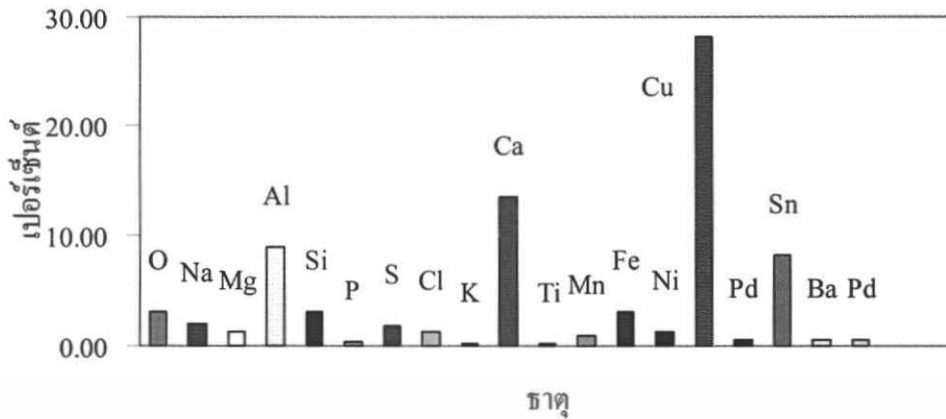
4.1.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์

จากการศึกษาคุณลักษณะเบื้องต้นของสลัดจ์อบแห้งได้แก่ พีเอช โออาร์พี (ORP) และปริมาณโลหะหนักชนิดต่าง ๆ วิเคราะห์โดย เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF) และหาความเข้มข้นของทองแดงในสลัดจ์โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์

สลัดจ์ข้อบ่งชี้	ค่าเฉลี่ย (N =3)
pH	8.59 ± 0.06
ORP (mV)	-139.77 ± 5.20
ปริมาณโลหะหนัก ในสลัดจ์ข้อบ่งชี้ (%)	
Cu	28.1
Al	9.00
Sn	8.24
Ni	1.28
Fe	3.16
Mn	0.84
ความเข้มข้นทองแดงทั้งหมด/การชะละลาย (กรัม/กิโลกรัมสลัดจ์)	94.30 ± 3.46

จากการศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของสลัดจ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF) พบว่าตัวอย่างสลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษามีความเข้มข้นของทองแดงมากที่สุดคือ 28.1 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาอลูมิเนียม 9 เปอร์เซ็นต์ และดีบุก 8.24 เปอร์เซ็นต์ และแคลเซียม 13.38 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-1.1 ภาคผนวก ก) ซึ่งทองแดงเหล่านี้ได้จากกระบวนการล้าง และการกัดละลายแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกระบวนการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นทองแดงทั้งหมดต่อการชะละลายสลัดจ์ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) พบทองแดง 94.30 ± 3.46 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์ (ดูรายละเอียดในตาราง ก-1.4 ภาคผนวก ก) ซึ่งมีปริมาณทองแดงค่อนข้างสูง เหมาะกับการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang *et al.* (2007) ที่พบว่าสามารถนำทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีอื่นๆ พบว่าสลัดจ์มีค่าไออาร์พี -139.77 ± 5.20 มิลลิโวลต์ แสดงว่าสารมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC99778/>) ค่าพีเอชเท่ากับ 8.59 ± 0.06 เนื่องจากมีการใช้แคลเซียมออกไซด์ในการตกตะกอนโลหะหนักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย



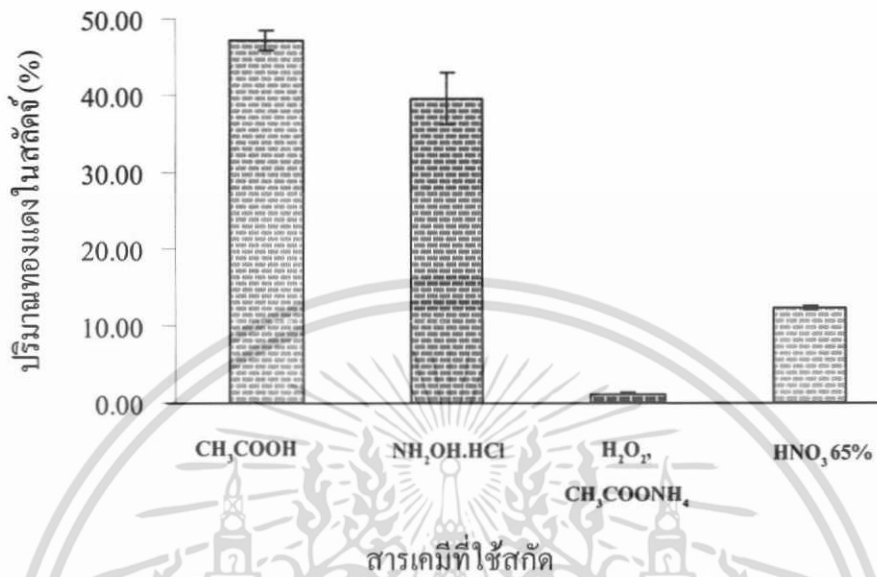
รูปที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ของธาตุต่างๆในสลักจ็โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า วิเคราะห์โดย XRF

4.1.2 ผลการศึกษาสัดส่วนของทองแดงในรูปต่าง ๆ ที่ยึดเกาะในสลักจ็โดยการสกัดแบบ ลำดับขั้น

ผลการสกัดทองแดงจากสลักจ็แบบลำดับขั้น โดยวิธี BCR แสดงดังรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียด ในตาราง ก-2.1 ภาคผนวก ก) พบว่ารูปและสัดส่วนของทองแดงในสลักจ็ที่ได้จากการสกัดในขั้น แรกสูงสุดเท่ากับ 47.08 ± 1.26 เปอร์เซ็นต์ (44.48 กรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งทองแดงในขั้นนี้จับกับ คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ง่าย รองลงมาคือ ขั้นที่สองสกัดด้วย สารละลายไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) พบทองแดง 39.50 ± 3.39 เปอร์เซ็นต์ (37.32กรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งทองแดงในขั้นตอนนี้จับอยู่กับเฟอร์รัสออกไซด์หรือแมงกานีสออกไซด์ สามารถถูกชะออกได้ในสภาวะที่เป็นกรด ส่วนขั้นที่สามชะด้วยสารละลายเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% และ 1 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ พบปริมาณทองแดงน้อยที่สุดคือ 1.17 ± 0.12 เปอร์เซ็นต์ (1.10 กรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งทองแดงในขั้นตอนนี้จับอยู่กับสารอินทรีย์ (Organic mater; OM) ซึ่ง สามารถถูกชะในสภาวะออกซิไดซ์ และขั้นตอนสุดท้ายชะด้วยกรดไนตริก (HNO_3) โดยวิธีย่อยด้วย ไมโครเวฟ แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ตามวิธีของ SW-846 Method 3050B (US EPA, 1996) ทองแดงในขั้นนี้ถูกจับอยู่กับโลหะที่มีความเฉื่อยต่อการ เกิดปฏิกิริยาถูกชะได้ยากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าสลักจ็มีทองแดงในรูปนี้สูงเป็นอันดับ 3 เท่ากับ 12.26 ± 0.36 เปอร์เซ็นต์ (11.58 กรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัย ของ Chang *et al.* (2007) ที่พบว่าทองแดงในสลักจ็โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอยู่ในรูปที่ละลาย และสามารถแลกเปลี่ยนไอออน กับรูปที่จับอยู่แมงกานีสออกไซด์ เป็นส่วนใหญ่ จากการสกัด ทองแดงแบบลำดับขั้นทั้ง 4 ขั้นตอน พบว่ามีปริมาณทองแดงรวมเท่ากับ 94.48 กรัมต่อกิโลกรัม (ตาราง ก 2.1 ภาคผนวก ก) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณทองแดงที่ได้จากวิธีย่อยสลักจ็ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเวฟด้วยกรดไนตริก (HNO_3) ตามวิธีของ SW-846 Method 3050B (US EPA, 1996) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (94.3 ± 3.46 กรัมต่อกิโลกรัม) ดูรายละเอียดในตาราง ก-1.4 ภาคผนวก ก



รูปที่ 4.2 สกัดส่วนของรูปทองแดงที่พบในสลัดจ์ จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
หมายเหตุ: แถบความผิดพลาดแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย หากไม่ปรากฏ
แสดงว่ามีเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยมาก

4.2 สภาวะที่เหมาะสมในสกัดทองแดงจากสลัดจ์โดยใช้สารละลายอิดีทีเอ

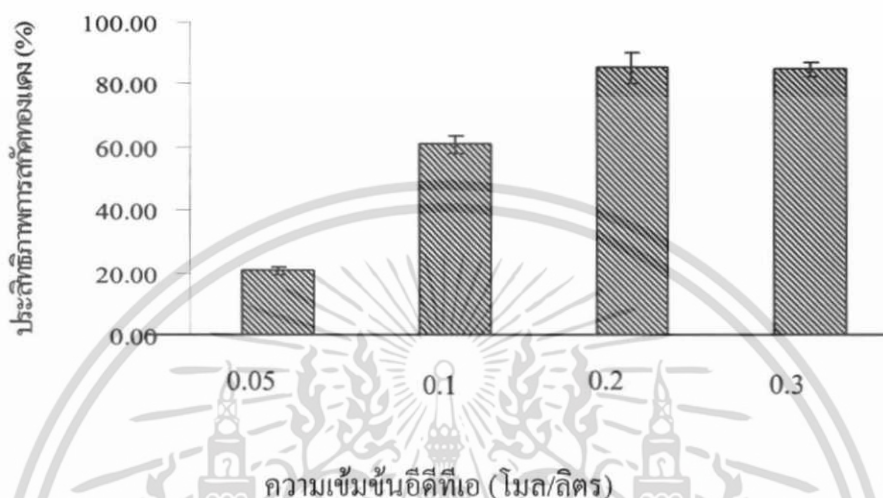
การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการนำทองแดงจากสลัดจ์กลับมาใช้ใหม่ โดยการทดลองแบบแบตช์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นอิดีทีเอ ปริมาณสลัดจ์ ระยะเวลาในการสกัด พิเศษของสารสกัด

4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายอิดีทีเอที่เหมาะสม

ผลการทดลองในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ 1 กรัม ด้วยสารละลายอิดีทีเอที่ความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.2, และ 0.3 โมลต่อลิตร จำนวน 20 มิลลิลิตร ที่พีเอช 7 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ ต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอิดีทีเอ จะมีผลทำให้ปริมาณทองแดงถูกสกัดออกจากสลัดจ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้นของสารละลายอิดีทีเอ 0.2 โมลต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (รายละเอียดในตาราง ข-1.1 ภาคผนวก ข) นั่นคือที่ความเข้มข้นของสารละลายอิดีทีเอ 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร สามารถสกัดทองแดงได้ 20.63 ± 1.21 เปอร์เซ็นต์ (19.45 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์) และ 60.70 ± 3.06 เปอร์เซ็นต์ (57.24 กรัมต่อกิโลกรัมสลัดจ์) ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของสารละลายอิดีทีเอ 0.2 และ 0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมลต่อลิตร เท่ากับ 85.19 ± 4.78 เปอร์เซ็นต์ (80.33 กรัมต่อกิโลกรัมสัลดจ์) และ 84.68 ± 2.28 เปอร์เซ็นต์ (79.85 กรัมต่อกิโลกรัมสัลดจ์) ตามลำดับ ทั้งสองความเข้มข้นนี้สามารถสกัดทองแดงได้ใกล้เคียงกัน โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตาราง ค-1 ภาคผนวก ค) ดังนั้น สารละลายอีดีทีเอที่ 0.2 โมลต่อลิตรจึงเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสกัด

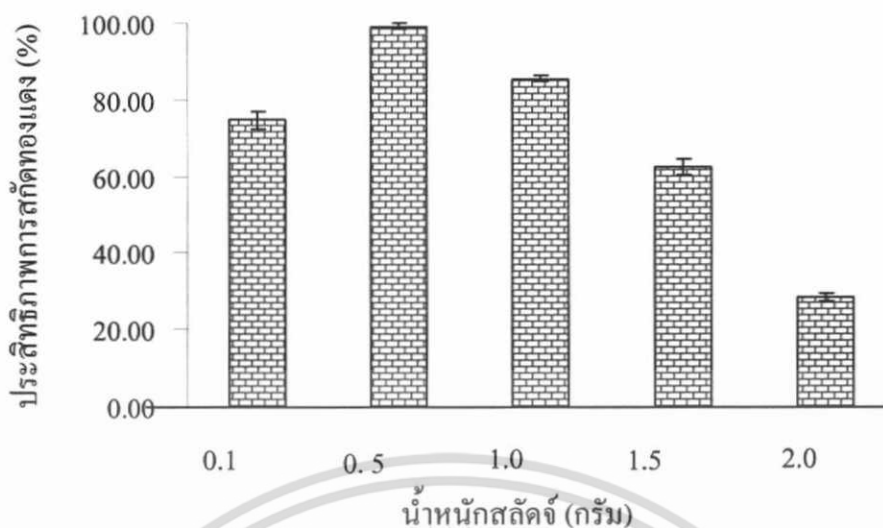


รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายอีดีทีเอต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงออกจากสัลดจ์

4.2.2 ผลของปริมาณสัลดจ์ที่เหมาะสม

ผลการศึกษาปริมาณสัลดจ์โดยแปรค่าน้ำหนักสัลดจ์ที่ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม นำมาสกัดทองแดงด้วยสารละลายอีดีทีเอความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมจากผลการทดลอง 4.2.1 ที่พีเอช 7 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.2 ภาคผนวก ข) พบว่า ปริมาณสัลดจ์ที่ 0.5 กรัม มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงสูงสุด คือ 99.20 ± 0.80 เปอร์เซ็นต์ (93.55 กรัมต่อกิโลกรัม) โดยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตาราง ค-2 ภาคผนวก ค) ที่ปริมาณสัลดจ์ลดลง (0.1 กรัม) มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง 74.78 ± 2.54 เปอร์เซ็นต์ (70.52 กรัมต่อกิโลกรัม) ส่วนที่ปริมาณสัลดจ์เพิ่มขึ้น แนวโน้มประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของสารละลายอีดีทีเอจะลดลง นั่นคือที่ปริมาณสัลดจ์ 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง 85.66 เปอร์เซ็นต์ (80.78 ± 0.84 กรัมต่อกิโลกรัม) 62.47 ± 2.01 เปอร์เซ็นต์ (58.91 กรัมต่อกิโลกรัม) และ 27.90 ± 1.01 เปอร์เซ็นต์ (26.31 กรัมต่อกิโลกรัม) ตามลำดับการที่ประสิทธิภาพการสกัดลดลงเมื่อปริมาณสัลดจ์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารละลายอีดีทีเอถูกดูดซับบนพื้นผิวของสัลดจ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chmielewski (1997)

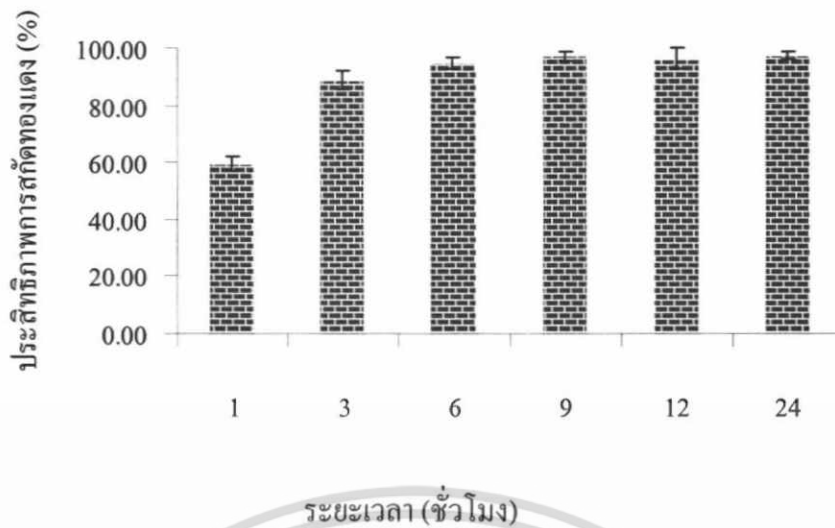
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการสัลดัจทองแดงจากสัลดัจที่ปริมาณต่าง ๆ

4.2.3 ผลของเวลาสัลดัจที่เหมาะสม

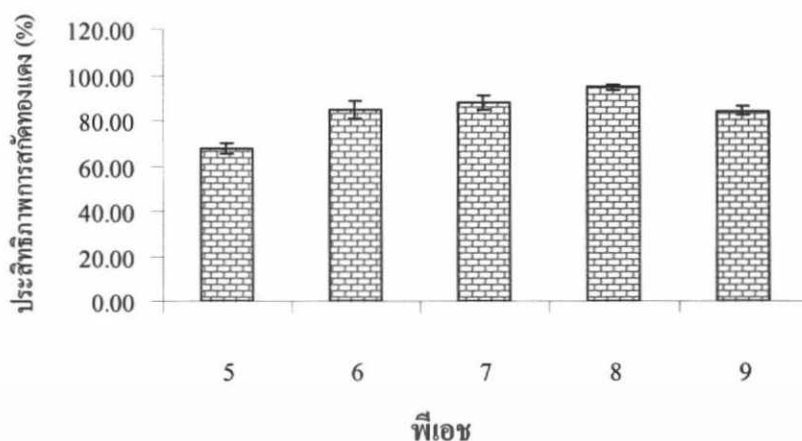
ผลการศึกษาระยะเวลาในการสัลดัจทองแดงจากสัลดัจที่เหมาะสม โดยใช้ปริมาณสัลดัจ 0.5 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณสัลดัจที่เหมาะสมจากผลการทดลอง 4.2.2 และสารละลายอีดีทีเอความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมจากผลการทดลอง 4.2.1 โดยแปรค่าเวลาในการสัลดัจ ได้แก่ 1, 3, 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมง และเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาสัลดัจเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสัลดัจมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่เวลาสัลดัจ 9 ชั่วโมง โดยสามารถสัลดัจทองแดงได้ 97.21 ± 1.53 เปอร์เซ็นต์ (91.22 กรัมต่อ กิโลกรัม) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.1-3 ภาคผนวก ข) จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในสารสัลดัจอีดีทีเอที่เวลา 9, 12 และ 24 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตาราง ค-3 ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.5 ผลของเวลาในการสกัดต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์

4.2.4 ผลของพีเอชของสารสกัดที่เหมาะสม

ผลการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายอีดีทีเอที่เหมาะสมในการสกัดทองแดง โดยใช้ปริมาณสลัดจ์ 0.5 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมจากผลการทดลอง 4.2.2 และ สารละลายอีดีทีเอความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมจากผลการทดลอง 4.2.1 และใช้เวลาในการสกัด 9 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมจากผลการทดลอง 4.2.3 โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายอีดีทีเอเป็น 5, 6, 7, 8 และ 9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ และทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.1-4 ภาคผนวก ข) พบว่าที่พีเอช 5, 6, 7, 8 และ 9 มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง 67.61 ± 2.50 เปอร์เซ็นต์ (63.75 กรัมต่อกิโลกรัม), 84.55 ± 4.13 เปอร์เซ็นต์ (79.73 กรัมต่อกิโลกรัม), 87.78 ± 3.24 เปอร์เซ็นต์ (82.77 กรัมต่อกิโลกรัม), 94.88 ± 1.16 เปอร์เซ็นต์ (89.47 กรัมต่อกิโลกรัม) และ 84.06 ± 2.53 เปอร์เซ็นต์ (79.27 กรัมต่อกิโลกรัม) ตามลำดับ นั่นคือ พีเอช 8 มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงใกล้เคียงกับพีเอช 6 และ 7 (ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังรายละเอียดในตาราง ค-4 ภาคผนวก ค) ส่วนที่พีเอช 5 จะมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากค่าคงที่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงไอออนกับสารละลายอีดีทีเอมีค่าเท่ากับ $\text{Log } K_{\text{MY}} 15.5$ หรือเท่ากับพีเอช 6-8 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในบทที่ 2 (และ Chang *et al.* (2007) Kim and Ong (1999) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang *et al.* (2007) ที่พบว่าพีเอช 7 เป็นที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงด้วยสารละลายอีดีทีเอ ในงานวิจัยนี้ใช้พีเอช 8 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการสกัดสูงสุด ในการทดลองขั้นต่อไป

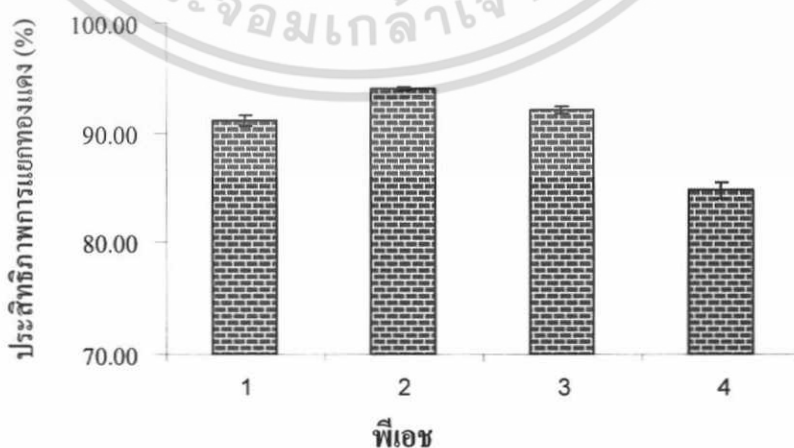


รูปที่ 4.6 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์

4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลาย Cu-EDTA โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก

4.3.1 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการซีเมนเตชัน

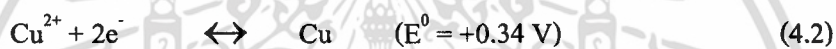
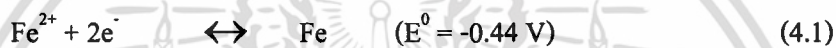
จากการนำสารละลาย Cu-EDTA ที่ได้จากการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ 0.5 กรัม ด้วยสารละลายอีดีทีเอความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่พีเอช 8 ระยะเวลาในการสกัด 9 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะเหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองที่ 4.2 มาศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลายอีดีทีเอ โดยกระบวนการซีเมนเตชัน ที่อัตราส่วนสารละลายอีดีทีเอต่อสลัดจ์เท่ากับ 20:1 (Chang *et al.*, 2007) โดยแปรค่าพีเอชเป็น 1, 2, 3 และ 4 ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร โดยปั่นกวนกับผงเหล็ก 1.28 กรัม (อัตราส่วนโดยโมลของเหล็กต่อทองแดงเท่ากับ 8:1) ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่เหลือในสารละลาย Cu-EDTA ที่ได้จากการสกัด สลัดจ์ ที่พีเอช 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 3.23.81, 0.30, 2.27 และ 9.56 กรัมต่อกิโลกรัม นั่นคือมี ประสิทธิภาพในการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลาย Cu-EDTA เท่ากับ 91.07 ± 0.49 , 94.00 ± 0.18 , 92.03 ± 0.35 และ 84.74 ± 0.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.1 ภาคผนวก ข) กล่าวคือ เมื่อพีเอชลดลงจาก 4 เป็น 2 ประสิทธิภาพการตกตะกอนทองแดงออก จากสารละลายอีดีทีเอจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพีเอชต่ำกว่า 2 ประสิทธิภาพการตกตะกอน จะเริ่มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 2 จะมีประสิทธิภาพในการ ตกตะกอนทองแดงสูงสุด เนื่องจากกระบวนการซีเมนเตชันเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน จะเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชเป็นกรด (สมการที่ 4.1-4.2) เฟอร์รัสไอออนมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสูงกว่าคิวปริกไอออน ทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน ของศักย์ครึ่งเซลล์ทั้งสองโดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ + 0.78 V ดังสมการที่ 4.3 แสดงว่า ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง



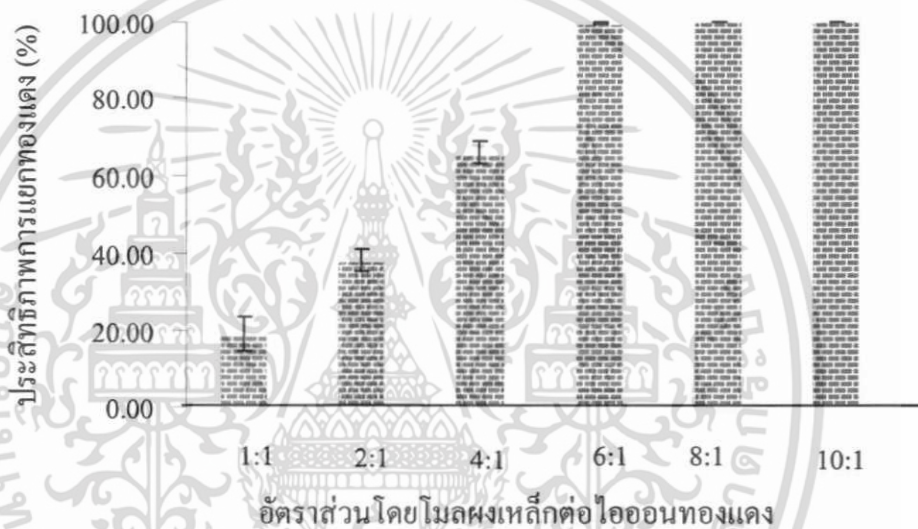
ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim and Ong (1999) และ Chang *et al.* (2007) เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นในระหว่างเกิดปฏิกิริยาซีเมนเตชัน จะพบไฮดรอกไซด์เหล็กมากขึ้น (Stefanowicz *et al.*, 1997) ส่งผลต่อการแตกตัวของเฟอร์รัสไอออน อย่างไรก็ตาม ที่พีเอช 1 ประสิทธิภาพในการ ตกตะกอนทองแดงจะลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนจะเกิดการ Protonate กับ EDTA (Chang *et al.* 2007) จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าทองแดง ทั้งหมดในสารสกัดอีดีทีเอที่พีเอช 1, 2 และ 3 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตาราง ค-5 ภาคผนวก ค)

4.3.2 ผลของสัดส่วนโดยโมลของผงเหล็กต่อทองแดงที่เหมาะสม

ผลการศึกษาสัดส่วน โดยโมลของผงเหล็กต่อทองแดงที่เหมาะสมในกระบวนการ ซีเมนเตชัน โดยการแยกทองแดงออกจากสารละลาย Cu-EDTA ที่พีเอช 2 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสม ที่ได้จากข้อ 4.3.1 โดยแปรค่าอัตราส่วน โดยโมลของเหล็กต่อทองแดงเป็น 1:1, 2:1, 4:1, 6:1, 8:1 และ 10:1 จากนั้นทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที (Fouad *et al.*, 2005) ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงที่เหลือในสารละลาย Cu-EDTA ที่ได้จากการสกัด สลัดจ์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเหล็กต่อทองแดงเป็น 1:1, 2:1, 4:1, 6:1, 8:1 และ 10:1 มีค่าเท่ากับ

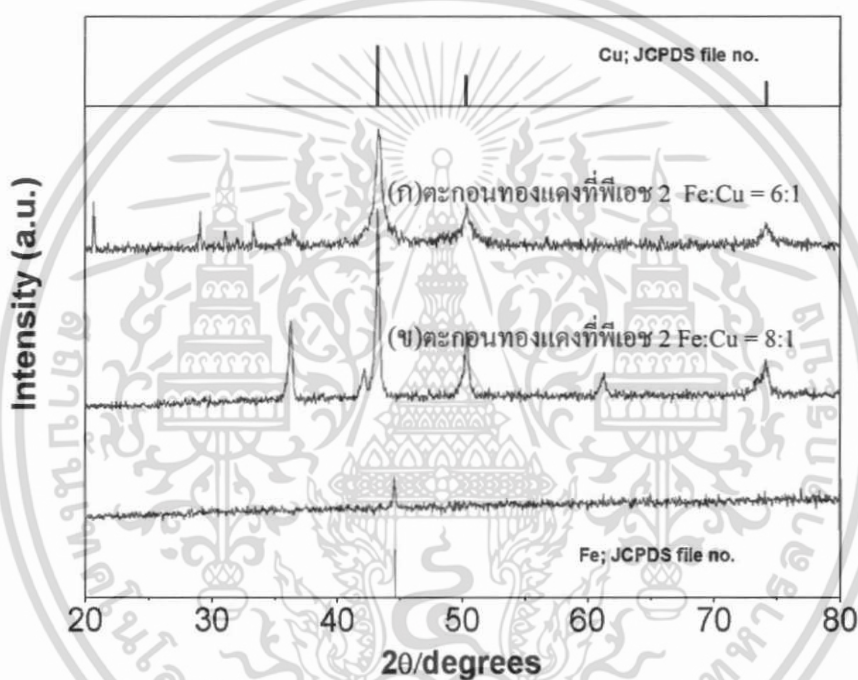
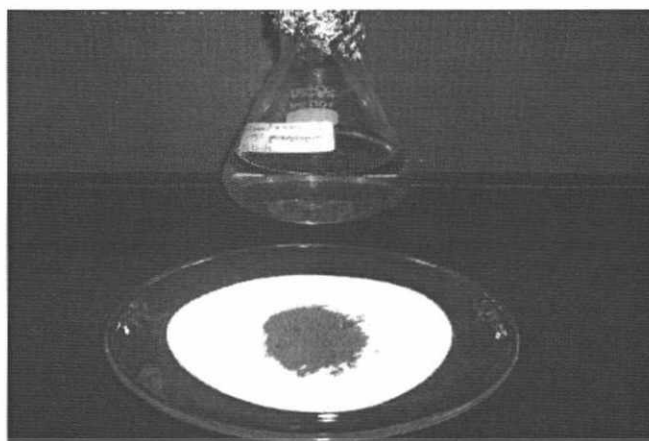
76.44, 58.30, 32.20, 0.25, 0.05 และ 0.03 กรัมต่อกิโลกรัม นั่นคือมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลายยีสต์ที่เอทีที่ใช้สกัดเท่ากับ 18.68 ± 4.39 , 38.18 ± 2.89 , 65.85 ± 2.77 , 99.74 ± 0.09 , 99.96 ± 0.00 และ 99.97 ± 0.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.2 ภาคผนวก ข) กล่าวคือ ที่อัตราส่วนของเหล็กต่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น จะมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนทองแดงมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของเหล็กในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการแยกทองแดงเริ่มคงที่ที่อัตราส่วนเหล็กต่อทองแดงโดยโมลเท่ากับ 6:1 ดังรูปที่ 4.8 (ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ รายละเอียดในตาราง ก-6 ภาคผนวก ก) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang *et al.* (2007) และ Fouad *et al.*, (2005) ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลของสัดส่วนโดย โมลของผงเหล็กต่อทองแดงต่อประสิทธิภาพในการแยกทองแดง

4.3.3 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของทองแดงที่ได้จากกระบวนการซีเมนต์ชั้นตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟกชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD)

จากการศึกษาความบริสุทธิ์ของทองแดงที่ได้จากกระบวนการซีเมนต์ชั้น (รูปที่ 4.9 ก)) ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟกชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD) ที่อัตราส่วนโดย โมลของผงเหล็กต่อทองแดง 6:1 และ 8:1 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข)



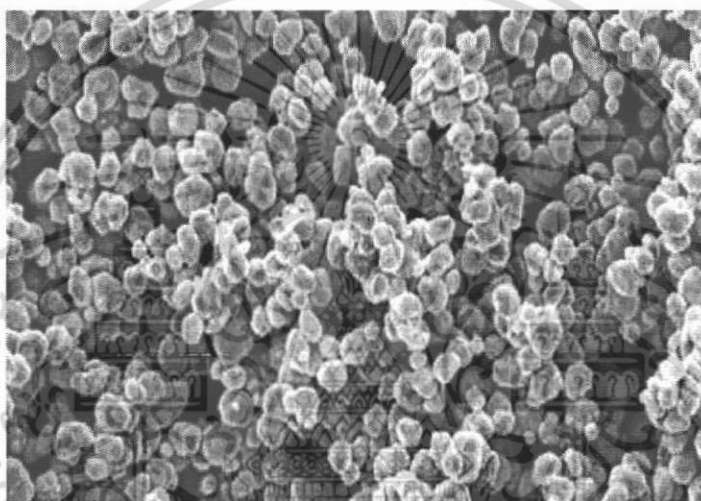
รูปที่ 4.9 ความบริสุทธิ์ของทองแดงที่ตกตะกอนได้ (ก) ตะกอนทองแดง (ข) รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของทองแดงที่ได้จากกระบวนการซิเมนต์เซชัน ที่สัดส่วน โดยโมลเหล็กต่อทองแดง 6:1 และ 8:1

ผลการวิเคราะห์ XRD ของการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่โดยเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของตะกอนทองแดงที่อัตราส่วนเหล็กต่อทองแดงระหว่าง 6:1 กับ 8:1 พบว่าตะกอนทองแดงที่ 6:1 พบตำแหน่งพีคตรงกับพีคมาตรฐานของทองแดงและไม่ปรากฏพีคของเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐานของเหล็ก แต่เมื่อสัดส่วนเพิ่มเป็น 8:1 ก็ไม่ปรากฏพีคของเหล็กแต่กลับเกิดพีครกวน ทำให้ได้ทองแดงไม่บริสุทธิ์ ดังนั้นจากผลการทดลองที่สัดส่วน 6:1 ในสถานะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนทองแดง

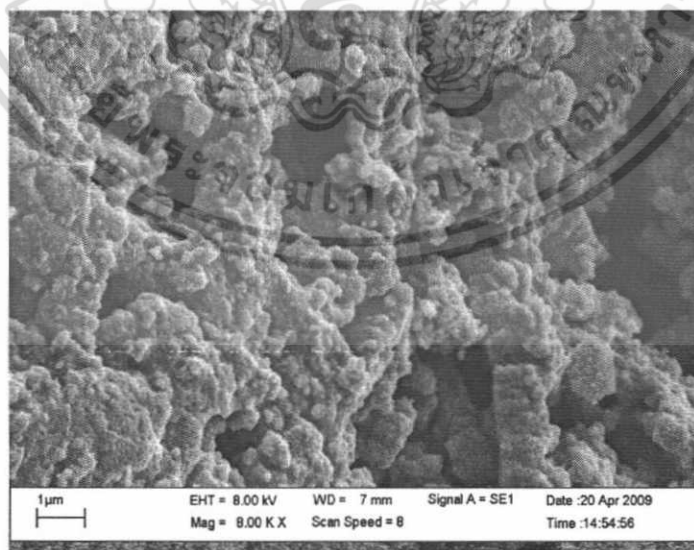
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของผลึกทองแดง

ผลการวิเคราะห์สัณฐานของผลึกทองแดงที่แยกได้ด้วยเครื่อง SEM พบว่าผลึกทองแดงที่แยกได้จากกระบวนการซีเมนเตชันโดยใช้อัตราส่วนเหล็กต่อทองแดงโดยโมล 6:1 จะมีลักษณะเป็นวงกลม กระจายตัวสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลึกทองแดงที่ได้จากงานวิจัยของ Midander (2007) ในรูปที่ 4.10 (ค) ส่วนผลึกทองแดงที่แยกได้จากกระบวนการซีเมนเตชันโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลเหล็กต่อทองแดง 8:1 (รูปที่ 4.10 (ข)) พบว่ามีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนติดกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลึกเหล็กออกไซด์ในงานวิจัยของ Phuengprasop and Unob (2007) (รูปที่ 4.10 (ง)) และสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ XRD ที่ผลึกที่ได้จะมีสารอินปนเปื้อน นอกเหนือจากทองแดง



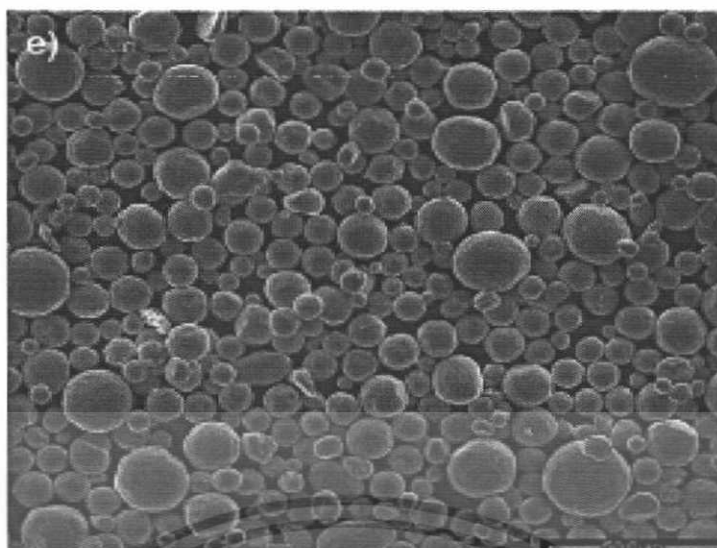
ก



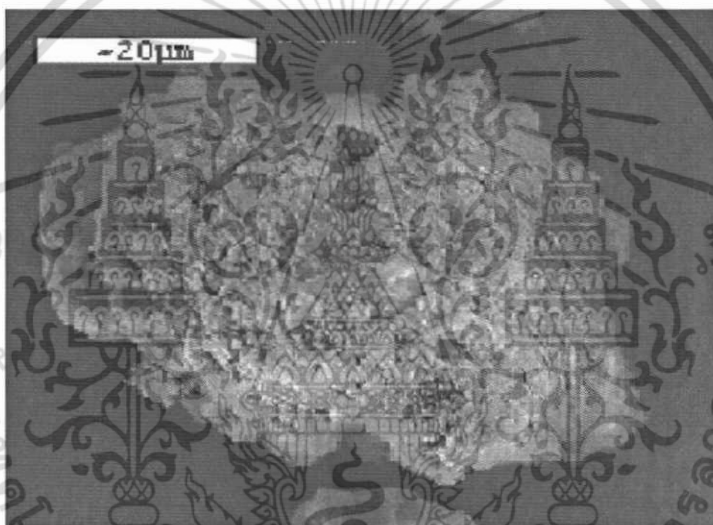
ข

รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของผลึกทองแดงที่ได้จากกระบวนการซีเมนเตชัน (ก) สัดส่วนโดยโมลเหล็กต่อทองแดง 6:1 (ข) สัดส่วนโดยโมลเหล็กต่อทองแดง 8:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก



ง

รูปที่ 4.10 ต่อ (ค) ผลึกทองแดง จากงานวิจัยของ Midander (2007) (ง) ผลึกเหล็กออกไซด์ จากงานวิจัยของ Phuengprasop and Unob (2007)

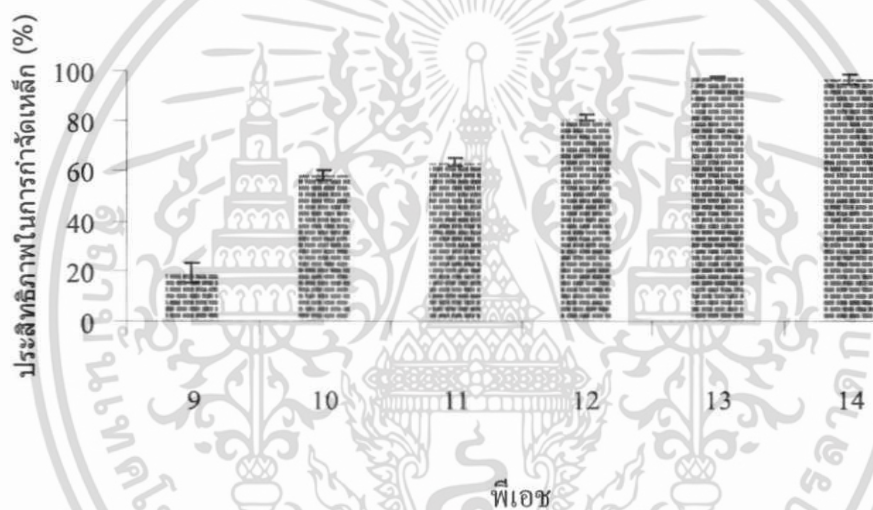
4.4 ผลการศึกษาการนำสารละลายอีดีทีเอกลับมาใช้ซ้ำ

4.4.1 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนเหล็ก

ผลการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กหลังจากตกตะกอนทองแดงด้วยกระบวนการซีเมนเตชัน โดยแปรค่าพีเอชให้มีค่าเป็น 9, 10, 11, 12, 13 และ 14 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอชเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.11) พบว่าที่พีเอช 9 ปริมาณเหล็กในสารสกัด 59.98 ± 2.85 กรัมต่อกิโลกรัม ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อปรับพีเอชเป็น 10, 11, 12, และ 13 ปริมาณเหล็กในสารสกัดได้เท่ากับ 288.88, 148.50, 130.03, 69.64, 9.77 และ 11.82 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับหรือมีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 19.13 ± 3.98 , 58.43 ± 1.79 , 63.63 ± 1.50 , 81.06 ± 1.11 , 97.27 ± 0.20 , 96.69 ± 2.10 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-3.1 ภาคผนวก ข) นั่นคือที่พีเอช 13 สภาวะเหมาะสมในการกำจัดเหล็กในงานวิจัยมีค่าเท่ากับ 13 โดยการปรับค่า pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์ในสารละลาย ปฏิกริยากับเฟอร์รัสไอออนได้เป็นตะกอนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang *et al.* (2007) จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าที่พีเอช 13 และ 14 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในตาราง ค-7 ภาคผนวก ค)



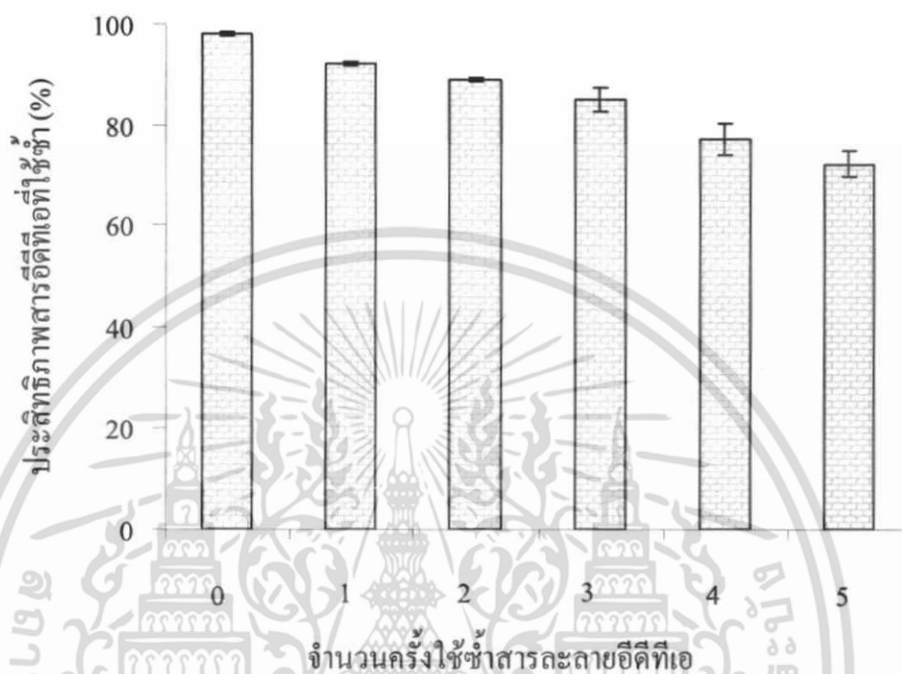
รูปที่ 4.11 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก

4.4.2 ผลของประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของสารละลายอีดีทีเอในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์

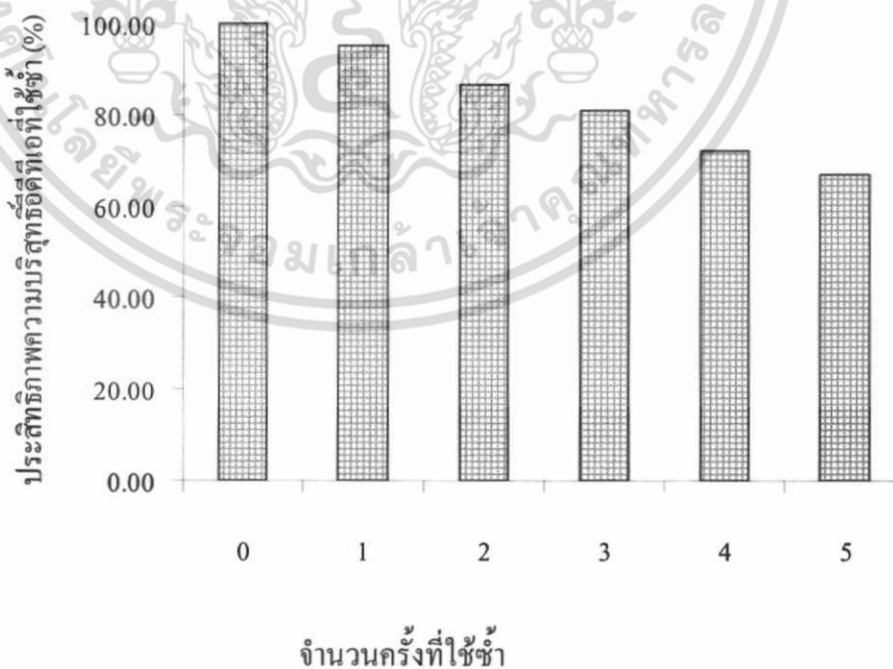
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของสารละลายอีดีทีเอในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ โดยศึกษาจำนวนครั้งที่ใช้ซ้ำของสารละลายอีดีทีเอ จำนวน 5 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12

จากผลการทดลอง พบว่าสารละลายอีดีทีเอสามารถใช้ซ้ำได้ 5 ครั้ง โดยมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-3.2 ภาคผนวก ข) เพิ่มจากการวิเคราะห์ด้วย ANOVA (ตาราง ค-8 ภาคผนวก ค) ผลการศึกษาคความบริสุทธิ์ของสารละลายอีดีทีเอ

โดยวิเคราะห์ค่า Dissolution Organic Carbon (DOC) ด้วย Total Organic Carbon (TOC) ในสารละลายอีดีทีเอที่ใช้สกัดสลัดจ์ซ้ำ ดังรูป 4.13 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-3.3 ภาคผนวก ข และ ตาราง ก-9 ภาคผนวก ก) พบว่าความบริสุทธิ์ของสารละลายอีดีทีเอมีแนวโน้มลดลง เมื่อจำนวนครั้งที่ใช้สกัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากสลัดจ์โดยใช้ซ้ำสารละลายอีดีทีเอ



รูปที่ 4.13 ความบริสุทธิ์ของสารละลายอีดีทีเอต่อจำนวนครั้งที่ใช้สกัดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ ด้วยสารละลายอิดีทีเอที่ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ โดยอัตราส่วนของน้ำหนักสลัดจ์ (กรัม) ต่อปริมาตรสารละลายอิดีทีเอ (มิลลิลิตร) เท่ากับ 1:20 และปรับพีเอชเท่ากับ 8 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการสกัดสลัดจ์ คือ 9 ชั่วโมง ความเร็วรอบที่ใช้ 200 รอบต่อนาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง
2. ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ด้วยสารละลายอิดีทีเอ เท่ากับ 85.19 เปอร์เซ็นต์
3. สภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลายอิดีทีเอ คือ มีค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 2 และสัดส่วนโดยโมลเหล็กต่อทองแดงที่เหมาะสม คือ 6: 1 และเวลาในการตกตะกอนทองแดงที่เหมาะสม คือ 30 นาที
4. สภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนเหล็ก (II) ออกจากสารสกัดอิดีทีเอโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ คือ ปรับค่าพีเอชเป็น 13 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
5. ประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของสารละลายอิดีทีเอ สามารถใช้สกัดทองแดงจากสลัดจ์ซ้ำ 5 ครั้ง โดยมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำผลการทดลองที่ได้ไปทดลองในระดับ Pilot scale
2. ควรศึกษาการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์ของกระบวนการชุบโลหะจากโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพิ่มเติม
3. ควรศึกษาการสกัดทองแดงโดยใช้สารคีเลตติ้งอื่น ๆ เช่น EDDHA, DTPA, HEDTA, NTA
4. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการนำสลัดจ์หลังจากสกัดทองแดงออกไปใช้ประโยชน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กรมควบคุมมลพิษ. 2541. คู่มือการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอน.

กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ. 74 น.

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. **marine pollution.**

< [http://www.pdc.go.th/In formation/saveearth/marine.htm](http://www.pdc.go.th/In%20formation/saveearth/marine.htm)>

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2550. **อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (IC และPCB).** mht.

เก็จวลี พุกษาทร, จริญญา พลายแก้ว และสุกัญญา มากมี. 1999. ผลของตัวแปรที่มีต่อความคงสภาพของกากตะกอน วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

จินดา เตชะศรีนทร์. 2551. รายงานการลักลอบทิ้งน้ำเสียสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากอุตสาหกรรมริมถนนบายพาสชลบุรี-พัทยา. ศูนย์วิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงานภาคตะวันออกเฉียง

ชุติมา ศรีวิบูลย์. 2547. เคมีวิเคราะห์พื้นฐาน กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาลัยรามคำแหง.

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2536. หลักเคมี 2 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนส โตร์.

มันสิน ตัฒกุลเวศม์. 2543. วิศวกรรมประปา เล่ม 2 พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ. : สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รังสรรค์ ปิ่นทอง. 2550. **บทความกองมลพิษ. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม**

สาโรจน์ เริ่มคำริห์. 2550. การปนเปื้อนของโลหะในน้ำและตะกอนดินบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน. คณะวิทยาศาสตร์ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

สิรินุช วชิรวัชรินทร์. 2547. “การนำกลับของแดงจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยสกัดด้วยตัวทำละลาย.” วิทยานิพนธ์สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาโรช บุญยกิจสมบัติ. 2535. “การบำบัดน้ำเสียทางเคมีในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดกลางและเล็ก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อินทรีรา หาญพงษ์พันธ์. 2539. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 6.

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. หน้า 495.

- อรุณี คงศักดิ์ไพศาล. 2540. เอกสารประกอบคำบรรยายวิชาเคมีวิเคราะห์ 2. กรุงเทพฯ: โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อุตสาหกรรม. 2543. “กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม” ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4.
- Abumaizar, R. J. and Smith, E. H. 1999. “Heavy metal contaminants removal by soil washing.” **J. Hazard. Mater.** 70(1-2): 71–86.
- Allen, H.E., Huang, C.P., Bailey, G.W., Bowers, A.R. 1995. **Metal Speciation and Contamination of Soil.** USA, Lewis publishers.
- Anxiang, L., Shuzhen, Z. and Quan, X. 2004 “Time effect on the fractionation of heavy metals in soil, **Geoderma.**” 125 : 225-234
- Biswas, A.K. and J.G.Reid. 1973. Investigation of the Cementation of Copper on iron at elevated temperature. **Trans of Min. Processing and Extra Metal : Section C.** 82 : 127-131
- Brooks, A.R. 1998. Pollution through trace elementals, pp. 429-476. In J.O.M. Brockris (ed.). **Environmental Chemistry.** Plenum Press, New York.
- Chang, F.C., Lo, S.L. and Ko, C.H. 2007. “Recovery of copper and chelating agents from sludge extracting solutions.” **Separation and Purification Technology.** 53: 49-56.
- Chmielewski, A.G., Urbanski, T.S. Migdal, 1997 “Separation technologies for metals recovery from industrial wastes.” **Hydrometallurgy** 45: 333–344.
- Chudoba, J. 1982. Control of Activation Sludge Filamentous Bulking IV: Effect of Sludge Regeneration. **Wat. sci. tech.**, v.14 pp. 73-93
- Codoba, E.M., Muoz, J.A., Blozquez, M.L., Gonzolez, F. and Ballester, A. 2008. “Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part : General aspects.” **Hydrometallurgy.** 93: 83-87.
- Coombs, C.F., Jr. 1990. **Printed Circuits Handbook.** 2nd ed. New York: McGraw – Hill.
- Daniel C.W. Tsang, W. Z., Irene M.C. Lo, 2007. Copper extraction effectiveness and soil dissolution issues of EDTA-flushing of artificially contaminated soil. **Chemosphere** 68 : 234-243
- Di Palma, L., Ferrantelli, P., Merli, C. and Biancifiori, F. 2003. “Recovery of EDTA and metal precipitation from soil flushing solutions.” **J. Haz. Mater. B.** 103: 153-168.
- Dib, A. and Makhloufi, L. 2004. “Cementation treatment of copper in wastewater: mass transfer in a fixed bed of iron spheres.” **Chemical Engineering and Processing** 43: 1265-1273.

- Eilbeck, W.J. and Mattock, G. 1998. **Chemical Processes in Waste Water Treatment**. Ellis Horwood Limited, England. 33: 101-110
- Fouad, O.A., and Basir, A.2005. "Cementation-induced recovery of self-assembled ultrafine copper powders from spent etching solutions of printed circuit boards." **Powder Technology** 159: 127-137.
- 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** Received 26 January 2007.
- Hammond, B. and Belile, R.R. 1990. **Metals in Casarett and Doll's Toxicology; The Basic Science of Poison**. 2d ed., Mc Millan Publ. Co., Inc., New York. 182 p.
- Hong, K.J., Tokunaga, S. and Kajiuchi, T. 2000. "Extraction of heavy metals from MSW incinerator fly ashes by chelating agents." **J. Hazard. Mater.** 75: 57-73.
- Ilyas, S., Anwar, M.A., Niazi, S.B. and Ghauri, M.A. 2007. "Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria." **Hydrometallurgy**. 88 (1-4): 180-188.
- Javier Lacal, M. Pilar da Silva, Rosario Garcia, M. Teresa Sevilla, Jesus R. Procopio, Lucas Hernandez. Study of Fractionation and potential mobility of metal in sludge from pyrite mining and affected river sediments: **changes in mobility over time and use of artificial ageing as a tool in environment impact assessment**. 124 (2003) 291-305
- Kaasalainen, M. and Yli-Halla, M. 2003. "Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soil." **Environ. Pollut.** 125: 225-233.
- Kari, F.G. and Giger, W. 1996. "Speciation and fate of ethylene diamine tetraacetate in municipal wastewater treatment." **Water Res.** 30: 122-134.
- Keskitalo, T., Tanskanen, J. and Kuokkanen, T. 2007. "Analysis of key patents of the regeneration of acidic cupric chloride etchant waste and tin stripping waste." **Resource, Conservation and Cycling** 49(3): 217-243.
- Kim, C. and Ong, S.K. 1999. "Recycling of lead-contaminated EDTA wastewater." **J. Hazard. Mater.** 69: 273-286.
- Klara Midander, Inger Odnevall Wallinder, Christofer Leygraf. 2007. In vitro studies of copper release from powder particles in synthetic biological media. **Environment Pollution**. 145: 51-59

- Khudenko, B.M. and Gould, J.P. 1991. "Specifics of cementation process for metals removal." **Sci. Tech.** 24(7): 235-246.
- Ku, Y. and Chen, C.H. 1992. "Removal of chelated copper from wastewaters by iron cementation." **Ind. Eng. Chem. Res.** 31: 1111-1115.
- Lacal, J., da. Silva, M.P., Garc'ia, R., Sevilla, M.T., Procopio, J.R. and Hern'andez, L. 2003. "Study of fractionation and potential mobility of metal in sludge from pyrite mining and affected river sediments: changes in mobility over time and use of artificial ageing as a tool in environment impact assessment." **Environ. Pollut.** 124(2): 291-305.
- LaGrege, M., Buckingham, P. and Evan, J.C. 1994. **Hazardous Waste Management.** McGraw-Hill International Editions, Singapore.
- Lankford, P.W. and Eckenfelder, W.W. 1990. **Toxicity Reduction in Industrial Effluents.** Van Nostrand Reinhold, New York. 350 p.
- Lee, J.-C., Song, H.T. and Yoo, J.-M. 2007. "Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea." **Resour. Conserv. Recycl.** 50(4): 380-397.
- Lide, D.R. 1995. **CRC Handbook of Chemistry and Physics,** CRC Press, Boca Raton.
- Lim, T-T., Chui, P-C. and Goh, K-H. 2005. "Process evaluation for optimization of EDTA use and recovery for heavy metal from a contaminated soil." **Chemosphere.** 58: 1031-1040.
- Macaskie, L.E., Creamer, N.J. and Essa, A.M.M. 2007. "A new approach for the recovery of precious metals from solution and from leachates derived from electronic scrap." **Biotechnol. Bioeng.** 96(4): 631-639.
- Mehmet kobyay, Orhan Taner Can and Mahmut Bayramoglu. (2003). Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. **Journal of Hazardous Materials.** 163-178
- Metcaf, Edd 2003. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse** 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Mossop, K.F. and Davidson, C.M. 2003. "Comparison of original and modified BCR sequential extraction procedures for the fractionation of copper, iron, lead, manganese and zinc in soils and sediments." **Analytica Chimica Acta.** 478 (1): 111-118. ISSN 0003-2670
- Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs, B.F. 2001. "An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments." **J. Hazard. Mater.** 85: 145-163.

- Muraleedharan, T.R., Iyengar, L., Venkobachar, C. 1991. "Biosorption – an attractive alternative for metal removal and recovery." **Curr. Sci.** 61(6): 379–385.
- Mc Neely, R.N., Neimanis, V.P. and Ayers, R.S. 1998. *Water Quality Sourcebook a Guide to water Quality Parameters* Inland water Directorate. Water Quality Branch, Ottawa, Canada, p. 89.
- Nadkarni, R.M. and Wadsworth, M.E. 1968. **Kinetic study of the cementation of copper with iron**, 919-941 p. Inproceeding of the Symposium Organized by the Institute of Mining and Metallurgy, London
- Nair, A., Juwarkar, A.A. and Devotta, S. 2008. "Study of speciation of metals in an industrial sludge and evaluation of metal chelators for their removal." **J. Hazard. Mater.** 152: 545–553.
- Neale, C.N., Bricka, R.M. and Chao, A.C. 1997. "Evaluating acids and chelating agents for removing heavy metals from contaminated soils." **Environ. Prog.** 16: 274–280.
- Nemati, K., Bakar, N.K.A., Sobhanzadeh, E. and Abas, M.R. "A modification of the BCR sequential extraction procedure to investigate the potential mobility of copper and zinc in shrimp aquaculture sludge." **Microchemical Journal.** 97 (2009): 165-169.
- Panda, B. and Das, S.C. 2001. "Electrowinning of copper from sulfate electrolyte in presence of sulfurous acid." **Hydrometallurgy** 59: 55–67.
- Peavy, H., Rowe, D.R. and Tchobanoglous, G. 1986. **Environmental Engineering**, McGraw-Hill, New York.
- Peters, R.W. 1999. "Chelant extraction of heavy metals from contaminated soils." **J. Hazard. Mater.** 66: 151–210.
- Powell, R.M., Puls, R.M., Hightower, S.K., and Sabatini, D.A. 1995. "Couple Iron Corrosion and Chromate Remediation." **Environ. Sci. Tech.** 29(8): 1913 –1922.
- Quevauviller, P., Rauret, G., Wuntau, H., Ure, A.M., Rubio, R., Lopez-Sanchez, J.F., Fiedler, H.D. and Griepink, B. 1994. "Evaluation of a sequential extraction procedure for the determination of extractable trace metal contents in sediments." **Fresenius J Anal. Chem.** 349: 808-814.
- Quinet, P., Proost, J. and Van Lierde, A. 2005. "Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes." **Miner. Metall. Process.** 22(1): 17–22.
- Reilly, C. 1998. **Metal Contamination of Food**. Applied Science Publ. Ltd., London. 235 p.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Sawyer, C.N. and McCarty, P.L. 1978. **Chemistry for Environmental Engineering**. 3d ed., McGraw-Hill, Inc., Singapore. 532 p.
- Sawyer, Perr McCarty and Gene Parklin. 1994. **Chemistry for Environmental Engineering**. 4th ed.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D. 1990. **Water Chemistry**, John Wiley & Sons.
- Stefanowicz, T., Osinska, M. and Napieralska-zagozda, S. 1997. "Copper recovery by cementation method." **Hydrometallurgy** 47: 69–90.
- Strickland, B.M. and Lawson, F. 1993. The measurement and interpretation of cementation rate data, In proceedings of the International Symposium on **Hydrometallurgy**, AIME, Chicago, 293-330.
- Sun, B., Zhao, F.J., Lombi, E. and McGrath, S.P. 2001. "Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA." **Environ. Pollut.** 113: 111–120.
- 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
- Tejowulan, R.S., Hendershot, W.H. 1998. Removal of trace metals from contaminated soils using EDTA incorporating resin trapping techniques, **Environ. Pollution**. 103 135–142.
- Thapanapong Phuengprasop and Fuangfa Unob. Preparation and use of Iron oxide-coated sewage sludge for metals removal from water. **Environmental Science**. Chulalongkorn University.
- Tsang, D.C.W., Zhang, W. and Lo, I.M.C. 2007. "Copper extraction effectiveness and soil dissolution issues of EDTA-flushing of artificially contaminated soil." **Chemosphere** 68(2): 234-243.
- Tejowulan, R.S. and Hendershot, W.H. 1998. "Removal of trace metals from contaminated soils using EDTA incorporating resin trapping techniques." **Environ. Pollut.** 103: 135–142.
- U.S. EPA, **Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils, Test Methods for Evaluating Solid Waste (SW-846-Method 3050B)**, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1996.
- Zaroual, Z. (2006). Contribution to the study of electro coagulation mechanism in basic textile effluent. **Journal of Hazardous Materials**; 73-78

[http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/r_puntharod/CH331_Coordination% 20
Chemistry \(10-02-53\)](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/r_puntharod/CH331_Coordination%20Chemistry%20(10-02-53))

[http://th.wikipedia.org/wiki \(15-02-53\)](http://th.wikipedia.org/wiki)

[http://www.pcd.go.th \(24-02-53\)](http://www.pcd.go.th)

[http://www.School.net.th/library/snet6/envi3/monpit-a/lead.htm \(05-03-53\)](http://www.School.net.th/library/snet6/envi3/monpit-a/lead.htm)

[http://www.buzzle.com/articles/chemical-properties-of-copper.html \(15-03-53\)](http://www.buzzle.com/articles/chemical-properties-of-copper.html)

[http://www.tnhpit.com/mahidol \(7-04-53\)](http://www.tnhpit.com/mahidol)

[http://www.kmitl.ac.th/~kbittibh/home2/BOOKS/Packaging/CHVI.pdf \(14-03-53\)](http://www.kmitl.ac.th/~kbittibh/home2/BOOKS/Packaging/CHVI.pdf)

[http://www.hebeichengxin.com/cgi/search-
en.cgi?f=product_en_1_+company_en_1_&id=431931&t=product_en_1_\(1-04-53\)](http://www.hebeichengxin.com/cgi/search-en.cgi?f=product_en_1_+company_en_1_&id=431931&t=product_en_1_(1-04-53))



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสตัคซ์

จากผลการวิเคราะห์อณินทรีย์วัตถุในตัวอย่างสตัคซ์ โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ ก-1.1

ตารางที่ ก-1.1 อณินทรีย์วัตถุในตัวอย่างสตัคซ์

ธาตุ	ค่าที่วัดได้ (%)	สารประกอบ	ค่าที่วัดได้ (%)
Pd	0.153	PdO	0.153
K	0.222	K ₂ O	0.240
Ti	0.224	Ti ₂ O	0.373
P	0.319	PbO	0.479
Pb	0.474	BaO	0.621
Ba	0.556	P ₂ O ₅	0.73
Mn	0.840	MnO	1.10
Cl	1.20	Cl	1.20
Mg	1.22	NiO	1.63
Ni	1.28	MgO	2.02
Na	2.07	Na ₂ O	2.80
Si	3.09	Fe ₂ O ₃	4.52
Fe	3.16	SO ₃	4.62
Ca	13.38	Si ₂ O	6.62
Sn	8.24	CaO	10.3
Al	9.00	SnO ₂	10.5
Cu	28.1	Al ₂ O ₃	17.0
O	30.4	CuO	35.2
Total	100	Total	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชของตัวอย่างสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักสลัดจ์ (กรัม)	พีเอช	ค่าเฉลี่ย	SD
สลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	1	5.0011	8.53	8.59	0.06
	2	5.0014	8.66		
	3	5.0012	8.57		

ตารางที่ ก-1.3 ผลการศึกษาค่าไออาร์พีของตัวอย่างสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักสลัดจ์ (กรัม)	ไออาร์พี	ค่าเฉลี่ย	SD
สลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	1	5.0011	-134.00	-139.77	5.2
	2	5.0014	-144.10		
	3	5.0012	-141.20		

ตารางที่ ก-1.4 ความเข้มข้นของคอปเปอร์ทั้งหมดในสลัดจ์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่าง	ครั้งที่	สลัดจ์	Abs	Abs	ปริมาตร	เจือจาง	Cu	Cu	ค่าเฉลี่ย	SD
สลัดจ์		(g)	แบลนด์	ตัวอย่าง	(ml)	(เท่า)	(mg/l)	(g/Kg)	(g/Kg)	
ชุดทดลอง	1	0.4989	0.001	0.211	50	400	2.0420	81.8608	94.3	3.46
	2	0.4997	0.001	0.238	50	400	2.3256	93.0811		
	3	0.5010	0.001	0.243	50	400	2.3782	94.9362		

กราฟมาตรฐาน* $Y = 0.0952X + 0.0156$

กำหนดให้ Y คือ Abs., X คือ ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)

วิธีคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/กิโลกรัมสลัดจ์แห้ง)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของทองแดงคำนวณจากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัม/ลิตร)} \times \text{ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร)} \times \text{อัตราส่วนเจือจาง}}{\text{น้ำหนักสลัดจ์อบแห้ง (กรัม)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์ในสลัดจ์จากโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีสกัดแบบเป็นลำดับขั้น

ตารางที่ ก-2.1 ผลการศึกษารูปของคอปเปอร์ที่พบในสลัดจ์แห้งจากโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

รูปฟอร์ม Cu	สลัดจ์ (g)	Abs แบลงก์	Abs ต.ย.	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	Cu (mg/l)	Cu (g/Kg)	Avg. (g/Kg)	Cu (%)	SD
รูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้	0.9981	0.001	0.375	50	200	4.3239	43.32	44.48	47.08	1.26
	1.0002	0.001	0.396	50	200	4.5704	45.69			
	0.9889	0.001	0.381	50	200	4.3944	44.44			
รูปที่จับกับ MnO และ FeO	0.9981	0.001	0.337	50	200	3.8779	38.85	37.32	39.50	3.39
	1.0002	0.001	0.343	50	200	3.9484	39.48			
	0.9889	0.001	0.29	50	200	3.3263	33.64			
รูปที่ถูกดูดซับที่ผิวของสลัดจ์	0.9981	0.001	0.027	50	100	0.2394	1.20	1.10	1.17	0.12
	1.0002	0.001	0.026	50	100	0.2277	1.14			
	0.9889	0.001	0.023	50	100	0.1925	0.97			
รูปที่เหลือ	0.6086	0.001	0.1302	50	100	1.4507	11.91	11.58	12.25	0.36
	0.7401	0.001	0.1526	50	100	1.7136	11.58			
	0.6401	0.001	0.1292	50	100	1.4390	11.24			

กราฟมาตรฐาน: $y = 0.0852x + 0.0056$

กำหนดให้ Y คือ Abs., X คือ ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)

$$\text{ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/กิโลกรัมสลัดจ์)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของทองแดงคำนวณจากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัม/ลิตร)} \times \text{ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร)} \times \text{อัตราส่วนเจือจาง}}{\text{น้ำหนักสลัดจ์อบแห้ง (กรัม)}}$$

$$\% \text{ทองแดงในแต่ละรูปฟอร์ม} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของทองแดงในแต่ละฟอร์ม} \times 100}{\text{ค่าเฉลี่ยของผลรวมความเข้มข้นทองแดงในแต่ละฟอร์ม}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณประสิทธิภาพการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการซีเมนต์ชัน เมื่อทดสอบกับสลัดจ์ตัวอย่าง จากจาก โรงงานผลิตแผงวงจรรีเลย์ทรอนิกส์

ที่มีความเข้มข้นของไอออนทองแดงเริ่มต้น 0.238 มิลลิกรัม/ลิตร

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาณความเข้มข้นของคอปเปอร์ทั้งหมดในสลัดจ์ตัวอย่าง

$$Y = 0.0952 X + 0.0156$$

$$X = \frac{(0.238 - 0.001) - 0.0156}{0.0952} = 2.3256 \text{ mg/l}$$

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{2.3256 \text{ mg/l} \times 50 \text{ ml} \times 400 \text{ เท่า}}{0.4997 \text{ g}} = 93.0811 \text{ g/Kg}$$

$$= 93.0811 \text{ g/Kg}$$

ปริมาณความเข้มข้นแต่ละรูปของคอปเปอร์ที่พบในสลัดจ์แห้ง

ตัวอย่างการคำนวณ

$$Y = 0.0852 X + 0.0056$$

$$X = \frac{(0.037 - 0.001) - 0.0056}{0.0852} = 4.3239 \text{ mg/L}$$

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{4.3239 \text{ mg/l} \times 50 \text{ ml} \times 100 \text{ เท่า}}{0.9981 \text{ g}} = 43.3217 \text{ g/Kg}$$

$$= 43.3217 \text{ g/Kg}$$

$$\% \text{ Cu} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ย [Cu] ที่ได้แต่ละรูป} \times 100}{\text{ค่าเฉลี่ยของผลรวม [Cu] ในแต่ละรูป}} = \frac{43.3217 \times 100}{94.48}$$

$$\% \text{ Cu} = 45.85$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

**ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์ของ
โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายอดีทีเอและการนำทองแดง
กลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการซีเมนต์ชันด้วยผงเหล็ก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคอปเปอร์ออกจากสลัดจ์ของโรงงานหุบโหละด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลาย อีดีทีเอ

ตารางที่ ข-1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์ที่สกัดได้จากสลัดจ์โดยแปรค่าความเข้มข้น

ชุดทดลอง	EDTA (mol/L)	สลัดจ์ (g)	Abs แบลงค์	Abs ต.ย.	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (ml)	Cu (mg/L)	Cu (g/Kg)	Avg. (g/Kg)	Cu %	SD
1	0.05 M	1.0087	0.003	0.084	50	250	1.5313	18.98	19.45	20.63	1.21
		1.0144	0.003	0.083	50	250	1.5119	18.63			
		1.0161	0.003	0.092	50	250	1.6867	20.75			
2	0.1 M	1.0008	0.003	0.161	50	400	3.0276	60.50	57.24	60.70	3.06
		1.0016	0.003	0.150	50	400	2.8138	56.19			
		1.0016	0.003	0.147	50	400	2.7555	55.02			
3	0.2 M	1.0128	0.003	0.227	50	400	4.3101	85.11	80.33	85.19	4.78
		1.0131	0.003	0.213	50	400	4.0381	79.72			
		1.0552	0.003	0.212	50	400	4.0187	76.17			
4	0.3 M	1.0087	0.003	0.218	50	400	4.1353	81.99	79.85	84.68	2.28
		1.0144	0.003	0.208	50	400	3.9409	77.70			
		1.0161	0.003	0.214	50	400	4.0575	79.86			

สารละลายอีดีทีเอ 0.05 M, 0.1 M, 0.2 M, 0.3 M

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.05146X + 0.0022$

กำหนดให้ Y คือ Abs., X คือ ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)

$$\begin{aligned} \text{ตัวอย่างการคำนวณ} \quad Y &= 0.05146 X + 0.0022 \\ X &= \frac{(0.084 - 0.003) - 0.0022}{0.05146} = 1.5313 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{1.5313 \text{ mg/L} \times 50 \text{ mL} \times 250 \text{ เท่า}}{1.0087 \text{ g}} = 18,976.157 \text{ mg/Kg}$$

$$= 18.98 \text{ g/Kg}$$

$$\% \text{ Cu} = \frac{\text{Cu ที่ได้} \times 100}{\text{Cu เริ่มต้น}} = \frac{19.45 \times 100}{94.3}$$

$$= \underline{\underline{20.63 \%}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์ที่สกัดได้จากสลัดจ์โดยแปรค่าน้ำหนักสลัดจ์ 0.1, 0.5, 0.10, 1.5 และ 2.0 กรัม

น้ำหนัก (กรัม)	น.น สาร ต.ย. (กรัม)	Abs (แบลงค์)	Abs (ต.ย)	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	อัตราส่วน เจือจาง	คอปเปอร์ (mg/l)	คอปเปอร์ (g/Kg)	Avg. (g/Kg)	Cu %	SD
0.1	0.1009	0.001	0.025	50	400	0.3676	72.86	70.52	74.78	2.54
	0.1041	0.001	0.025	50	400	0.3676	70.62			
	0.1080	0.001	0.025	50	400	0.3676	68.07			
0.5	0.5009	0.001	0.127	50	400	2.3241	92.80	93.55	99.20	0.80
	0.5013	0.001	0.126	50	400	2.3636	94.30			
	0.5011	0.001	0.130	50	400	2.3439	93.55			
1.0	1.0001	0.001	0.210	50	400	4.0237	80.47	80.78	85.66	0.84
	1.0135	0.001	0.212	50	400	4.0632	80.18			
	1.0046	0.001	0.214	50	400	4.1028	81.68			
1.5	1.5020	0.001	0.222	50	400	4.2609	56.74	58.91	62.47	2.01
	1.5077	0.001	0.236	50	400	4.5375	60.19			
	1.5042	0.001	0.234	50	400	4.4980	59.81			
2.0	2.0134	0.001	0.145	50	400	2.7391	27.21	26.31	27.90	1.01
	2.0088	0.001	0.135	50	400	2.5415	25.30			
	2.0000	0.001	0.140	50	400	2.6403	26.40			

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.05060X + 0.0054$

กำหนดให้ Y คือ Abs., X คือ ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)

$$\begin{aligned} \text{ตัวอย่างการคำนวณ} \quad Y &= 0.05060X + 0.0054 \\ X &= \frac{(0.025 - 0.001) - 0.0054}{0.05060} = 0.3676 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้น Cu} &= \frac{0.3676 \text{ mg/L} \times 50 \text{ mL} \times 400 \text{ เท่า}}{0.1009 \text{ g}} = 72864.22 \text{ mg/Kg} \end{aligned}$$

$$= 72.86 \text{ g/Kg}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Cu} &= \frac{\text{Cu ที่ได้} \times 100}{\text{Cu เริ่มต้น}} = \frac{70.52 \times 100}{94.3} \end{aligned}$$

$$= 74.78 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์ที่สกัดได้จากสลัดโดยแปรค่าเวลาในการสกัดที่ 1, 3, 6, 9, 12, 24 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	น.น สาร ต.ย. (กรัม)	Abs (แบลคค์)	Abs (ต.ย.)	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	อัตราส่วน เจือจาง	คอปเปอร์ (mg/l)	คอปเปอร์ (g/Kg)	Avg. (g/Kg)	Cu %	SD
1	0.4838	0.005	0.141	50	250	2.1772	56.25	56.09	59.45	2.61
	0.4973	0.005	0.138	50	250	2.1291	53.52			
	0.5001	0.005	0.151	50	250	2.3374	58.42			
3	0.4843	0.005	0.203	50	250	3.1705	81.83	83.89	88.96	3.41
	0.4867	0.005	0.218	50	250	3.4108	87.60			
	0.4867	0.005	0.205	50	250	3.2025	82.25			
6	0.4960	0.005	0.221	50	250	3.3661	87.17	89.19	94.58	1.96
	0.4960	0.005	0.230	50	250	3.1394	90.80			
	0.5027	0.005	0.230	50	250	3.4158	89.59			
9	0.5064	0.005	0.241	50	250	3.7792	93.29	91.22	97.21	1.53
	0.5087	0.005	0.235	50	250	3.6831	90.50			
	0.5069	0.005	0.236	50	250	3.6991	91.22			
12	0.5145	0.005	0.228	50	250	3.5710	86.76	90.76	96.25	3.74
	0.5159	0.005	0.255	50	250	4.0035	93.38			
	0.5192	0.005	0.244	50	250	3.8273	92.14			
24	0.5202	0.005	0.262	50	250	4.1157	91.83	91.88	97.44	1.30
	0.5298	0.005	0.245	50	250	3.8433	90.68			
	0.5310	0.005	0.266	50	250	4.1798	93.13			

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.06242X + 0.0001$

กำหนดให้ Y คือ Abs., X คือ ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)

$$\begin{aligned} \text{ตัวอย่างการคำนวณ} \quad Y &= 0.06242 X + 0.0001 \\ X &= \frac{(0.141 - 0.005) - 0.0001}{0.06242} = 2.1772 \text{ mg/L} \\ \text{ความเข้มข้น Cu} &= \frac{2.1772 \text{ mg/L} \times 50 \text{ mL} \times 250 \text{ เท่า}}{0.4838 \text{ g} \times 1,000} = 56.25 \text{ g/Kg} \\ \% \text{ Cu} &= \frac{\text{Cu ที่ได้} \times 100}{\text{Cu เริ่มต้น}} = \frac{56.09 \times 100}{94.3} = 59.45 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.4 ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายอีดีทีเอที่เหมาะสมในการสกัดคอปเปอร์ออกจาก
สลัดจ์ของโรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

พีเอช	น.น สาร ต.ย (กรัม)	Abs (แบลจก์)	Abs (ต.ย.)	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	อัตราส่วน เจือจาง	คอปเปอร์ (mg/l)	คอปเปอร์ (g/Kg)	Avg. (g/Kg)	Cu (%)	SD
5	0.4857	0.001	0.082	50	400	1.5064	62.03	63.75	67.61	2.14
	0.4920	0.001	0.084	50	400	1.5446	62.79			
	0.4995	0.001	0.090	50	400	1.6593	66.44			
6	0.4669	0.001	0.112	50	400	2.0799	83.72	79.73	84.55	6.72
	0.4824	0.001	0.099	50	400	1.8314	75.93			
	0.4844	0.001	0.104	50	400	1.9270	79.56			
7	0.4742	0.001	0.104	50	400	1.9270	79.59	82.77	87.78	3.24
	0.4769	0.001	0.112	50	400	2.0799	83.72			
	0.4883	0.001	0.114	50	400	2.1181	85.01			
8	0.4745	0.001	0.117	50	400	2.1755	89.80	89.47	94.88	2.55
	0.4755	0.001	0.110	50	400	2.0417	90.36			
	0.4757	0.001	0.113	50	400	2.0990	88.25			
9	0.4757	0.001	0.103	50	400	1.9079	80.21	79.28	84.06	2.53
	0.4840	0.001	0.101	50	400	1.8696	77.26			
	0.4840	0.001	0.107	50	400	1.9843	80.34			

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.05231X + 0.0022$

กำหนดให้ Y คือ Abs., X คือ ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)

$$\begin{aligned} \text{ตัวอย่างการคำนวณ} \quad Y &= 0.05231 X + 0.0022 \\ X &= \frac{(0.082 - 0.001) - 0.0022}{0.05231} = 1.5064 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{1.5064 \text{ mg/L} \times 50 \text{ mL} \times 400 \text{ เท่า}}{0.4857 \text{ g} \times 1,000} = 62.03 \text{ g/Kg}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Cu} &= \frac{\text{Cu ที่ได้} \times 100}{\text{Cu เริ่มต้น}} = \frac{63.75 \times 100}{94.3} \\ &= \underline{\underline{67.61 \%}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการสกัดทองแดงด้วยสารละลายอีดีทีเอในสภาวะที่เหมาะสม

ตัวอย่างสกัด	สกัด (g)	Abs แบลจค์	Abs ต.ย.	ปริมาตร (ml)	เจือจาง (เท่า)	Cu (mg/l)	Cu (g/Kg)	Avg. (g/Kg)	SD
ชุดทดลอง	0.5002	0.001	0.118	50	400	2.2120	90.13	88.40	1.03
	0.5001	0.001	0.116	50	400	2.1737	87.68		
	0.5010	0.001	0.117	50	400	2.1929	89.57		
สกัดส่วนที่เหลือ	0.3580	0.001	0.021	50	200	0.3559	9.94	11.04	0.62
	0.3462	0.001	0.022	50	200	0.3750	10.83		
	0.3619	0.001	0.021	50	200	0.3559	9.83		
ชุดควบคุม	0.5009	0.001	0.067	50	1	1.2361	0.12	0.13	0.01
	0.5011	0.001	0.069	50	1	1.2744	0.13		
	0.4996	0.001	0.065	50	1	1.1979	0.12		
แบลจค์		0.001	0.005	50	1	0.0498	ND	ND	ND
		0.001	0.004	50	1	0.0306	ND		
		0.001	0.004	50	1	0.0306	ND		

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.05226X + 0.0014$

การคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/กิโลกรัมสกัดแห้ง)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของทองแดงคำนวณจากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัม/ลิตร)} \times \text{ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร)} \times \text{อัตราส่วนเจือจาง}}{\text{น้ำหนักสกัดอบแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากสกัด (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นทองแดงชุดทดลอง (มิลลิกรัม/กิโลกรัมสกัดแห้ง)} - \text{ความเข้มข้นทองแดงในชุดควบคุม (มิลลิกรัม/กิโลกรัมสกัดแห้ง)}}{\text{ความเข้มข้นทองแดงชุดทดลอง (มิลลิกรัม/กิโลกรัมสกัดแห้ง)}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 ผลการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมในการตกตะกอนคอปเปอร์ออกจากสารละลาย Cu – EDTA โดยใช้กระบวนการซีเมนต์เตชันด้วยผงเหล็ก

ตารางที่ ข-2.1 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนทองแดงโดยกระบวนการซีเมนต์เตชันที่อัตราส่วน โมลเหล็กต่อทองแดงเท่ากับ 8:1

พีเอช	น.น สาร ต.ย. (กรัม)	Abs (แบบลค์)	Abs (ต.ย.)	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	อัตราส่วน เจือจาง	คอปเปอร์ (mg/l)	คอปเปอร์ (g/Kg)	Avg.	Cu (%)	SD
1	5.0010	0.003	0.054	200	100	0.949	3.80	3.23	96.57	0.49
	5.0001	0.003	0.044	200	100	0.758	3.03			
	5.0008	0.003	0.042	200	100	0.719	2.88			
2	4.9981	0.003	0.007	200	100	0.050	0.20	0.30	99.68	0.18
	5.0004	0.003	0.011	200	100	0.126	0.51			
	5.0007	0.003	0.007	200	100	0.050	0.20			
3	5.0003	0.003	0.030	200	100	0.490	1.96	2.77	92.03	0.35
	4.9989	0.003	0.039	200	100	0.662	2.65			
	5.0010	0.003	0.033	200	100	0.547	2.19			
4	4.9979	0.003	0.120	200	100	2.212	8.85	9.56	84.74	0.72
	5.0005	0.003	0.129	200	100	2.384	9.54			
	5.0012	0.003	0.139	200	100	2.576	10.30			

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.05226X + 0.0014$

กำหนดให้ Y คือ Abs., X คือ ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ $Y = 0.05226X + 0.0014$

$$X = \frac{(0.054 - 0.003) - 0.0014}{0.05226} = 0.949 \text{ mg/L}$$

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{0.949 \text{ mg/L} \times 200 \text{ mL} \times 100 \text{ เท่า}}{5.0001 \text{ g} \times 1,000} = 3.80 \text{ g/Kg}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Cu} &= \frac{(\text{Cu เริ่มต้น} - \text{Cu}) \text{ ที่ได้} \times 100}{\text{Cu เริ่มต้น}} = \frac{94.3 - 3.23 \times 100}{94.3} \\ &= \underline{\underline{91.07\%}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของผงเหล็กต่อคอปเปอร์ที่เหมาะสมในการ
ตกตะกอนทองแดงโดยกระบวนการซีเมนเตชันที่พีเอช 2

Fe : Cu	น.น สาร ต.ย. (กรัม)	Abs (แบลคค์)	Abs (ต.ย)	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	อัตราส่วน เจือจาง (เท่า)	คอปเปอร์ (mg/l)	คอปเปอร์ (g/Kg)	Avg.	Cu-R (%)	SD
1:1	5.0000	0.002	0.554	200	400	4.9719	79.55	76.44	18.94	4.39
	5.0010	0.002	0.544	200	400	4.8783	78.04			
	5.0013	0.002	0.502	200	400	4.4849	71.74			
2:1	4.8388	0.002	0.380	200	400	3.3424	55.26	58.30	38.18	2.89
	4.9789	0.002	0.416	200	400	3.6795	59.12			
	5.0001	0.002	0.427	200	400	3.7825	60.52			
4:1	5.0003	0.002	0.254	200	400	2.1624	34.60	32.20	65.85	2.77
	4.9867	0.002	0.240	200	400	2.0313	32.59			
	4.9899	0.002	0.219	200	400	1.8346	29.41			
6:1	4.9978	0.002	0.032	200	50	0.0833	0.17	0.25	99.74	0.09
	5.0005	0.002	0.041	200	50	0.1676	0.34			
	5.0011	0.002	0.036	200	50	0.1208	0.24			
8:1	5.0064	0.002	0.024	200	50	0.9449	0.04	0.04	99.96	0.00
	5.0087	0.002	0.025	200	50	0.9543	0.04			
	5.0069	0.002	0.024	200	50	0.9449	0.04			
10:1	4.9965	0.002	0.022	200	50	0.7389	0.03	0.03	99.74	0.01
	4.9976	0.002	0.022	200	50	0.7014	0.03			
	5.0048	0.002	0.023	200	50	0.5048	0.02			

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.10678X + 0.0211$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการตกตะกอนทองแดงโดยกระบวนการซีเมนเตชันที่
สถานะเหมาะสม

	น.น สาร ต.ย. (กรัม)	Abs (แบบลค์)	Abs (ต.ย.)	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	อัตราส่วน เจือจาง (เท่า)	คอป เปอร์ (mg/l)	คอป เปอร์ (g/kg)	Avg. (g/Kg)	SD
ชุดการทดลอง	5.0013	0.003	0.009	200	400	0.1083	1.73	2.50	0.81
	4.9979	0.003	0.017	200	400	0.2092	3.35		
	5.0007	0.003	0.012	200	400	0.1509	2.41		
ชุดควบคุม	5.0012	0.003	0.3098	200	400	5.6037	89.64	85.50	0.81
	4.9961	0.003	0.3264	200	400	5.4594	87.42		
	5.0008	0.003	0.3173	200	400	4.9741	79.57		

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.0765X + 0.0005$

$$\text{ประสิทธิภาพการนำกลับ} \\ \text{ทองแดงจากสลัดจ์ (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นทองแดงในชุดควบคุม} \\ \text{(มิลลิกรัม/กิโลกรัมสลัดจ์แห้ง)} - \text{ความเข้มข้นทองแดงในชุดทดลอง} \\ \text{(มิลลิกรัม/กิโลกรัมสลัดจ์แห้ง)}}{\text{ความเข้มข้นทองแดงในชุดควบคุม} \\ \text{(มิลลิกรัม/กิโลกรัมสลัดจ์แห้ง)}} \times 100$$

กำหนดให้ Y คือ Abs., X คือ ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$Y = 0.0765X + 0.0005$$

$$X = \frac{(0.09 - 0.003) - 0.0005}{0.0765} = 0.1083 \text{ mg/L}$$

$$\text{ความเข้มข้น Cu} = \frac{0.1083 \text{ mg/L} \times 200 \text{ mL} \times 400 \text{ เท่า}}{5.0013 \text{ g} \times 1,000} = 1.73 \text{ g/Kg}$$

$$\% \text{ Cu} = \frac{\text{Cu เริ่มต้น} - \text{Cu ที่ได้}}{\text{Cu เริ่มต้น}} \times 100 = \frac{85.5 - 1.73}{85.5} \times 100 = 97.79\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.1 การตกตะกอนเหล็ก Fe ออกจาก EDTA-Fe หาคความบริสุทธิ์ EDTA โดยแปรค่า 9, 10, 11, 12, 13 และ 14

พีเอช	ผงเหล็ก (กรัม)	Abs (แบลจค์)	Abs (ต.ย)	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	อัตราส่วน การเจือจาง (เท่า)	เหล็ก (mg/l)	เหล็ก (g/Kg)	Avg.	R (%)	SD
9	1.2978	0.002	0.229	200	400	4.4666	275.34			
	1.2978	0.002	0.252	200	400	4.9261	303.66	288.88	19.13	3.98
	1.2978	0.002	0.239	200	400	4.6664	287.65			
10	1.2978	0.002	0.120	200	400	2.2893	141.12			
	1.2978	0.002	0.129	200	400	2.4690	152.20	148.50	58.43	1.79
	1.2978	0.002	0.129	200	400	2.4690	152.20			
11	1.2978	0.002	0.109	200	400	2.0695	127.57			
	1.2978	0.002	0.116	200	400	2.2093	136.19	130.03	63.60	1.50
	1.2978	0.002	0.108	200	400	2.0495	126.34			
12	1.2978	0.002	0.064	200	400	1.1706	72.16			
	1.2978	0.002	0.058	200	400	1.0507	64.77	69.64	81.06	1.11
	1.2978	0.002	0.059	200	400	1.0707	66.00			
13	1.2978	0.002	0.014	200	400	0.1718	10.59			
	1.2978	0.002	0.013	200	400	0.1518	9.36	9.77	97.27	0.20
	1.2978	0.002	0.013	200	400	0.1518	9.36			
14	1.2978	0.002	0.011	200	400	0.1119	6.90			
	1.2978	0.002	0.022	200	400	0.3316	20.44	11.82	96.69	2.10
	1.2978	0.002	0.012	200	400	0.1318	8.13			

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.05006X + 0.0034$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ ข-3.2 การใช้ EDTA ซ้ำ ครั้งที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ผลของประสิทธิภาพการซ้ำของสารละลายยัติที่เอในการสกัดทองแดงออกจากสลัดจ์

ชุดทดลองซ้ำ (ครั้ง)	สลัดจ์ (กรัม)	Abs (แบลนค์)	Abs (ต.ย)	ปริมาตรเจือจาง (เท่า)	ปริมาตรสารละลาย (มล.)	คอปเปอร์ (mg/L)	คอปเปอร์ (mg/g)	Avg	Cu-R (%)	SD
0	5.0003	0.002	0.003	100	200	0.0705	0.282	0.27	99.69	0.40
	4.9983	0.002	0.002	100	200	0.0405	0.162			
	5.0002	0.002	0.005	100	200	0.0951	0.380			
1	5.0012	0.002	0.008	50	200	0.161	0.644	0.65	99.27	0.44
	4.9902	0.002	0.009	100	200	0.186	0.745			
	5.0006	0.002	0.007	100	200	0.1417	0.567			
2	5.0011	0.002	0.006	100	200	0.1332	0.533	0.73	99.22	0.46
	5.0002	0.002	0.005	100	200	0.1159	0.464			
	4.9902	0.002	0.013	100	200	0.2718	1.089			
3	5.0005	0.002	0.019	100	200	0.4035	1.614	2.48	97.22	2.32
	5.0012	0.002	0.046	100	200	0.9879	3.951			
	5.0005	0.002	0.022	100	200	0.4699	1.879			
4	5.0002	0.002	0.037	100	200	0.7857	3.143	3.76	95.10	3.13
	5.0001	0.002	0.042	100	200	0.8925	3.570			
	5.001	0.002	0.051	100	200	1.0935	4.373			
5	5.0022	0.002	0.073	100	200	1.5675	6.267	6.16	93.10	2.56
	4.9952	0.002	0.081	100	200	1.739	6.963			
	5.0102	0.002	0.061	100	200	1.3175	5.259			
ชุดควบคุม	5.0012	0.002	0.126	800	200	2.7037	87.78	89.37		1.97
	4.9961	0.002	0.133	800	200	2.8594	91.57			
	5.0008	0.002	0.129	800	200	2.7741	88.76			

กราฟมาตรฐาน $Y = 0.04657X + 0.0001$

$$\begin{aligned}
 & \text{ประสิทธิภาพการนำกลับ} \\
 & \text{ทองแดงจากสลัดจ์ (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นทองแดงในชุดควบคุม} - \text{ความเข้มข้นทองแดงในชุดทดลอง}}{\text{ความเข้มข้นทองแดงในชุดควบคุม}} \times 100 \\
 & \text{(มิลลิกรัม/กิโลกรัมสลัดจ์แห้ง)} - \text{(มิลลิกรัม/กิโลกรัมสลัดจ์แห้ง)} \\
 & \text{(มิลลิกรัม/กิโลกรัมสลัดจ์แห้ง)}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.3 ปริมาณ DOC ของสารละลายอีดีทีเอปรีสุทรีและสารละลายอีดีทีเอที่ใช้ซ้ำ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TOC

ตัวอย่างสารละลายอีดีทีเอ	ครั้งที่	ปริมาตรสารละลายอีดีทีเอ (มล.)	อัตราส่วนการเจือจาง (เท่า)	TOC (มก./ลิตร)	Avg.	DOC (%)
สารละลายอีดีทีเอปรีสุทรี	1	200	100	491.1		
	2	200	100	488.0	491.87	100
	3	200	100	496.5		
สารละลายอีดีทีเอปรีสุทรีใช้ 1 ซ้ำ	1	200	100	465.2		
	2	200	100	478.4	467.9	95.13
	3	200	100	460.1		
สารละลายอีดีทีเอปรีสุทรีใช้ 2 ซ้ำ	1	200	100	405.3		
	2	200	100	419.6	417.7	84.92
	3	200	100	428.2		
สารละลายอีดีทีเอปรีสุทรีใช้ 3 ซ้ำ	1	200	100	395.1		
	2	200	100	385.8	397.4	80.79
	3	200	100	411.3		
สารละลายอีดีทีเอปรีสุทรีใช้ 4 ซ้ำ	1	200	100	357.4		
	2	200	100	347.3	354.78	72.13
	3	200	100	359.6		
สารละลายอีดีทีเอปรีสุทรีใช้ 5 ซ้ำ	1	200	100	338.5		
	2	200	100	319.7	328.03	66.69
	3	200	100	325.9		
แบลจค์	1		1	0.126		
	2		1	0.171	0.153	0.031
	3		1	0.157		

กราฟมาตรฐาน $Y = 2.9612X + 38.125$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ที่ความเข้มข้น 0.05M, 0.1M, 0.2M และ 0.3M

ANOVA

copper

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	12.906	3	4.302	261.422	.000*
Within Groups	.132	8	.016		
Total	13.037	11			

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

copper

Duncan^a

EDTA (โมล/ลิตร)	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
0.05	3	1.576633		
0.1	3		2.865633	
0.3	3			4.044567
0.2	3			4.122300
Sig.		1.000	1.000	.479

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ที่น้ำหนัก 0.1, 0.5, 1.5, 1.0 และ 2.0

Test of Homogeneity of Variances

coper

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
4.785	4	10	.020*

*ค่า Sig. 0.020 น้อยกว่า 0.05

ANOVA

coper

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	31.215	4	7.804	1144.374	.000*
Within Groups	.068	10	.007		
Total	31.283	14			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

Duncan^a

weight	N	Subset for alpha = 0.01				
		1	2	3	4	5
0.1	3	.3676				
0.5	3		2.3439			
2	3			2.6403		
1	3				4.0632	
1.5	3					4.4321
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA
ที่เวลา 1, 3, 6, 9, 12, 24, ชั่วโมง

ANOVA

copper

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	6.341	5	1.268	57.423	.000*
Within Groups	0.265	12	0.022		
Total	6.606	17			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

copper

Duncan^a

TIME	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
1	3	2.2146			
3	3		3.2613		
6	3		3.3071		
9	3			3.7205	
12	3			3.8006	3.8006
24	3				4.0463
Sig.		1.000	.712	.521	.066

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ที่พีเอช 5, 6, 7, 8 และ 9

ANOVA

copper

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.517	4	.129	16.072	.000*
Within Groups	.080	10	.008		
Total	.597	14			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

copper

Duncan^a

pH	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
5	3	1.5701		
9	3		1.9206	
6	3		1.9461	1.9461
7	3		2.0417	2.0417
8	3			2.1054
Sig.		1.000	.145	.064

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-5 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของ pH ที่ 1, 2, 3 และ 4 เพื่อตัดตะกอนทองแดงออกจากสารละลาย Cu-EDTA

ANOVA

copper

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8.738	3	2.913	201.531	.000*
Within Groups	.116	8	.014		
Total	8.854	11			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

copper

Duncan^a

pH	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
2	3	.130100			
3	3		.566333		
1	3			.808667	
4	3				2.390667
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ปริมาณผงเหล็กต่อคอปเปอร์ 1:1, 2:1, 4:1, 6:1, 8:1, 10:1

Test of Homogeneity of Variances

copper

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.091	5	12	.137

ANOVA

copper

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	57.171	5	11.434	361.726	.000*
Within Groups	.379	12	.032		
Total	57.551	17			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

Duncan^a

Ratio Fe:Cu	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
6:1	3	.123900				
8:1	3	.126267				
10:1	3		.648367			
4:1	3			2.009433		
2:1	3				3.601467	
1:1	3					4.778367
Sig.		.987	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-7 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการตกตะกอน Fe ออกจาก EDTA-Fe หาค่าความบริสุทธิ์ EDTA โดยแปรค่า 9, 10, 11, 12, 13 และ 14

ANOVA

copper

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	43.516	5	8.703	599.793	.000*
Within Groups	.174	12	.015		
Total	43.691	17			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

copper

Duncan^a

pH	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
13	3	.2003				
14	3	.2377				
12	3		1.1352			
11	3			2.1446		
10	3				2.4418	
9	3					4.7213
Sig.		.710	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-8 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการใช้ EDTA ซ้ำ ครั้งที่ 1, 2, 3, 4 และ 5

Test of Homogeneity of Variances

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
4.570	5	12	.014

*ค่า Sig. 0.020 น้อยกว่า 0.05

ANOVA

copper

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4.934	5	.987	32.842	.000
Within Groups	.361	12	.030		
Total	5.294	17			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

Duncan^a

EDTA (ซ้ำ)	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
0	3	.068700		
1	3	.162900		
2	3	.173633		
3	3		.620433	
4	3		.923900	
5	3			1.541333
Sig.		.494	.053	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-9 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA
ความบริสุทธิ์ของการใช้ EDTA ซ้ำ ครั้งที่ 1, 2, 3, 4 และ 5

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	110757.044	5	22151.409	120.698	.000*
Within Groups	2202.327	12	183.527		
Total	112959.371	17			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

DOC

Duncan^a

EDTA (ซ้ำ)	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
5	3	258.0333				
4	3		341.4333			
3	3			385.7333		
2	3				417.7000	
1	3					467.9000
0	3					491.8667
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	.051

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3

ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.

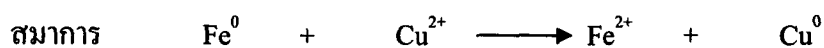
**วิธีการคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กต่อทองแดง
และอิตีที่เอต่อทองแดง**

วิธีวัดค่าพีเอช ค่าโออาร์พี(ORP)และวิธีการใช้ Microwave digester

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง การคำนวณปริมาณ เหล็ก และ EDTA ที่ใช้ในการทดลอง

การคำนวณปริมาณ เหล็กที่ใช้ในการทดลอง



จากสมการ

$$\text{น้ำหนัก} \quad \text{Fe:Cu} = \text{Y กรัม} : \text{X กรัม}$$

$$\text{โมล ของ Cu} : \text{โมล ของ Fe} = \frac{\text{Y กรัม}}{55.85} : \frac{\text{X กรัม}}{63.54}$$

$$\text{ดังนั้น อัตราส่วนโดยโมลของ Fe:Cu เท่ากับ } \frac{\text{Y/55.85}}{\text{X/63.54}}$$

เมื่อ X เท่ากับ น้ำหนัก Cu หาได้จากความเข้มข้นของ Cu ในการสกัดทองแดงจากสลัดจ์
Y เท่ากับ น้ำหนัก Fe ที่ต้องการ

การคำนวณปริมาณ EDTA ที่ใช้ในการทดลอง



จากสมการ

$$\text{น้ำหนัก Cu}^{2+} : \text{น้ำหนัก EDTA} = \text{A กรัม} : \text{B กรัม}$$

$$1 \text{ โมลของ Cu}^{2+} : 1 \text{ โมลของ EDTA} = \frac{\text{A กรัม}}{63.54} : \frac{\text{B กรัม}}{372.24}$$

ดังนั้น อัตราส่วน โดยโมลของ $\text{Cu}^{2+} : \text{EDTA}$

เมื่อ A เท่ากับ น้ำหนักของ Cu^{2+} หาได้จากความเข้มข้นของการสกัดทองแดงจากสลัดจ์
B เท่ากับ น้ำหนักของ EDTA ที่ต้องการ

ภาคผนวก จ.

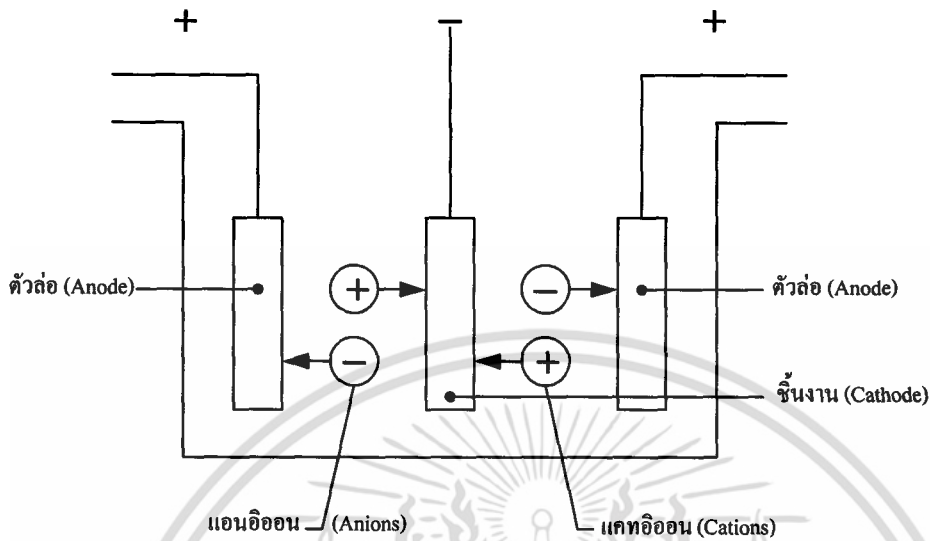
หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplation)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

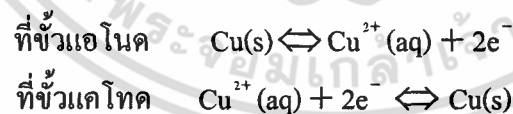
ภาคผนวก จ.

หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)



รูปที่ จ.1 แสดงการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

จากรูปจะเห็นว่าโลหะที่ใช้เคลือบทำหน้าที่เป็นแอโนด (Anode) หรือตัวล่อ เป็นขั้วบวก ส่วนโลหะที่ถูกเคลือบทำหน้าที่เป็นแคโทด (Cathode) หรือชิ้นงาน เป็นขั้วลบ สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะต้องมีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบ เช่น ในการชุบโลหะทองแดงบนแผ่นสังกะสีจะต้องมีแอโนดหรือตัวล่อเป็นโลหะทองแดง แคโทดหรือชิ้นงานเป็นโลหะสังกะสี สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีไอออนของทองแดงละลายในสารละลาย (ใช้สารละลายของทองแดงซัลเฟต) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาจะเกิดดังต่อไปนี้



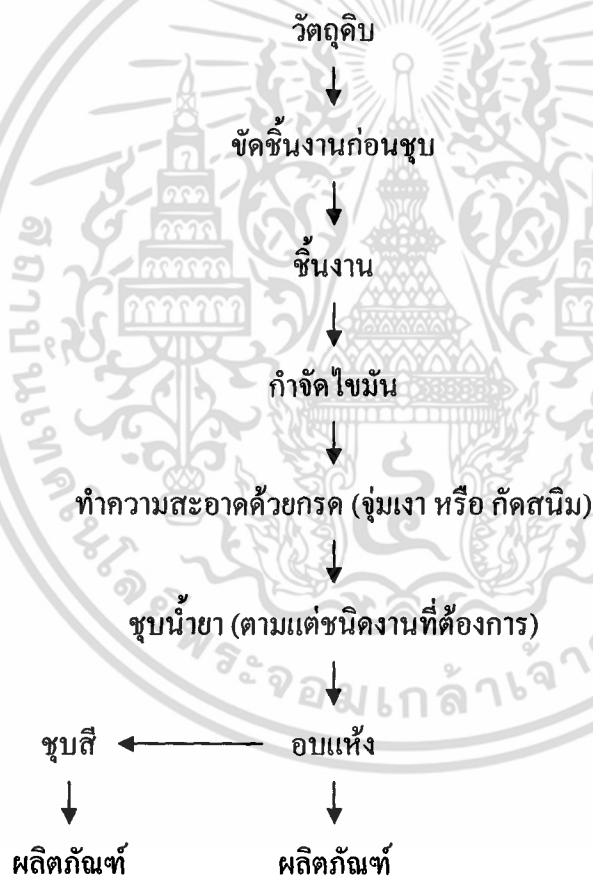
อธิบายได้ว่า เมื่อทองแดงซัลเฟตละลายน้ำ จะแยกสลายออกเป็นไอออน 2 ส่วน คือ ไอออนทองแดง (Cu^{2+}) มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก และซัลเฟต (SO_4^{2-}) มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ไอออนของทองแดงที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก จะวิ่งเข้าหาขั้วแคโทด (Cathode) หรือชิ้นงาน ซึ่งเป็นขั้วลบ เกิดเป็นผงสีแดงเกาะติดอยู่บนแผ่นสังกะสี ส่วนไอออนของซัลเฟตที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ จะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด (Anode) หรือตัวล่อ ซึ่งเป็นขั้วบวกทำปฏิกิริยากับขั้วแอโนดซึ่งเป็นโลหะทองแดง ทำให้ทองแดงละลายออกมาเกิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดงซัลเฟตแทนที่ทองแดงซัลเฟตตัวก่อนที่หมดไป ทองแดงซัลเฟตตัวหลังนี้จะแยกสลายออกเป็น 2 ส่วนอีกคือ ไอออนทองแดง (Cu^{2+}) และ ไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไอออนทองแดงจะวิ่งไปจับลบบเกาะติดอยู่ที่ขั้วลบ ไอออนซัลเฟตจะวิ่งไปที่ขั้วบวก ทำปฏิกิริยากับขั้วบวกกลายเป็นทองแดงซัลเฟตขึ้นมาแทนที่อีก ปฏิกิริยาจะหมุนเวียนเช่นนี้ตลอดไป เท่าที่ยังคงให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

ขั้นตอนการชุบโลหะ

รูปแบบขั้นตอนในการชุบโลหะอย่างง่ายประกอบไปด้วย การเตรียมชิ้นงานซึ่งหมายถึงการขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาด และความเรียบตามต้องการ จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน จากนั้นนำไปจุ่มกรดเพื่อกัดเอาสนิมออกแล้วนำชิ้นงานไปชุบในน้ำยา ซึ่งควบคุมสภาวะการชุบตามกำหนด หลังจากเสร็จแล้วนำไปอบแห้ง สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการในรูป



รูปที่ จ.2 แสดงขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย

ความซับซ้อนของขั้นตอนในการชุบจะขึ้นอยู่กับชนิดโลหะที่เป็นวัตถุดิบ และชนิดของผิวโลหะที่ต้องการ โดยวัตถุดิบส่วนมากจะเป็นเหล็ก เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขัดชิ้นงานก่อนชุบ

แบ่งออกเป็นการขัดหยาบ และการขัดละเอียด โดยการขัดหยาบเป็นการขัดขั้นแรก โดยขัดเอารอยขีดขีดเล็ก ๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ลวดขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อเพื่อลบรอยจากการขัดหยาบทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ลวดขัดที่มีทรายละเอียดเบอร์ 280 ขึ้นไป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานเล็กมาก ๆ อาจขัดโดยการใช้ถัมมุนซึ่งมีหินขัดบรรจุภายใน

การกำจัดไขมัน

ทำได้โดยการใช้วิธีดังต่อไปนี้

- กำจัดโดยไอรระเหยไตรคลอโรเอทิลีน (Vapour Degreasing) โดยนำชิ้นงานจุ่มในถังบรรจุไตรคลอโรเอทิลีน มีการให้ความร้อนจนถึง 86 องศา จะกลายเป็นไอมากระทบกับท่อขุดทำความสะอาดชิ้นบริเวณปากขอบถัง และชิ้นงาน ไอจะกลั่นตัวบนผิวงาน และทำการชำระล้างไขมัน หรือน้ำมันลงสู่ถัง

- กำจัดโดยใช้ด่างร้อน (Soak Clean) แช่ชิ้นงานในถังเหล็ก หรือสแตนเลสที่บรรจุด้วยด่าง และมีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่

การทำความสะอาดด้วยกรดหรือจุ่มเงา (Pickling and Dipping)

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

การชุบทองแดงในอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ

การชุบทองแดงมีประโยชน์ในการชุบเคลือบผิวชิ้นแรกของโลหะเดิม ก่อนที่จะนำไปชุบด้วยโลหะชนิดอื่น เช่น ใช้ชุบบนงานที่มีรอยบัดกรี และชุบบนสังกะสีผสม ก่อนที่จะนำไปชุบนิกเกิล เพราะถ้าหากนำชิ้นงานที่มีรอยบัดกรี หรืองานที่มีสังกะสีผสมอยู่ สังกะสีจะละลายในน้ำยานิกเกิลทันที แต่ถ้าหากนำชิ้นงานไปชุบทองแดงแบบต่างก่อน แล้วไปชุบด้วยทองแดงแบบกรด และชุบด้วยนิกเกิลเงาตามลำดับ ก็จะทำให้ชิ้นงานนั้นดูสวยงามและทนทาน สามารถนำไปชุบมนขั้นต่อไปได้ นอกจากนี้หากต้องการให้ชิ้นงานมีความสามารถในการนำไฟฟ้า ก็สามารถนำมาชุบทองแดงเนื่องจากโลหะทองแดงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง (60 m/ohm.mm²)

การชุบทองแดงแบ่งเป็น 2 ประเภท

1. การชุบทองแดงแบบต่าง

การชุบทองแดงแบบต่างจะมีกำลังการเคลือบผิวดีและการเกาะจับผิวแน่น เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ไม่สามารถนำไปชุบในน้ำยาที่มีสภาพเป็นกรดได้ในทันที ต้องชุบทองแดงแบบ

ต่าง รองพื้นชั้นแรกก่อน แล้วจึงนำไปชุบในทองแดงแบบกรดหรือโลหะอื่น ๆ ต่อไป ตัวอย่างเช่น
ชิ้นงานที่ทำด้วยสังกะสีหล่อ (Zinc Diecasting) เป็นต้น

การชุบทองแดงแบบต่างแบ่งออกเป็น 4 ประเภท

1.1 แบบสไตรท์ (Strike Bath)

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

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

1.2 แบบร็อกเชล (Rochelle Bath)

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

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

1.3 แบบมีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Bath)

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

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

1.4 แบบไพโรฟอสเฟต (Pyrophosphate)

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.1 คอปเปอร์ไฟโรฟอสเฟต	80-105 กรัม/ลิตร
1.4.2 โปแตสเซียมไฟโรฟอสเฟต	290-370 กรัม/ลิตร
1.4.3 แอมโมเนีย	2-4 มิลลิลิตร/ลิตร
1.4.4 น้ำยาเงา SP 66	2-3 มิลลิลิตร/ลิตร
1.4.5 น้ำยาเงา SP 67	0.2-0.3 มิลลิลิตร/ลิตร
1.4.6 อุณหภูมิ	50-60 องศาเซลเซียส
1.4.7 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	10-60 แอมแปร์/ตารางฟุต
1.4.8 ค่า pH	8.6-9.0

ตัวอย่างการผสมน้ำยาชุบทองแดงแบบต่าง

1. ใส่ไน้ในถังประมาณครึ่งถัง แล้วให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส
2. ใส่โปแตสเซียมไฟโรฟอสเฟต และกวนน้ำยาให้ละลายจนหมด
3. ใส่คอปเปอร์ไฟโรฟอสเฟต กวนให้ละลายจนหมด
4. กรองน้ำยาให้สะอาด
5. ใส่แอมโมเนีย
6. ใส่น้ำยาเงา
7. เติมน้ำให้ครบตามปริมาตรที่ต้องการ

2. การชุบทองแดงแบบกรด (ทองแดงเงา)

การชุบร่องพื้นด้วยทองแดงแบบกรด จะได้ผิวทองแดงที่เคลือบเรียบและเป็นเงางาม และชุบให้หนาได้ตามต้องการ มีกำลังการเคลือบดี ผิวชุบที่ได้จะเป็นทองแดงบริสุทธิ์ และมีความเหนียว โดยเฉพาะใช้ชุบบน Zinc Die Casting ที่ผ่านการชุบทองแดงแบบต่างมาแล้ว และต้องการความคงทนมาก ๆ การควบคุมน้ำยากง่าย ด้วยเหตุนี้ทำให้การชุบทองแดงแบบกรดใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ชุบร่องพื้นก่อนชุบนิเกิล และโครเมียมบนชิ้นงานเหล็ก บนชิ้นงานสังกะสีหล่อ และชุบบนพลาสติก จะใช้สารละลายที่ประกอบด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต กรดกำมะถัน และน้ำยาเงา (Brightener) ในการชุบใช้ตัวล่อ (Anode) ที่เป็นฟอสฟอไรซ์คอปเปอร์ (Phosphorized Copper Anode) ที่มีส่วนผสมของฟอสฟอรัสอยู่ในเนื้อทองแดง ทำให้ผิวที่ชุบทองแดงเรียบและเป็นเงางาม ตัวล่อชนิดนี้ไม่ละลายลงในน้ำยาชุบ ที่เป็นเหตุให้อัตราส่วนเปลี่ยนแปลงไป และไม่เกิดตะกอนของทองแดงในถังของน้ำยา

ผลดีของการชุบทองแดงแบบกรด

1. เมื่อชุบทองแดงแบบกรดแล้วไม่ต้องนำไปขัด เพราะในน้ำยาชุบมีน้ำยาเงาทำให้ชิ้นงานเงาเอง
2. ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดไซยาไนด์ในการชุบทองแดงแบบต่าง
3. สามารถชุบให้เงาได้ไม่ว่าจะใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงหรือต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ได้ความหนาที่เร็วกว่าการชุบทองแดงแบบต่าง และได้ผิวที่เรียบเป็นเงา
 5. เหมาะสำหรับชุบแผ่นปริน ชนิดเจาะรู โดยชุบผ่านรูที่เจาะ
 6. การบำรุงรักษาง่าย และเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการบำรุงรักษาน้ำยาทองแดงแบบต่าง
- การชุบทองแดงแบบกรดแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามส่วนผสมของน้ำยาเงา**

1. สูตรของ Levco EX

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

- | | |
|--|---------------------------|
| 1.1 คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) | 200-250 กรัม/ลิตร |
| 1.2 กรดกำมะถัน (H_2SO_4) | 45-75 กรัม/ลิตร |
| 1.3 คลอไรด์ไอออน (Cl ⁻) | 15-80 มิลลิกรัม/ลิตร |
| 1.4 น้ำยาเงา Levco EX | 1-4 มิลลิลิตร/ลิตร |
| 1.5 ตัวล่อฟอสฟอไรซ์คอปเปอร์ | |
| 1.6 อุณหภูมิ | 20-32 องศาเซลเซียส |
| 1.7 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า | 2-6 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| 1.8 กวนน้ำยาด้วยลมขณะทำการชุบ | |

2. สูตรของ UBAC

ประกอบด้วยสภาวะการชุบดังนี้

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

ตัวอย่างการผสมน้ำยาชุบทองแดงแบบกรด

1. ใส่น้ำกลั่นหรือน้ำที่ผ่านการกรองประมาณ 2/3 ของความจุถัง ให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส
2. ใส่คอปเปอร์ซัลเฟตทีละน้อย กวนน้ำยาตลอดเวลาเพื่อให้คอปเปอร์ซัลเฟตละลายจนหมด
3. ใส่ผงถ่าน (Activated Carbon) 2 กรัมต่อน้ำยา 1 ลิตร กวนน้ำยาตลอดเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
- 4 กรองน้ำยาให้สะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใส่กรดกำมะถันอย่างช้า ๆ และกวนน้ำยาตลอดเวลาเพื่อให้กรดกำมะถันผสมเข้ากับน้ำยา
6. เติมน้ำยาเงา Levco EX 2.5 มิลลิลิตร/ลิตร
7. เติมน้ำให้เต็มตามปริมาตรที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล นายวิชัย ชันดี
 วัน/เดือน/ปีเกิด 23 มกราคม พ.ศ. 2508
 ที่อยู่ 10/2 หมู่ 10 ต.คลอง อ.เมือง จ.ภูเก็ต 83000
 ประวัติการศึกษา
 ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี
 มหาวิทยาลัยรามคำแหง จ.กรุงเทพ พ.ศ.2532

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2533-2535 นักวิจัยแร่หายากจากทางแร่ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
 กรุงเทพฯ
 พ.ศ.2535-2538 ตำแหน่ง Technician service บ. สีไทยกันไซเพนต์ ถ.เทพารักษ์
 อ.เทพารักษ์ จ.สมุทรปราการ
 พ.ศ.2539-ปัจจุบัน ตำแหน่ง ข้าราชการครู โรงเรียนกะทู้วิทยา สพท. จังหวัดภูเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้