

การรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรีโดยวิธีอิเล็กโตรรีไฟนิง



นางสาวเลิศลักษณ์ ศรีคัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**RECYCLING OF TIN METAL FROM SOLDER SCRAP
BY ELECTROREFINING**



Loeslakkhana Srikhang

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรีโดยวิธีอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. จิตปณีย์ พิชัยวิชัย)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร. สงบ คำค้อ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. พรวิสา วงศ์ปัญญา)

กรรมการ



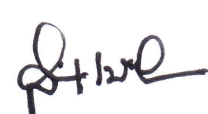
(อ. ดร. ปัญญา บัวสมนุรา)

กรรมการ



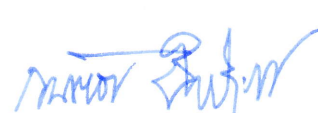
(อ. ดร. วราภรณ์ ปิยวิทย์)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เลิศลักษณ์ ศรีคัง : การรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรี โดยวิธีอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง
(RECYCLING OF TIN METAL FROM SOLDER SCRAP BY ELECTRO REFINING)
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สงบ คำค้อ, 110 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดเอาโลหะดีบุกจากเศษบัดกรีโดยการศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อเซลล์อิเล็กโทรรีไฟนิ่ง เช่น ชนิดของเศษบัดกรี, ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ โดยเศษบัดกรีที่ไม่มีตะกั่วชนิด SnAgCu ซึ่งประกอบด้วย 96.5wt%Sn-2.85wt%Ag-0.471wt%Cu และชนิด SnCu ซึ่งประกอบด้วย 99.3wt%Sn-0.108wt%Ag-0.485wt%Cu ได้ถูกนำมาทำเป็นขั้วแอโนดของเซลล์อิเล็กโทรรีไฟนิ่ง สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.5-2.5 M ขั้วแคโทดเป็นดีบุกบริสุทธิ์ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าระหว่าง 0.15-0.60 V และการทดลองโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังเซลล์ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาที่กำหนด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ถูกนำไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเทคนิค Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectroscopy ตะกอนแอโนดได้ถูกนำไปตรวจวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectroscopy และโลหะเกาะที่ขั้วแคโทดได้นำไปตรวจวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค Optical Emission Spectrometer จากการศึกษาพบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ปริมาณการเกาะของดีบุกที่ขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นในทุกช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ได้ทำการทดลอง โดยขั้วแอโนดชนิด SnCu ส่งผลให้เกิดการเกาะตัวของดีบุกที่ขั้วแคโทดได้สูงกว่าขั้วแอโนดชนิด SnAgCu การเกาะตัวของดีบุกมีความบริสุทธิ์สูงเมื่อศักย์ไฟฟ้าไม่เกิน 0.20 V อย่างไรก็ตาม เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า 0.20 V ปริมาณการเกาะของดีบุกที่ขั้วแคโทดสูงขึ้นแต่ความบริสุทธิ์ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 0.20 V ที่ความเข้มข้นกรด 2.5 M ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดการเกาะของดีบุกที่ขั้วแคโทดมีความบริสุทธิ์สูง และสิ้นเปลืองพลังงานน้อย

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา เจษฎ์กมล สรค์ค้อ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สงบ คำค้อ

LOESLAKKHANA SRIKHANG : RECYCLING OF TIN METAL FROM

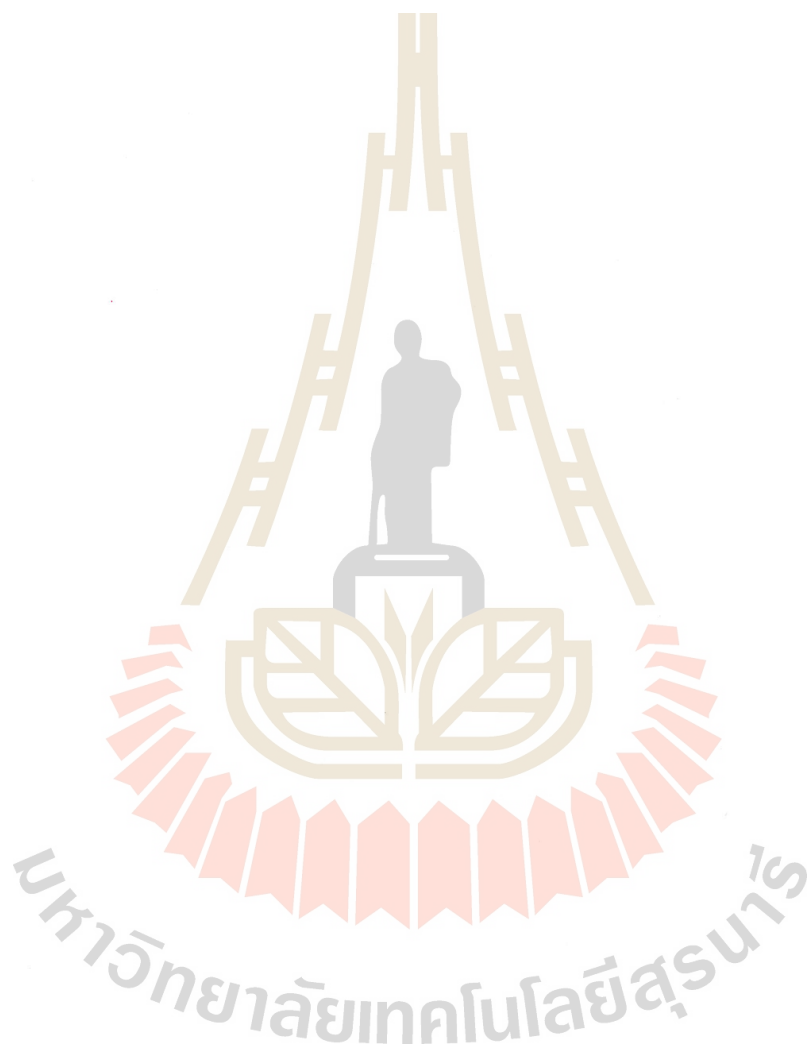
SOLDER SCRAP BY ELECTROREFINING. THESIS ADVISOR :

SAKHOB KHUMKOA, Dr.-Ing., 110 PP.

SOLDER WASTE/ RECYCLING OF TIN/ ELECTROREFINING

The aim of this research is to recover pure tin from solder waste by using electrorefining method. Various parameters affecting the electrolysis cell include type of solder wastes, concentration of electrolysis solution and voltage of the electrolysis cell. Lead-free solder waste type of SnAgCu is composed of 96.5 wt%Sn-2.85 wt%Ag-0.471wt%Cu and solder waste type of SnCu is composed of 99.3wt%Sn-0.108wt%Ag-0.485 wt% Cu. These solder scraps have been prepared as the anode of the electrolysis cell. Sulfuric acid with concentration of 1.5-2.5 M is used as electrolytic solution. Cathode is made of pure tin. A DC power supply is applied to the cell at varying voltage between 0.15-0.60 V for 24 hours. After electrolysis, the used electrolyte was analyzed by using an Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectroscopy. Chemical compositions of anode slime were analyzed by using X-Ray Fluorescence Spectroscopy, whereas chemical compositions of deposited metals at cathode were analyzed by using Optical Emission Spectrometer. The results indicate that increasing cell voltage and electrolytic solution concentration increased the weight of deposited metal at the cathode. Based on this experiment, the deposition of tin at the cathode is higher when the anode type SnCu was used in comparison to that of SnAgCu anode type for all range of voltage applied. High purity of tin is achieved when the applied voltage did not exceed 0.20 V. However, when the applied voltage exceeds 0.20 V, the amount of

deposited tin is increased but purity level of tin is decreased. The highest current efficiency is observed when the applied voltage is 0.20 V at 2.5 M of Sulfuric acid, determined by the highest tin and the lowest energy consumption.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Loeslakkhana S.

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จได้เนื่องจากได้รับความสนับสนุนและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากท่านอาจารย์ ดร.สงบ คำคือ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาจัดหาทุนการศึกษาที่ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุนOROG) แก่ผู้วิจัยและยังเป็นที่ปรึกษาในการวางแผนและเสนอแนะในการดำเนินงาน ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย จนทำให้การวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำแนะนำ ซึ่งแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไข อนุมัติงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาคารเครื่องมือ 1, 6 และ 10 ซึ่งให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ตลอดจนการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณนางเอมอร ก่อเกียรติสกุล ที่คอยแนะนำการยื่นเรื่องเกี่ยวกับเอกสารต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวถึงข้างต้น ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณเป็นอย่างสูง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา อันเป็นที่เคารพและรักยิ่ง ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้โอกาสและสนับสนุนเรื่องการศึกษาที่ดีตลอดมา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ซึ่งบุคคลเหล่านี้เป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เลิศลักษณ์ ศรีคัง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชณววรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วิธีการสกัดโลหะดีบุก.....	4
2.1.1 วิธีการสกัดโลหะดีบุกจากแร่แบบดั้งเดิม.....	4
2.1.2 วิธีการสกัดโลหะดีบุกจากแหล่งวัตถุดิบทางเลือก.....	7
2.2 ขยะอิเล็กทรอนิกส์.....	9
2.2.1 ความหมายของขยะอิเล็กทรอนิกส์.....	9
2.2.2 ประเภทของขยะอิเล็กทรอนิกส์.....	9
2.2.3 แหล่งกำเนิดของขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย.....	10
2.2.4 ผลกระทบจากซากขยะอิเล็กทรอนิกส์.....	10
2.3 เศษบัดกรี.....	11
2.3.1 การบัดกรี.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ความหมายของลวดหรือวัสดุบัดกรี.....	11
2.4 การรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรี.....	14
2.4.1 การสกัดดีบุกโดยวิธีอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง.....	14
2.4.2 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโตรไลซิส.....	17
2.4.3 น้ำหนักจริงของโลหะที่ขั้วแคโทด, ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า และพื้นที่ผิวรวมที่แคโทดของอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง.....	18
2.4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง.....	19
2.4.5 อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์และการสิ้นเปลืองพลังงานสำหรับอิเล็กโตร รีไฟนิ่ง.....	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 วัตถุดิบวัสดุและสารเคมี.....	24
3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้สำหรับทำแผ่นแอโนด.....	24
3.1.2 วัตถุดิบที่ใช้สำหรับทำแผ่นแคโทด.....	25
3.1.3 สารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์.....	25
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง.....	25
3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด.....	25
3.2.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	26
3.2.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	26
3.2.4 เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก.....	27
3.2.5 เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	28
3.2.6 แคลมป์มิเตอร์.....	28
3.2.7 ชุดกรองสารละลาย.....	29
3.2.8 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง.....	29
3.2.9 ชุดอุปกรณ์สำหรับเซลล์อิเล็กโตรรีไฟนิ่ง.....	30
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 เครื่องวัดกระดาศทรายแบบสายพาน.....	31
3.3.2 Optical Emission Spectrometer.....	31
3.3.3 X-Ray Fluorescence Spectroscopy.....	32
3.3.4 Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectroscopy.....	33
3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	34
3.5 สภาวะการทดลอง.....	37
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	39
4.1 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	41
4.2 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า.....	45
4.3 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ต่อปริมาณการใช้พลังงาน.....	49
4.4 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ต่อความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทด.....	51
4.5 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ต่อปริมาณโลหะในสารละลายอิเล็กโตรไลต์.....	55
4.6 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ต่อปริมาณของโลหะในตะกอนแอโนด.....	60
5 สรุปผลการทดลอง.....	64
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก ก ตัวอย่างลักษณะของเซลล์ระหว่างทำการทดลองที่ระยะเวลาต่าง ๆ และลักษณะ ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง.....	68
ภาคผนวก ข ผลการทดลองและผลการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการทำอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง.....	93
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดของส่วนผสมทางเคมีและปริมาณของสารมลทินของ โลหะดีบุกทางการค้า.....6
2.2	ตัวอย่างเกรดของลวดบัดกรีที่แบ่งตามปริมาณของดีบุกและลักษณะการใช้งาน..... 13
2.3	ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน..... 16
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเศษลวดบัดกรี..... 24
3.2	สภาวะการทดลองต่าง ๆ..... 38

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลำดับขั้นตอนการสกัดโลหะดีบุกจากแร่แบบดั้งเดิม	5
2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากโลหะดีบุก	7
2.3 เปรียบเทียบปริมาณการผลิตดีบุกจากเหมือง และการบริโภคดีบุกที่เกิดขึ้นในโลก ระหว่าง ปี ค.ศ. 2011-2016	8
2.4 แผนภูมิสมมูลเฟสของตะกั่วและดีบุก	12
2.5 แผนภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์	15
3.1 เซลล์แบตเตอรี่	23
3.2 เม็ดดีบุกบริสุทธิ์	24
3.3 กรดซัลฟูริก	25
3.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก	25
3.5 เตาเผาอุณหภูมิสูง	26
3.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	27
3.7 เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก	27
3.8 โวลต์มิเตอร์	28
3.9 แคลมป์มิเตอร์	28
3.10 ชุดกรองสารละลาย	29
3.11 เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง	30
3.12 ชุดอุปกรณ์สำหรับประกอบเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์	30
3.13 เครื่องวัดกระดาศทรายแบบสายพาน	31
3.14 Optical Emission Spectrometer	32
3.15 X-Ray Fluorescence Spectroscopy	33
3.16 Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectroscopy	34
3.17 ขั้นตอนการวิจัย	35
3.18 เซลล์อิเล็กโทรไลต์	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การเปลี่ยนแปลงที่ขั้วแคโทดในระหว่างการทดลองและผลที่เกิดจากการทดลอง.....	40
4.2 การเกาะตัวของโลหะที่แคโทดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnCu.....	42
4.3 การเกาะตัวของโลหะที่แคโทดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnAgCu.....	43
4.4 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	44
4.5 ลักษณะก้อนโลหะที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnCu.....	46
4.6 ลักษณะก้อนโลหะที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnCu.....	47
4.7 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ต่อประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า.....	48
4.8 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ต่อการสิ้นเปลืองพลังงาน.....	50
4.9 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อความบริสุทธิ์ ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทด.....	52
4.10 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของ โลหะเงินเกาะที่แคโทด.....	53
4.11 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของ โลหะทองแดงเกาะที่แคโทด.....	54
4.12 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของ โลหะดีบุกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	56
4.13 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของ โลหะเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	58
4.14 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของ โลหะทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะดีบุกในตะกอนแอโนด.....	61
4.16 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะเงินในตะกอนแอโนด.....	62
4.17 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะทองแดงในตะกอนแอโนด.....	63



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

λ_e	=	ค่าคงที่ไฟฟ้าเคมี
Q	=	ปริมาณไฟฟ้า
I	=	กระแสไฟฟ้า
t	=	เวลา
A_w	=	น้ำหนักอะตอม
z	=	จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเท
F	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์
q_e	=	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
N_A	=	อิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งโมล
W_{th}	=	น้ำหนักของโลหะที่ได้ตามทฤษฎี
ε	=	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า
A_s	=	พื้นที่ผิวรวมที่แคโทด
A_c	=	พื้นที่ผิวที่แคโทด
N	=	เลขของแคโทด
ε^*	=	ประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า
$E_{applied}$	=	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้
E_a	=	ศักย์ไฟฟ้าเกินกัมมันต์
E_c	=	ศักย์ไฟฟ้าโพลาริเซชันความเข้มข้น
E_{rev}	=	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่จุดสมดุล
E_{IR}	=	ศักย์ที่ตัดคร่อมความต้านทานของสารละลาย
ρ_x	=	ความต้านทานของสารละลาย
L	=	ระยะห่างระหว่างแอโนดและแคโทด
R_s	=	ความต้านทานสารละลาย
P_R	=	อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์
P	=	กำลังไฟฟ้า
γ	=	การสิ้นเปลืองพลังงาน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการให้ความสำคัญกับการรีไซเคิลโลหะจากแหล่งวัตถุดิบทางเลือกมากขึ้น โดยแหล่งวัตถุดิบทางเลือกต่าง ๆ มีหลายรูปแบบ เช่น ขยะอิเล็กทรอนิกส์, เศษและซากจากกระบวนการผลิต, อุปกรณ์และเครื่องใช้ที่หมดอายุการใช้งาน และกากของเสียอุตสาหกรรม เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากสามารถนำมาสกัดเอาโลหะมาใช้ประโยชน์ทดแทนการสกัดโลหะจากแร่ธรรมชาติได้ นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งถ้าหากมีการจัดการที่เหมาะสม ก็จะทำให้มีความคุ้มค่ากับการลงทุนในการผลิตเป็นวัตถุดิบทดแทน ซึ่งเศษบัดกรีก็เป็นหนึ่งในกากของเสียอุตสาหกรรมที่น่าสนใจ โดยโลหะบัดกรีทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกัน อุณหภูมิหลอมละลายของตัวประสานนี้จะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานที่ต้องการนำมาเชื่อมประสานกันเสมอ ดังนั้น โลหะที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานต้องมีจุดหลอมตัวไม่สูงมาก

ลวดบัดกรีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายโดยทั่วไป คือ โลหะผสมของตะกั่วและดีบุก โดยมีจุดหลอมตัว 183 °C เมื่อเปรียบเทียบกับตะกั่วซึ่งมีจุดหลอมตัว 327 °C และดีบุกซึ่งมีจุดหลอมตัว 232 °C ได้มีรายงานว่าในการบัดกรีโลหะผสมตะกั่วจะเกิดไอระเหยของตะกั่วขึ้น ทั้งนี้ ไอตะกั่วมีผลกระทบต่อระบบประสาท ระบบทางเดินอาหาร ระบบทางเดินหายใจ และทำลายสมองซึ่งควบคุมการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกายได้ ดังนั้น จึงต้องระมัดระวังและต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการทำงาน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการใช้ลวดบัดกรีชนิดที่ไม่มีตะกั่ว ซึ่งได้ใช้โลหะผสมที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบหลักแทน โดยมีหลายเกรดขึ้นอยู่กับปริมาณของดีบุกและชนิดของสารเจือ เช่น การเจือฟอสฟอรัส, เงิน, ทองแดง, อินเดียม, แคดเมียม, อะลูมิเนียม, บิสมัท, เหล็ก, สังกะสี และนิกเกิล เป็นต้น

ในกระบวนการบัดกรีต่าง ๆ เช่น การบัดกรีไดโอด, อาร์ซี และตัวต้านทาน บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้เกิดของเสียขึ้น ของเสียเหล่านี้มีดีบุกเป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถสกัดนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยผู้วิจัยจึงได้มองเห็นความสำคัญในส่วนนี้ จึงเลือกทำการวิจัยรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรีที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรม โดยได้นำของเสียดังกล่าวมาแยกทำให้เกิดเป็น

ดีบุกบริสุทธิ์ เพราะจะทำให้มีมูลค่าสูงขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ซึ่งวิธีที่เหมาะสมในการทำให้เกิดเป็นโลหะดีบุกบริสุทธิ์คือวิธีอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง

การรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรีโดยวิธีอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง มีจุดประสงค์เพื่อสกัดเอาดีบุกบริสุทธิ์กลับมาใช้ประโยชน์ โดยมีอุปกรณ์และเครื่องมือ ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง, ขั้วอิเล็กโตรด (ขั้วแอโนดและแคโทด) และสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์ จะเรียกว่า เซลล์อิเล็กโตรไลซิส เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบของเซลล์ จะเกิดการถ่ายเทไอออนของโลหะขึ้น แผ่นแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ไอออนของโลหะดีบุกละลายลงไปอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ จากนั้นไอออนของดีบุกจะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่แผ่นแคโทด เกิดเป็นโลหะดีบุกบริสุทธิ์เกาะที่แผ่นแคโทด ตัวแปรของอิเล็กโตรรีไฟนิ่งที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ อุณหภูมิของอิเล็กโตรไลต์, การไหลหรือการหมุนเวียนของอิเล็กโตรไลต์, ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์, ค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์ โดยตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อการเกาะของโลหะที่แผ่นแคโทด นอกจากนี้ ยังพิจารณาถึงการเติมสารเติมแต่งหรือสารยับยั้งที่มีผลต่อความสม่ำเสมอและความราบเรียบของโลหะที่เกาะที่ขั้วแคโทดด้วย

จากการศึกษาเอกสารวิชาการต่าง ๆ พบว่าสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่นิยมใช้ คือ กรดซัลฟูริก ทั้งนี้ กรดซัลฟูริกเป็นกรดแก่ จึงสามารถพาไอออนดีบุกจากแอโนดไปรับอิเล็กตรอนที่แคโทดได้ดี สามารถหาได้ง่าย ราคาไม่สูงมาก เหมาะกับการใช้เป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ทั้งในระดับการทดลองในห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม แอโนดเป็นของเสียนิตเศษบัดกรีซึ่งมีดีบุกเป็นองค์ประกอบ โดยอาจจะมีสารเจืออื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วมด้วย ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เป็นตัวแปรสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อการทำอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง อย่างไรก็ตาม พบว่าการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ไม่ได้เน้นถึงตัวแปรนี้มากนัก ทั้งนี้ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นตัวกำหนดชนิดของโลหะที่จะละลายลงไป สารละลายและจะไปจับอิเล็กตรอนเกิดเป็นโลหะเกาะที่แคโทด ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทำอิเล็กโตรรีไฟนิ่งที่มีผลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า, การสิ้นเปลืองพลังงาน และศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลาย กรดซัลฟูริกที่มีผลต่อปริมาณและความบริสุทธิ์ของโลหะที่เกาะที่แคโทด, การเกิดตะกอนแอโนด และการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ เพื่อทราบอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการรีไซเคิลเศษบัดกรีชนิดที่ไม่มีตะกั่ว เพื่อนำเอาโลหะดีบุกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในอิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้ิ่งที่มีผลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า และการสิ้นเปลืองพลังงาน

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟูริกและชนิดของสเปกตรัมที่ใช้ในอิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้ิ่งที่มีผลต่อปริมาณและความบริสุทธิ์ของโลหะที่ไปเกาะที่แคโทด, การเกิดตะกอนแอโนด และการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการรีไซเคิลโลหะดีบุกจากสเปกตรัมด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้ิ่ง โดยเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1.5, 2.0 และ 2.5 M แอโนดเป็นสเปกตรัมมีองค์ประกอบของ SnCu และ SnAgCu และค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้ิ่งระหว่าง 0.15-0.60 V

1.3.2 วิเคราะห์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าและการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยพิจารณาถึงปริมาณและความบริสุทธิ์ของโลหะที่ไปเกาะที่แคโทด, การเกิดตะกอนแอโนด และการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการรีไซเคิลสเปกตรัมชนิดที่ไม่มีตะกั่ว เพื่อนำเอาโลหะดีบุกกลับมาใช้ประโยชน์

1.4.2 เป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมในการรีไซเคิลของเสียเพื่อนำโลหะมีค่ากลับมาใช้ประโยชน์

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงวิธีการสกัดโลหะดีบุก ซึ่งประกอบด้วยวิธีการสกัดโลหะดีบุกจากแร่แบบดั้งเดิม การสกัดโลหะดีบุกจากแหล่งวัตถุดิบทางเลือก ความหมายและประเภทของขยะอิเล็กทรอนิกส์ ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ผลกระทบจากซากขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซากขยะอิเล็กทรอนิกส์ประเภทเศษบัดกรี รายละเอียดและความหมายของวัสดุบัดกรี กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีสำหรับการรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรี การทำให้โลหะดีบุกบริสุทธิ์โดยวิธีอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโตรไลซิส ซึ่งใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง เช่น น้ำหนักของโลหะที่เกาะที่ขั้วแคโทดในทางทฤษฎี, ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าและพื้นที่ผิวรวมที่แคโทด, ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้, อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ และการสิ้นเปลืองพลังงาน สำหรับอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง และส่วนสุดท้ายของบทกล่าวถึงผลการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลดีบุกจากของเสียอุตสาหกรรมโดยวิธีอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง

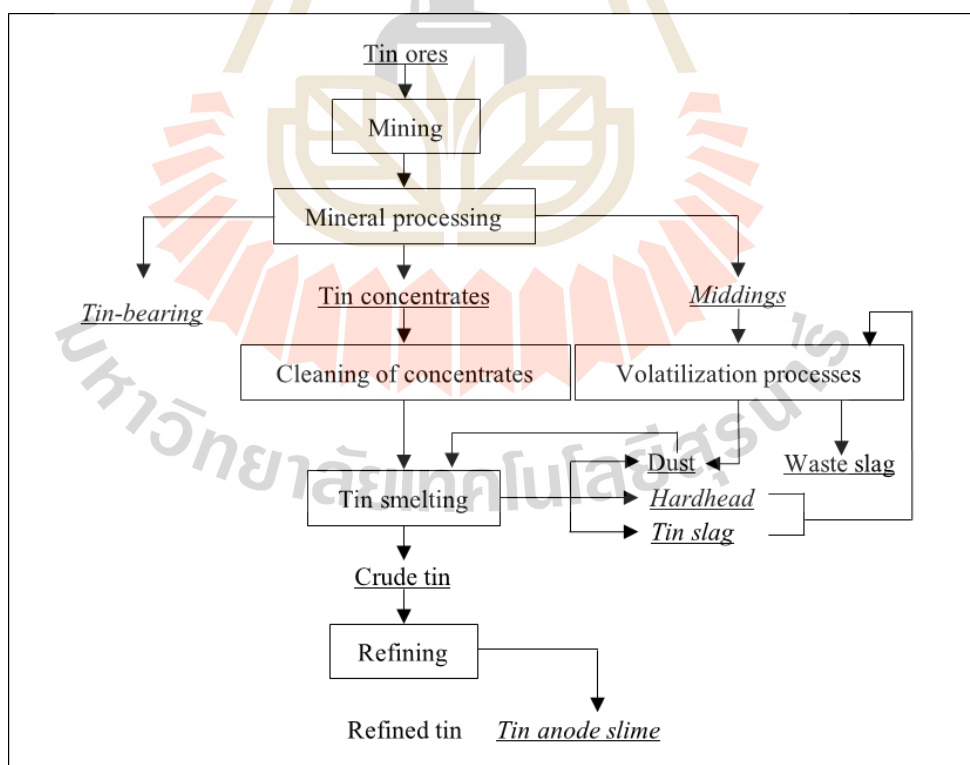
2.1 การสกัดโลหะดีบุก

2.1.1 วิธีการสกัดโลหะดีบุกจากแร่แบบดั้งเดิม

แร่ดีบุกที่พบในบริเวณพื้นผิวหรือใต้ผิวโลกมีอยู่มากกว่า 50 ชนิด แต่มีเพียงไม่กี่ชนิดที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการที่จะนำมาสกัดเป็นโลหะดีบุก ตัวอย่าง เช่น แร่แคสสิเทอไรท์ (Cassiterite : SnO_2) ซึ่งมีปริมาณดีบุกสูงถึง 78.6 wt% ออกซิเจน (Oxygen : O) 21.4 wt% อาจมีเหล็ก (Iron : Fe) ปนเล็กน้อย ประมาณ 3 wt% และมีธาตุโคลัมเบียม (Columbium : Cb) และแทนทาลัม (Tantalum : Ta) อาจมีปนเล็กน้อย แร่แคสสิเทอไรท์มีเสถียรภาพสูง ไม่ทำปฏิกิริยากับทั้งกรดและด่างภายใต้สภาวะทั่วไป ทำให้วิธีที่เหมาะสมในการสกัดโลหะดีบุกจากแร่แคสสิเทอไรท์จึงเป็นวิธีการใช้ความร้อนโดยการหลอมถลุง (Smelting) ลำดับขั้นตอนการสกัดโลหะดีบุกจากแร่แบบดั้งเดิมแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

จากรูปดังกล่าว แร่ดีบุก (Tin Ores) ที่เข้าสู่กระบวนการประกอบด้วยหัวแร่ดีบุก (Tin Concentrates) ซึ่งมีปริมาณดีบุกอยู่มาก และหางแร่ (Gauge Minerals) ซึ่งมีดีบุกอยู่ในปริมาณน้อยมาก โดยที่เหลือเป็นกรวด หิน ดิน ทราย และธาตุอื่น ๆ ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการ ดังนั้น จึงต้องมีกระ

บวนการแต่งแร่ (Mineral Processing) ก่อนเข้าสู่กระบวนการถลุง ซึ่งกระบวนการแต่งแร่ ประกอบด้วย การแยกด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Separation) การย่างแร่ (Roasting) และการชะละลายด้วยกรด (Acid Leaching) ทำให้ธาตุที่ไม่ต้องการในหัวแร่ เช่น สารหนู (Arsenic : As) กำมะถัน (Sulfur : S) ตะกั่ว (Lead : Pb) พลวง (Antimony : Sb) ทังสแตน (Tungsten : W) และเหล็ก (Iron : Fe) ถูกกำจัดออกไปก่อน จากนั้นจะได้หัวแร่ดีบุกที่มีความเข้มข้นของดีบุกอยู่มาก หัวแร่จะถูกป้อนลงไปยังเตาถลุงโดยมีการเติมสารรีดิวซ์ (Reducing Agent หรือ Reductant) ได้แก่ แอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) โคลก (Coke) เป็นต้น พร้อมกับฟลักซ์ (Fluxes) เช่น หินปูน (Limestone) และทราย (Quartz) เป็นต้น ซึ่งเป็นสารฟอรัมสแลก (Slag) วัตถุดิบเหล่านี้จะถูกหลอมที่อุณหภูมิ 1100-1200 °C ในเตาอน (Reverberatory Furnace) ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ ดีบุกดิบ (Crude tin) โดยมีฝุ่น (Dust) ก้อนที่หลอมยาก (Hardhead) ตะกรันดีบุก (Tin slag) เกิดขึ้นด้วย ดีบุกดิบที่ได้จะนำเข้าสู่กระบวนการรีไฟน์ด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นไปพร้อมกัน ทำให้สุดท้ายแล้วผลิตรภัณฑ์ที่ได้คือดีบุกบริสุทธิ์ (Refined Tin) และตะกอนแอโนดของดีบุก (Tin anode slime)



รูปที่ 2.1 ลำดับขั้นตอนการสกัดโลหะดีบุกจากแร่แบบดั้งเดิม (Zijian, S. และคณะ, 2017)

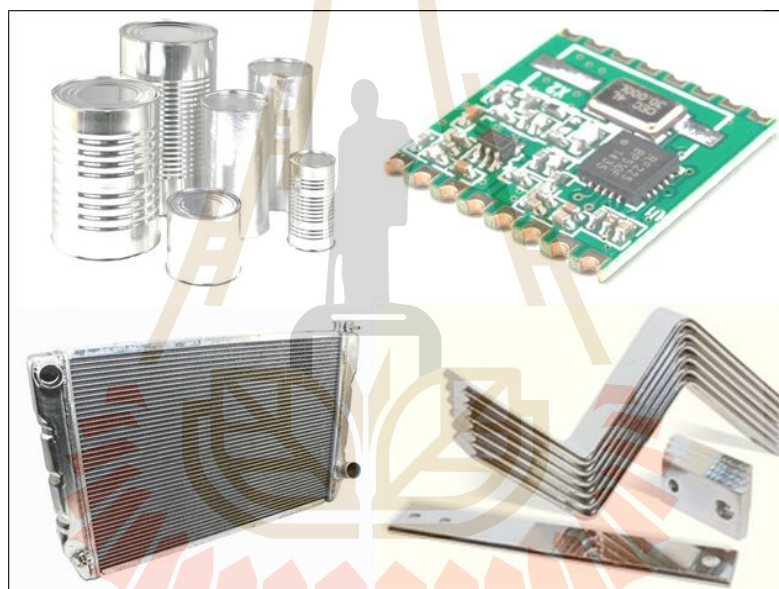
โลหะดีบุกที่ใช้งานส่วนใหญ่เป็นเกรดที่มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้หลากหลายกว่าเกรดที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ มาตรฐานโลหะดีบุกที่กำหนดโดย ASTM (American Society for Testing and Materials) มีหลายเกรด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งได้ระบุถึงส่วนประกอบทางเคมีและปริมาณมลทินของโลหะดีบุก (wt%) ตามมาตรฐาน ASTM B 339-72 ตัวอย่าง เช่น เกรด A มีปริมาณดีบุกต่ำสุด 99.8 wt% ปริมาณพลวงสูงสุด 0.04 wt% ปริมาณสารหนูสูงสุด 0.05 wt% เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของส่วนผสมทางเคมีและปริมาณของสารมลทินของโลหะดีบุกทางการค้า (Zijian, S. และคณะ, 2017)

ธาตุ	เกรด (wt%)		
	AAA	AA	A
ดีบุก (ต่ำสุด)	99.98	99.95	99.8
พลวง (สูงสุด)	0.008	0.02	0.04
สารหนู (สูงสุด)	0.0005	0.01	0.05
บิสมัท (สูงสุด)	0.001	0.01	0.015
แคดเมียม (สูงสุด)	0.001	0.001	0.001
ทองแดง (สูงสุด)	0.002	0.02	0.04
เหล็ก (สูงสุด)	0.005	0.01	0.015
ตะกั่ว (สูงสุด)	0.010	0.02	0.05
นิกเกิล+โคบอลต์ (สูงสุด)	0.005	0.01	0.01
ซัลเฟอร์ (สูงสุด)	0.002	0.01	0.01
สังกะสี (สูงสุด)	0.001	0.005	0.005

การใช้งานโลหะดีบุกที่ได้จากวิธีการสกัดจากแร่แบบดั้งเดิมมีหลากหลาย ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ทั้งในรูปของโลหะดีบุกบริสุทธิ์และโลหะดีบุกผสม โลหะดีบุกบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีสีขาว และเป็นมันวาว สามารถเกาะติดกับผิวเหล็กหรือโลหะต่าง ๆ ได้ดี จึงเหมาะนำมาเคลือบโลหะได้หลายชนิด อาทิ เหล็ก ทองเหลือง และทองแดง แต่ถูกนำมาใช้มากที่สุด คือ งานเคลือบบนผิวเหล็กกล้าด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งชั้นเคลือบดีบุกมีหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนของเนื้อเหล็กกล้า ตัวอย่างแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยดีบุก เช่น แผ่นเหล็กเคลือบดีบุกใช้งานทั่วไปและภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น ส่วนโลหะดีบุกผสมได้ถูกนำไปใช้งานที่หลากหลาย เนื่องจาก

ดีบุกเป็นโลหะอ่อน มีจุดหลอมเหลวต่ำ สามารถผสมละลายกับโลหะอื่นได้ดี เช่น ทองแดง แคดเมียม เงิน สังกะสี อะลูมิเนียม และตะกั่ว เป็นต้น โดยธาตุเหล่านี้มีผลทำให้โลหะดีบุกผสมมีความแข็งแรง, การนำไฟฟ้าและทนต่อการกัดกร่อนดีขึ้น เช่น โลหะสำหรับบัดกรีวงจร อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มีปริมาณดีบุก 96.5 wt% เจือเงิน 3.5 wt% หรือดีบุก 97-99 wt% เจือทองแดง 1-3 wt% โลหะดีบุกผสมตะกั่วในการใช้ผลิตหม้อน้ำรถยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ โลหะดีบุกผสมทองแดงที่ใช้ในการผลิตทองสัมฤทธิ์ (Bronze) ที่นำไปใช้ในการสร้างศิลปวัตถุต่าง ๆ ซึ่งมีปริมาณดีบุก 20 wt% และปริมาณทองแดง 80 wt% โลหะผสมดีบุกซึ่งมีดีบุก 13 wt% และเจือด้วย เงิน ทองแดง และปรอท ใช้สำหรับอุดฟันและงานทันตกรรม (Dental Amalgam) เป็นต้น โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากโลหะดีบุก ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2

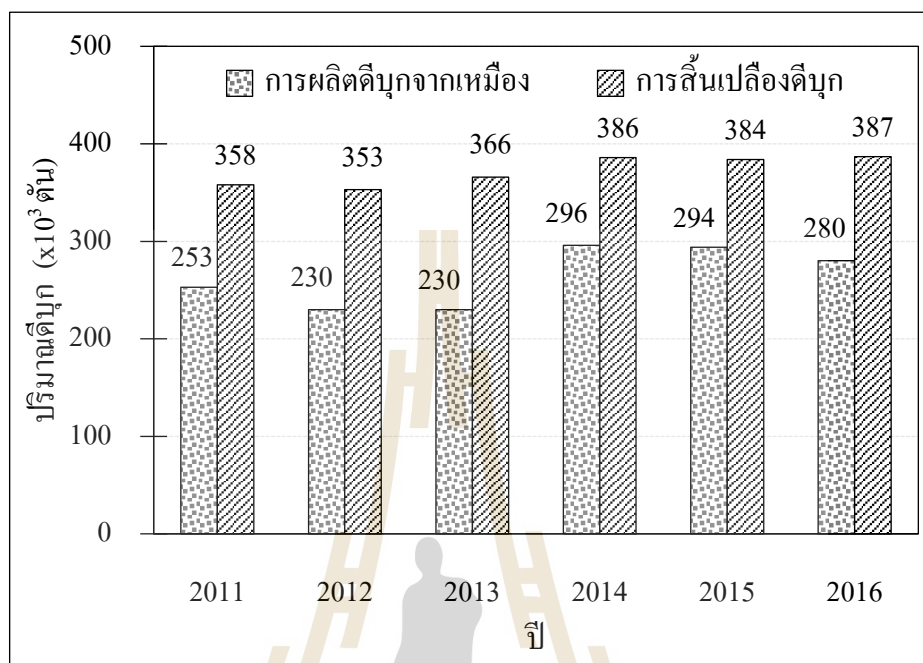


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากโลหะดีบุก

2.1.2 การสกัดโลหะดีบุกจากแหล่งวัตถุดิบทางเลือก

การสิ้นเปลืองดีบุก (Tin Consumption) ที่เกิดขึ้นในโลกช่วงปี ค.ศ. 2011 ถึง ค.ศ. 2016 มีแนวโน้มที่สูงขึ้น จากการรายงานของ Zijian, S. และคณะ (2017) พบว่าในปี ค.ศ. 2011 มีการสิ้นเปลืองดีบุกในปริมาณ 358,000 ตัน และในปี ค.ศ. 2016 เพิ่มขึ้นเป็น 387,000 ตัน แต่ในทางกลับกันปริมาณการผลิตดีบุกจากเหมือง (Mine Production) ที่เกิดขึ้นในโลกนั้น มีปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้น การนำกลับคืนมาใช้ใหม่ (Recycle) จากแหล่งวัตถุดิบทุติยภูมิ (Secondary Resources) จึงมีความสำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งวัตถุดิบ

ทางเลือก (Alternative Resources) เพื่อผลิตดีบุกให้เพียงพอต่อความต้องการ



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบปริมาณการผลิตดีบุกจากเหมือง และการสิ้นเปลืองดีบุกที่เกิดขึ้นในโลก ระหว่าง ปี ค.ศ. 2011-2016 (ข้อมูลจาก กรมสำรวจธรณีวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา (USGS) และสถาบันวิจัยดีบุกนานาชาติ (ITIR)) (Zijian, S. และคณะ, 2017)

แหล่งวัตถุดิบทุติยภูมิหรือแหล่งวัตถุดิบทางเลือกมีหลายแหล่ง เช่น ผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นจากการสกัดโลหะดีบุกจากแร่แบบดั้งเดิม ได้แก่ หางแร่ดีบุก (Tin-bearing tailings) มีปริมาณดีบุก 0.1-1.0 wt% แร่ดีบุกคละ (Middlings) มีปริมาณดีบุก 3-5 wt% สแลกดีบุก (Tin Slag) มีปริมาณดีบุก 2-10 wt% ก้อนที่หลอมยาก (Hardhead) มีปริมาณดีบุก 20-60 wt% และตะกอนแอโนดของดีบุก (Tin anode slime) มีปริมาณดีบุก 40-60 wt% เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีของเสียที่มีส่วนผสมของดีบุกอยู่อีก เช่น เศษซากแผ่นดีบุก (Tin Plate Scrap) จากกระบวนการผลิต, ชิ้นส่วนที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานและขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic-Wastes : E-Waste) ซึ่งสามารถที่จะนำมารีไซเคิลเพื่อสกัดเอาดีบุกมาใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน

2.2 ขยะอิเล็กทรอนิกส์

2.2.1 ความหมายของขยะอิเล็กทรอนิกส์

จากบทความทางวิชาการซึ่งรวบรวมโดย นิชชา บูรณสิงห์ (2016) กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้ให้คำจำกัดความของขยะอิเล็กทรอนิกส์ ว่าเป็น “ซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์” (Waste Electrical and Electronic Equipment หรือ WEEE) ซึ่งหมายถึง ซากเครื่องใช้หรืออุปกรณ์ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กในการทำงานที่ไม่ได้มาตรฐาน (Off-Spec) หรือหมดอายุการใช้งาน หรือล้าสมัย ขณะที่กรมอนามัย สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม ได้ให้ความหมายของขยะอิเล็กทรอนิกส์ หมายถึง เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่หมดอายุการใช้งานหรือไม่ต้องการใช้งานอีกต่อไป เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทำให้ผู้บริโภคเปลี่ยนเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บ่อยครั้งขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องมีการจัดการอย่างถูกหลักวิชาการต่อไป เนื่องจากชิ้นส่วนของอุปกรณ์เหล่านั้น มีความเป็นพิษและไม่สามารถย่อยสลายเองตามธรรมชาติ ส่วนสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ได้ให้ความหมายของขยะอิเล็กทรอนิกส์ ว่าเป็นขยะอีกชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถย่อยสลายเองได้ในธรรมชาติ ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่ไม่ใช้แล้วในชีวิตประจำวัน เช่น โทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ แบตเตอรี่ และโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ขยะเหล่านี้เป็นขยะที่อันตรายอาจจะมีสารเคมีรั่วไหลจนก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมได้

2.2.2 ประเภทของขยะอิเล็กทรอนิกส์

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ตามความหมายของ WEEE แบ่งเป็น 10 ประเภท ได้แก่

- 1) เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในครัวเรือนขนาดใหญ่ เช่น ตู้เย็น เครื่องทำความเย็น เครื่องซักผ้า เครื่องล้างจาน ฯลฯ
- 2) เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในครัวเรือนขนาดเล็ก เช่น เครื่องดูดฝุ่น เตารีด เครื่องปั่นขนมปัง มิคโคโนไฟฟ้า ฯลฯ
- 3) อุปกรณ์ IT เช่น คอมพิวเตอร์ เมนเฟรม โน้ตบุ๊ก เครื่องสแกนภาพเครื่องโทรสาร/โทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ ฯลฯ
- 4) เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้บริโภค เช่น วิทยุ โทรทัศน์ กล้อง เครื่องบันทึกวิดีโอ และเครื่องดนตรีที่ใช้ไฟฟ้า ฯลฯ
- 5) อุปกรณ์ให้แสงสว่าง เช่น หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ หลอดโซเดียม ฯลฯ
- 6) ระบบอุปกรณ์เครื่องมือการแพทย์
- 7) เครื่องมือวัดหรือควบคุมต่าง ๆ เช่น เครื่องจับควัน เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ฯลฯ
- 8) ของเล่น เช่น เกมส์บอยส์ ของเล่นที่ใช้ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ

- 9) เครื่องมือไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สว่าน เลื่อยไฟฟ้า หรืออิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ
- 10) เครื่องจำหน่ายสินค้าอัตโนมัติ เช่น เครื่องจำหน่ายเครื่องดื่มอัตโนมัติ ฯลฯ

2.2.3 แหล่งกำเนิดของขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

แหล่งกำเนิดขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่

- 1) ขยะหรือเศษซากที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Waste) ที่มีการปลดปล่อยสารเคมีหรือเศษเหลือทิ้งออกมาระหว่างทำการผลิตในกระบวนการผลิต และรวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสายการผลิตออกมาแล้วไม่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนดทำให้ต้องทำการแก้ไขใหม่ (Rework) บางส่วนนำไปรีไซเคิลหรือนำไปทำลายทิ้ง
- 2) ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในครัวเรือนหรือวิสาหกิจ ห้างร้านต่าง ๆ เป็นขยะที่เกิดจากการใช้งานผลิตภัณฑ์จนหมดอายุและเกิดภายในชุมชน (Household Waste) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าจนเครื่องเสีย หมดอายุการใช้งานหรือจากสาเหตุอุปกรณ์ไฟฟ้าลัดวงจรจนไม่สามารถแก้ไขให้กลับมาใช้งานได้เหมือนเดิม เป็นต้น
- 3) การนำเข้าขยะอิเล็กทรอนิกส์จากต่างประเทศ

2.2.4 ผลกระทบจากซากขยะอิเล็กทรอนิกส์

สารอันตรายจากซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีสารโลหะหนักที่มีอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมโดยตรง ไม่ว่าจะกำจัดด้วยวิธีเผาหรือฝัง เนื่องจากควันสีดำที่เกิดจากการเผาไหม้จะลอยขึ้นไปทำลายชั้นบรรยากาศ เมื่อนำไปฝังกลบสารเคมีเหล่านี้จะซึมลงไปในดินและทำลายชั้นดินและแหล่งน้ำใต้ดิน เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย และระบบนิเวศ ตัวอย่างผลกระทบของสารพิษจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ได้แก่

- 1) ตะกั่ว (Lead) เป็นส่วนประกอบในการบัดกรีแผ่นวงจรพิมพ์ หลอดภาพรังสีแคโทด (CRT) เป็นต้น โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะไปทำลายระบบประสาทส่วนกลาง ระบบโลหิต การทำงานของไต การสืบพันธุ์ และมีผลต่อการพัฒนาสมองของเด็ก นอกจากนี้ พิษจะสามารถสะสมได้ในสิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดผลเฉียบพลันหรือแบบเรื้อรังได้ในพืชและสัตว์
- 2) แคดเมียม (Cadmium) มักพบในแผ่นวงจรพิมพ์ ตัวต้านทาน และหลอดภาพรังสีแคโทด เป็นต้น ซึ่งสารนี้จะสะสมในร่างกายโดยเฉพาะที่ไต ทำลายระบบประสาท ส่งผลต่อพัฒนาการ และการมีบุตรหรืออาจมีผลกระทบต่อพันธุกรรม
- 3)ปรอท (Mercury) มักพบในตัวตัดความร้อน สวิตช์ และจอแบน โดยจะส่งผลในการทำลายอวัยวะต่าง ๆ รวมทั้งสมอง ไต และเด็กในครรภ์มารดาได้ และถ้าลงสู่แหล่งน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็น Methylated Mercury และตกตะกอน ซึ่งสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ง่าย และจะสะสมต่อไปตามห่วงโซ่อาหาร

4) เบริลเลียม (Beryllium) ใช้ในแผงวงจรหลัก เป็นการก่อมะเร็ง โดยเฉพาะมะเร็งปอด โดยผู้ที่ได้รับสารนี้อย่างต่อเนื่องจากการสูดดมจะกลายเป็นโรค Berylliosis ซึ่งมีผลกับปอด หากสัมผัสจะทำให้เกิดแผลที่ผิวหนังอย่างรุนแรง

5) สารหนู (Arsenic) ใช้ในแผงวงจร ซึ่งทำลายระบบประสาท ผิวหนัง และระบบการย่อยอาหาร หากได้รับปริมาณมากอาจทำให้ถึงเสียชีวิตได้

2.3 เศษบัดกรี

2.3.1 การบัดกรี

การบัดกรี (Soldering) คือ การประสานชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกัน ซึ่งชิ้นงานทั้งสองชิ้นอาจเป็นวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ (ประพิศ ประคุณหังสิตและคณะ, 2001) โดยใช้วัสดุบัดกรีที่มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำเป็นตัวประสาน ซึ่งต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะที่ต้องการประสาน โดยทั่วไปมีอุณหภูมิไม่เกิน 450 °C การบัดกรีนั้นจะต้องเตรียมผิวบริเวณที่จะบัดกรีให้สะอาดเพื่อให้เกิดการประสานกันอย่างสมบูรณ์ และมีการใช้ฟลักซ์ (Flux) ช่วยในการกำจัดออกไซด์ขณะที่ทำการบัดกรี เมื่อโลหะบัดกรีเย็นตัวลงจะทำให้เกิดการยึดเกาะกันเหนียวแน่นขึ้น โดยฟลักซ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดบอริก (Boric Acid : H_3BO_3) โซเดียมไซยาไนด์ (Sodium Cyanide : NaCN) อัลคาไลน์ (Alkaline) เป็นต้น

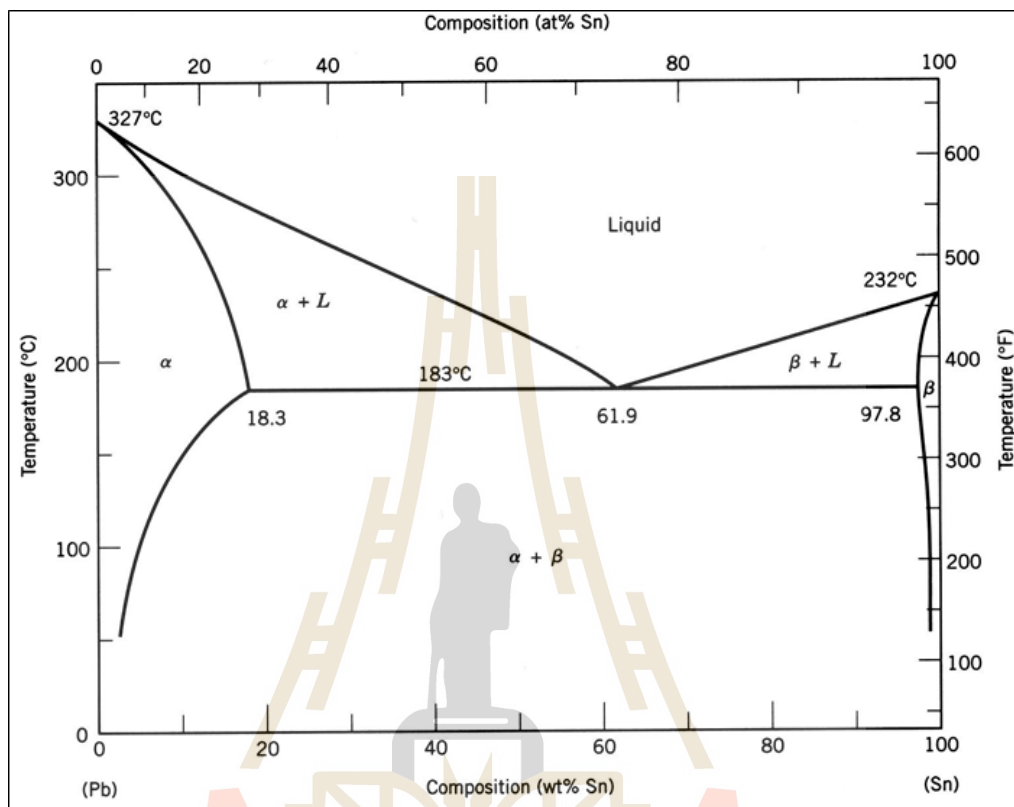
งานบัดกรีมีหลากหลาย เช่น งานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ งานท่อ งานซ่อมตัวถังรถยนต์ แผ่นเหล็กชนิดต่าง ๆ อุปกรณ์ที่ใช้ในบ้าน เช่น รางน้ำ ถังน้ำ ข้อต่อต่าง ๆ และสังกะสีสำหรับมุงหลังคา เป็นต้น โดยรอยต่อของชิ้นงานที่เกิดจากการบัดกรีต้องนำความร้อน มีความแข็งแรงและนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งาน แต่จะเห็นได้ว่ารอยบัดกรีนี้มีความแข็งแรงน้อยกว่าของชิ้นงาน ดังนั้น หากต้องการให้รอยบัดกรีมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ควรบัดกรีด้วยอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

2.3.2 ความหมายของลวดหรือวัสดุบัดกรี

ลวดหรือวัสดุบัดกรี เป็นโลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำ ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานสองชิ้นที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมละลายตัวประสานนี้มักจะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานที่จะนำมาเชื่อมต่อกันเสมอและวัสดุบัดกรีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานเท่านั้นแต่จะไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะที่ถูกประสาน

ลวดบัดกรีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายโดยทั่วไป คือ โลหะผสมของตะกั่วและดีบุก เป็นโลหะผสมที่มีจุดหลอมตัวต่ำสุดที่ 183 °C เมื่อเปรียบเทียบกับตะกั่วซึ่งมีจุดหลอมตัว 327 °C

และดีบุกซึ่งมีจุดหลอมตัว 232 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนั้น จึงมักเรียกลวดบัดกรีนี้ว่า “ตะกั่วบัดกรี” ทั้ง ๆ ที่ลวดบัดกรีบางเกรดไม่มีส่วนประกอบของตะกั่วและดีบุกผสมอยู่เลย



รูปที่ 2.4 แผนภาพสมดุลเฟสของตะกั่วและดีบุก

ลวดบัดกรีที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบมีด้วยกันหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีปริมาณดีบุกแตกต่างกัน โดยมีตะกั่วเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย นอกจากนี้แล้วยังมีธาตุเจืออื่น ๆ ผสมอยู่เล็กน้อย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ให้ลวดบัดกรีมีความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น การเชื่อมทองแดง, อินเดียม แคดเมียม, อะลูมิเนียม, บิสมัท, เหล็ก, สังกะสี และนิกเกิล เป็นต้น ตัวอย่างลวดบัดกรีชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างเกรดของลวดบัดกรีที่แบ่งตามปริมาณของดีบุกและลักษณะการใช้งาน
(ประพิศ ประคุณหังสิต และคณะ, 2001)

ปริมาณร้อยละ ของดีบุก	การใช้งาน
ดีบุก 96	ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากคุณสมบัติไม่เป็นพิษ และเมื่อใช้ในการบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิมรอยต่อบัดกรีจะเรียบและสีเหมือนกับชิ้นงาน
ดีบุก 95, 94	ใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องประดับมีค่าต่าง ๆ เชื่อมท่อต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับน้ำดื่ม
ดีบุก 70	ใช้สำหรับงานที่ต้องการปริมาณดีบุกสูงเป็นพิเศษ เช่น บัดกรีสังกะสี เป็นต้น และเคลือบผิวของโลหะ
ดีบุก 63	เป็นโลหะเจือของตะกั่วและดีบุก ที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำที่สุด เรียกว่า ยูเทคติกอัลลอยด์ (Eutectic Alloy) ใช้ในการเชื่อมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
ดีบุก 50	ใช้สำหรับบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษมากนัก ใช้เชื่อมรอยต่อแผ่นโลหะ ท่อและชิ้นงานที่มีรูปร่าง
ดีบุก 40A	ใช้งานเช่นเดียวกับ ดีบุก 50 แต่ไม่ใช้กับงานเชื่อมแบบสวิตดิง (Sweating) หรือแบบบิต (Bit) ส่วนมากใช้กับงานบัดกรีแบบจุ่มร้อน (Dip Soldering) สำหรับบัดกรีรอยต่อของท่อตะกั่ว และที่หุ้มสายโทรเลข
ดีบุก 30A	ใช้สำหรับบัดกรีตัวถังรถยนต์และกำลังชนวนความร้อนที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิ 370-480 °C ในขณะบัดกรี
ดีบุก 20A	ใช้งานมากในตัวถังรถยนต์
ดีบุก 10A	ใช้ในการบัดกรีและเคลือบโลหะ ซึ่งรอยบัดกรีสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า 204 °C
ดีบุก 5	ใช้สำหรับเคลือบและบัดกรีโลหะ ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า 246 °C แต่ความสามารถในการไหลไม่ดีเท่ากับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก 10A

สำหรับในอุตสาหกรรมนั้นต้องการกำลังการผลิตที่สูงและรวดเร็วด้วยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ ดังนั้น การบัดกรีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จึงต้องกระทำอย่างรวดเร็ว ซึ่งในอุตสาหกรรมได้ใช้ระบบการบัดกรีด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม การบัดกรีก็ยังมีเศษบัดกรีที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเกิดขึ้น ซึ่งของเสียมีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณการผลิตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญในการนำเศษบัดกรีซึ่งมีโลหะมีค่าเป็นองค์ประกอบกลับมาใช้

ประโยชน์ใหม่ โดยได้เลือกศึกษาวิจัยการวิจัยรีไซเคิลโลหะจากเศษบัดกรีที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะเศษบัดกรีที่เกิดจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง ซึ่งเป็นวิธีในการสกัดดีบุกจากแหล่งวัตถุดิบทางเลือก

2.4 การรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรี

การเลือกวิธีในการรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรี สามารถพิจารณาได้จากหลายปัจจัย ซึ่งหนึ่งในนั้นได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของเศษบัดกรี โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นก้อนซึ่งมีผงฝุ่นผสมอยู่ด้วย กระบวนการทางโลหวิทยาในการสกัดโลหะดีบุกจากเศษบัดกรีที่เหมาะสมคือกระบวนการสกัดโลหะและการทำให้โลหะบริสุทธิ์ด้วยวิธีอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง (Electrorefining) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การสกัดดีบุกด้วยวิธีอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง

อิเล็กโทรรีไฟนิ่งเป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการหลอมโลหะ (Smelter) หรือต่อจากวิธีอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning) ซึ่งเป็นวิธีการแยกโลหะออกจากสารละลายที่มีโลหะนั้นอยู่ แต่เนื่องจากเศษบัดกรีมีลักษณะเป็นก้อนอยู่แล้วจึงไม่มีความจำเป็นต้องนำไปทำให้อยู่ในรูปของสารละลายหรือวิธีอิเล็กโทรวินนิ่งอีก

การรีไซเคิลโลหะจากเศษบัดกรีด้วยวิธีอิเล็กโทรรีไฟนิ่งมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ดีบุกที่มีความบริสุทธิ์สูง ลวดบัดกรีที่ใช้งานในอุตสาหกรรมนั้นมีธาตุผสมเจืออยู่เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ให้กับลวดบัดกรี เช่น การเจือโลหะเงินเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า การเจือทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับรอยบัดกรี เป็นต้น ดังนั้น เมื่อนำเศษบัดกรีมาผ่านกระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่งแล้วจะทำให้เกิดการแยกตัวของธาตุผสมเหล่านั้น จึงจะทำให้ได้โลหะดีบุกบริสุทธิ์มากขึ้น

อุปกรณ์สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่งที่สำคัญประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Power Supply) ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์จะเรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis Cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นแอโนด (Anode) และแผ่นแคโทด (Cathode) แขนงสลับกันในถังซึ่งบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยแผ่นแอโนดทำมาจากเศษบัดกรีหลอมและหล่อเป็นแผ่น ต่อกับขั้วบวก (+) จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนแผ่นแคโทด มีลักษณะเป็นแผ่นบางทำมาจากแผ่นดีบุกบริสุทธิ์หลอมและหล่อเป็นแผ่น ต่อเข้ากับขั้วลบ (-) จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบของเซลล์จะเกิดการถ่ายเทไอออนของโลหะขึ้น โดยที่แผ่นแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ทำให้ไอออนของโลหะดีบุกละลายลงไปอยู่

ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1) จากนั้นไอออนดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่แผ่นแคโทด ซึ่งที่แผ่นแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ขึ้นกลายเป็นโลหะดีบุกบริสุทธิ์เกาะที่แผ่นแคโทด ดังแสดงในปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.2)

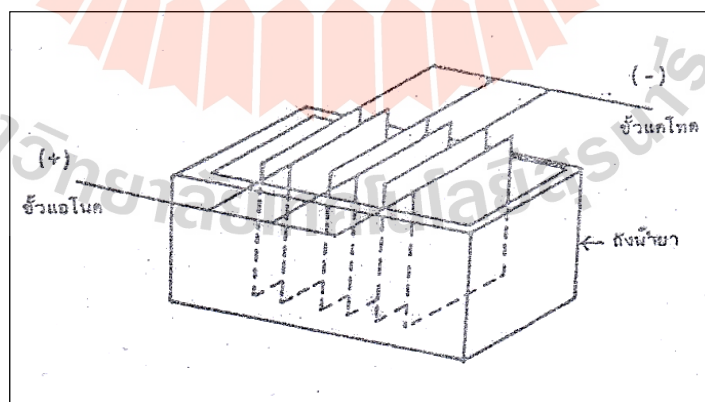
ขั้วอิเล็กโทรดทั้งแอโนดและแคโทด สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้หนึ่งของดีบุกเกิดปฏิกิริยาตามสมการ ดังนี้
ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยารวม



รูปที่ 2.5 แผนภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้หนึ่ง (ชาคร จารุพิสิฐธร)

สำหรับอิเล็กโทรไลต์หนึ่งของดีบุก หากค่าความต่างศักย์ของเซลล์พอดีที่จะทำให้ดีบุกละลายลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานสูงกว่าของดีบุก จะไม่ละลายลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งยังคงอยู่ที่แผ่นแอโนด เรียกว่า ตะกอนแอโนด (Anode Slime) เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (Standard Reduction Potentials) เฉพาะตัว ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (Danial, H., 2007)

ธาตุ	ปฏิกิริยา	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน, E° (V)
Li	$\text{Li}^+ + e^- = \text{Li}$	-3.040
Ca	$\text{Ca}^{2+} + 2e^- = \text{Ca}$	-2.868
Na	$\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$	-2.714
Mg	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2.360
Al	$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1.667
Zn	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.762
Cr	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0.740
Fe	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.440
Cd	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.403
Ni	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0.236
Sn	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.141
Pb	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0.126
H_2	$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$	0.000
Sn	$\text{Sn}^{4+} + 2e^- = \text{Sn}^{2+}$	+0.150
Cu	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	+0.337
I_2	$\text{I}_2 + 2e^- = 2\text{I}^-$	+0.535
Ag	$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	+0.799
Hg	$\text{Hg}^{2+} + 2e^- = \text{Hg}$	+0.885
Cl_2	$\text{Cl}_2 + 2e^- = 2\text{Cl}^-$	+1.360
Au	$\text{Au}^{3+} + 3e^- = \text{Au}$	+1.410
F_2	$\text{F}_2 + 2e^- = 2\text{F}^-$	+2.890

2.4.2 กฎของฟาราเดย์ที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กโทรไลซิส

กฎของฟาราเดย์ที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กโทรไลซิส (Nestor, P., 2004) กล่าวว่าปริมาณของโลหะที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอิเล็กโทรดระหว่างกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าแปรผันตรงกับปริมาณไฟฟ้า (Electric Charge : Q) ที่เคลื่อนที่ผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าคงที่ที่ผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปริมาณไฟฟ้าจะมีค่าดังแสดงในสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$\int dQ = I \int dt \quad (2.4)$$

$$Q = It \quad (2.5)$$

โดยปริมาณของโลหะที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอิเล็กโทรดมีค่าเป็นดังสมการ (2.6) และค่าปริมาณของโลหะสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$W = \lambda_e Q \quad (2.6)$$

$$W = \lambda_e It \quad (2.7)$$

โดยที่ λ_e คือ ค่าคงที่ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Constant) หน่วย กรัมต่อแอมแปร์

Q คือ ปริมาณไฟฟ้า หน่วย คูลอมบ์ ($C=A.s=J/V$)

I คือ กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์

t คือ เวลา หน่วย วินาที

ค่าของ λ_e สามารถเขียนในรูปอื่นได้ดังนี้

$$\lambda_e = \frac{A_w}{zq_e N_A} \quad (2.8)$$

จากนิยาม ปริมาณไฟฟ้าจำนวนหนึ่งฟาราเดย์เท่ากับผลคูณของประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนกับจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งโมล ซึ่ง $F = q_e N_A$ ดังนั้น เมื่อแทนค่าในสมการ (2.9) จะได้

$$\lambda_e = \frac{A_w}{zF} \quad (2.9)$$

โดยที่ A_w คือ น้ำหนักอะตอม หน่วย กรัมต่อโมล

z คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเท

F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ หน่วย คูลอมบ์ต่อ โมล (C/mol, A.s/mol, J/mol.V)

ซึ่ง $F = q_e N_A = 96,487$ คูลอมบ์ต่อ โมล

q_e คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน เท่ากับ 1.6022×10^{-19} หน่วย คูลอมบ์ต่อ
หนึ่งอิเล็กตรอน

N_A คือ อิเล็กตรอนจำนวนหนึ่ง โมล หรือ Avogadro's number เท่ากับ
 6.02213×10^{23} หน่วย ไอออนต่อ โมล

เมื่อแทนค่า λ_e จากสมการที่ (2.9) ลงในสมการที่ (2.7) จะได้น้ำหนักของโลหะที่ได้
ตามทฤษฎี ดังแสดงในสมการ (2.10) และ (2.11)

$$W_{th} = \frac{ItA_w}{zF} \quad (2.10)$$

$$W_{th} = \frac{QA_w}{zF} \quad (2.11)$$

2.4.3 น้ำหนักจริงของโลหะที่ขั้วแคโทด, ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าและพื้นที่ผิวรวมที่ แคโทดของอิเล็กโตรรีไฟนิ่งของอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง

โดยทั่วไปการดำเนินการของกระบวนการอิเล็กโตรวินนิ่งหรืออิเล็กโตรรีไฟนิ่ง
เกิดขึ้นไม่เต็ม 100 % ทั้งนี้ เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดการสูญเสียของการใช้ไฟฟ้า หรืออาจมี
สิ่งเจือปนผสมอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ เป็นต้น ดังนั้น กฎของฟาราเดย์ที่เกี่ยวกับ
อิเล็กโตรไลซิสตามสมการที่ (2.10) นั้น จึงต้องประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ
ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเกิดแก๊สไฮโดรเจน หรือการเกาะของสารมลทิน (Impurity) ที่ขั้วแคโทดเอง ดังนั้น น้ำหนักจริงของโลหะที่ขั้วแคโทด, ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า, พื้นที่ผิวรวมที่แคโทด สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการต่าง ๆ ดังนี้

$$W = \frac{\varepsilon I A_w t}{zF} = \frac{\varepsilon i A_s A_w t}{zF} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon = \frac{W}{W_{th}} = \frac{i}{i_{th}} < 1 \quad (2.13)$$

$$A_s = 2NA_c \quad (2.14)$$

- โดยที่ ε คือ ประสิทธิภาพการใช้กระแส
 I คือ กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์
 A_w คือ น้ำหนักอะตอม หรือ มวลโมเลกุล หน่วย กรัมต่อ โมล
 t คือ เวลา หน่วย วินาที
 z คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเท
 F คือ 96,487 C/mol (A.s/mol, J/mol.V)
 A_s คือ พื้นที่ผิวรวมที่แคโทด หน่วย ตารางเซนติเมตร
 A_c คือ พื้นที่ผิวที่แคโทด หน่วย ตารางเซนติเมตร
 N คือ เลขของแคโทด

2.4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง

ตามปกติแล้วความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency : ε^*) มีค่าน้อยกว่า 100 % อาจมีสาเหตุมาจากศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานของอิเล็กโตรไลต์ในเซลล์ (Ohmic Potential Drop หรือ IR Drop) และปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจน โดยประสิทธิภาพการใช้พลังงานสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.15) ดังนี้

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon E_{cell}}{E_{applied}} < 1 \quad (2.15)$$

โดยที่ $E_{applied}$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้

โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มาจากผลรวมของค่าศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโตรด (Electrode Potential) และค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกินพอดิ (Overpotential) มาจากผลของศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมในเซลล์ จะได้

$$E_{applied} = E_a + E_c + E_{rev} + E_{IR} \quad (2.16)$$

เมื่อ E_a คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินกัมมันต์ (Activation Overpotential) เป็นศักย์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา โดยต้องให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อเอาชนะพลังงานก่อกัมมันต์ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้

E_c คือ ศักย์ไฟฟ้าโพลาไรเซชันความเข้มข้น (Concentration Polarization Potential) ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นทำให้ความเข้มข้นของสารที่ผิวขั้วไฟฟ้าต่ำกว่าความเข้มข้นในสารละลายส่วนใหญ่ (Bulk Solution) ทำให้ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เท่าเดิม

E_{rev} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ต้องใช้เพื่อดันศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกซึ่งมีค่าเท่ากับ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่จุดสมดุล (Reversible Cell Potential) จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับที่วัดได้จากเทคนิคโพเทนชิอเมตรี

E_{IR} คือ ศักย์ที่ตกคร่อมความต้านทานของอิเล็กโตรไลต์ในเซลล์ (Ohmic Drop) ความต้านทานหรือความนำไฟฟ้าของเซลล์วัดได้โดยเทคนิคการวัดความนำไฟฟ้า

เช่นเดียวกันค่าศักย์ไฟฟ้า (E) สามารถหาได้จาก

$$E = \frac{IL\rho_x}{A_s} = iL\rho_x \quad (2.17)$$

โดยที่ ρ_x คือ ความต้านทานของสารละลาย หน่วย โอห์ม-เซนติเมตร (ohm.cm)

L คือ ระยะห่างระหว่างแอโนดและแคโทด หน่วย เซนติเมตร

จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สามารถประยุกต์กับค่าความต้านทานของสารละลายสรุปจากสมการที่ (2.17) ได้ดังนี้

$$R_s = \frac{E}{I} = \frac{L\rho_x}{A_s} \quad (2.18)$$

2.4.5 อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์และการสิ้นเปลืองพลังงานสำหรับอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง

ตัวแปรที่มีสำคัญเพิ่มเติมในการบ่งบอกประสิทธิภาพของอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง คือ อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ (Production Rate) สามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_R = \frac{dW}{dt} = \frac{\epsilon i A_s A_w}{zF} \quad (2.19)$$

ในเชิงเศรษฐศาสตร์ ตัวแปรที่นำมาคำนวณคือกำลังไฟฟ้า (Power) และการสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy Consumption) ที่ใช้ในการดำเนินการผลิต สามารถหาได้จากสมการ ที่ (2.20) และ (2.21) ตามลำดับ

$$P = EI \quad (2.20)$$

$$\gamma = \frac{P}{P_R} = \frac{zFE}{A_w \epsilon} \quad (2.21)$$

หน่วยที่ใช้สำหรับค่ากำลังไฟฟ้า (P) คือ กิโลวัตต์ (kW) และสำหรับค่าการสิ้นเปลืองพลังงาน (γ) คือ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (kWh/kg)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Seong, H.S. และคณะ (2015) ได้ศึกษากระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่งโลหะดีบุกจากขยะอิเล็กโทรนิกส์โดยใช้สารละลายที่เป็นกรด ซึ่งชนิดและความเข้มข้นของกรดที่เลือกใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid : H_2SO_4), กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid : HCl) และกรดมีเทนซัลโฟนิก (Methansulfonic Acid : CH_3SO_3H) ความเข้มข้น 2 M และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระหว่าง 3-5 A/dm² จากการทดลองพบว่าในสถานะที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟูริกและกรดมีเทนซัลโฟนิก ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 A/dm² ส่งผลให้

ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้ามีค่าร้อยละ 84.7 และ 84.3 ตามลำดับ ความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกกลายเป็น 99.322 และ 99.914 wt% ตามลำดับ (จากเดิมที่แอนโนดเท่ากับ 93.902 wt%) แต่เปรียบเทียบกับในสถานะที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดไฮโดรคลอริกและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงถึง 5 A/dm² ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพียงร้อยละ 65 ความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด มีค่า 99.985 wt%

López F.A. และคณะ (2015) ได้ศึกษาการนำโลหะดีบุกกลับมาใหม่จากตะกรันที่ได้จากการบัดกรีแบบคลื่น (Wave Soldering) จากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) โดยวัตถุดิบตั้งต้น ประกอบด้วยส่วนผสมทางเคมีของโลหะดีบุก 95.9 wt%, โลหะเงิน 2.9 wt% และโลหะทองแดง 0.79 wt% ซึ่งใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ระหว่าง 54.5-109.1 A/m² สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลองคือ ดีบุกซัลเฟต (Tin (II) Sulfate : SnSO₄) และกรดซัลฟูริก จากการทดลองอัตราการเกาะของดีบุกเกิดขึ้นในช่วง 0.44-2.15 กรัมต่อชั่วโมง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระหว่าง 54.5-109.1 A/m² ตามลำดับ โดยส่วนผสมทางเคมีของโลหะดีบุกที่ได้เท่ากับ 99.96 wt% และปริมาณโลหะที่อยู่ในตะกอนแอนโนด ประกอบด้วยส่วนผสมทางเคมีของโลหะดีบุก 41.1 wt%, โลหะเงิน 34.2 wt% และโลหะทองแดง 9.1 wt%



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

รายละเอียดในการดำเนินการวิจัย แบ่งเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

- 1) วัตถุประสงค์ วัสดุและสารเคมี
- 2) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง
- 3) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี
- 4) ขั้นตอนการศึกษาวิจัย
- 5) สภาวะการทดลอง

3.1 วัตถุประสงค์ วัสดุและสารเคมี

วัตถุประสงค์ วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

3.1.1 วัสดุที่ใช้สำหรับทำเป็นแผ่นแอโนด

นำของเสียประเภทเศษบัดกรี 2 ชนิด คือ SnCu และ SnAgCu ดังแสดงในรูป 3.1 มาหล่อเป็นแผ่นแอโนด โดยส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค OES ของแผ่นแอโนดทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เศษบัดกรี

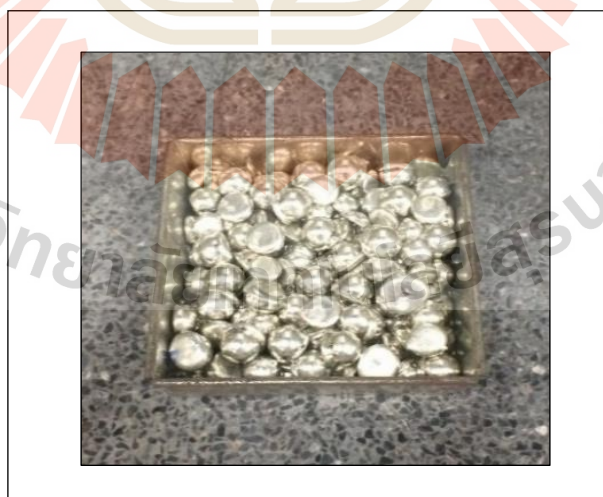
จากตารางพบว่าเศษบัดกรีชนิด SnCu ประกอบด้วยดีบุก 99.3 wt% เงิน 0.108 wt% และทองแดง 0.485 wt% เศษบัดกรีชนิด SnAgCu ประกอบด้วยดีบุก 96.5 wt% เงิน 2.85 wt% ทองแดง 0.471 wt% และเศษบัดกรีทั้ง 2 ชนิด ยังมีโลหะอื่น ๆ ผสมอยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเศษบัดกรี

ธาตุ	เศษบัดกรี (wt%)	
	ชนิด SnCu	ชนิด SnAgCu
Sn	99.3	96.5
Ag	0.108	2.85
Cu	0.485	0.471
Pb	0.0306	0.0108
Bi	0.0102	0.0018
Ni	0.0172	0.0148
Sb	0.0068	0.0049

3.1.2 วัตถุดิบที่ใช้สำหรับทำเป็นแผ่นแคโทด

วัตถุดิบที่ใช้ทำแผ่นแคโทด คือ โลหะดีบุกบริสุทธิ์ 99.99 wt% ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เม็ดดีบุกบริสุทธิ์

3.1.3 สารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายของกรดซัลฟูริกกับน้ำดีไอ (Deionized Water) โดยผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความเข้มข้นในหน่วยโมลาริตี (Molarity : M) หรือ โมลต่อลิตร (mol/L)



รูปที่ 3.3 กรดซัลฟูริก

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยโดยเรียงลำดับตามขั้นตอนการทดลอง มีดังนี้

3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักวัตถุบดตั้งต้น, แผ่นเอโนด, แผ่นแคโทด และผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการทดลอง



รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.2.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง

เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเผาและหลอมโลหะ โดยใช้ขดลวดให้ความร้อน (Heating Element) เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นความร้อน จึงปราศจากสิ่งเจือปนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.5 เตาเผาอุณหภูมิสูง

3.2.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Power Supply) เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ โดยจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current : AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบลิเนียร์ (Linear Power Supply) และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซิ่ง (Switching Power Supply)



รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.2.4 เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก

เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) ทำหน้าที่ในการหมุนเวียนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระหว่างเตรียมสารละลายและระหว่างทำการทดลองอิเล็กโทรรีไฟนิ่งตามสภาวะที่กำหนด โดยใช้หลักการทำงานของมอเตอร์เป็นตัวสร้างความเร็วรอบของแม่เหล็ก และใช้ความร้อนจากแผ่นให้ความร้อนจะทำจากเซรามิก เพื่อป้องกันสารเคมี โดยเครื่องสามารถกำหนดอุณหภูมิและความเร็วรอบได้จากปุ่มที่ตัวเครื่อง



รูปที่ 3.7 เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก

3.2.5 เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Volt Meter) เป็นอุปกรณ์ใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าชนิดกระแสตรง ขณะทำการทดลอง



รูปที่ 3.8 โวลต์มิเตอร์

3.2.6 แคลมป์มิเตอร์

แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) เป็นอุปกรณ์ใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Current Measurement) ขณะทำการทดลอง



รูปที่ 3.9 แคลมป์มิเตอร์

3.2.7 ชุดกรองสารละลาย

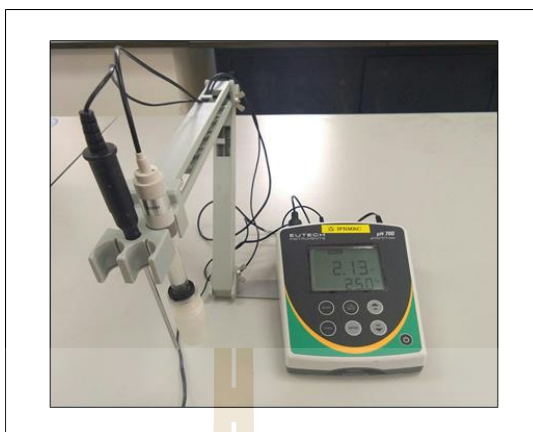
ชุดกรองสารละลายใช้สำหรับกรองแยกสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับตะกอนแอโนดที่หลุดจากแผ่นแอโนดภายหลังเสร็จสิ้นการทดลอง โดยประกอบด้วย กรวยบุชเนอร์ (Buchner Funnel) เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับกรองสารแบบลดความดัน สามารถกรองได้รวดเร็วกว่าการกรองแบบธรรมดา โดยใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นที่เกี่ยวข้องคือ กระดาษกรอง (Filter Paper) ขวดลดความดัน (Suction Flask) และ เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum Pump) ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชุดกรองสารละลาย

3.2.8 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) โดย pH ย่อมาจาก Potential of Hydrogen Ion เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด-ด่าง ของสารเคมีจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน (H^+) เป็นเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ อิเล็กโทรด (Electrode) และ เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Volt Meter) เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ให้เป็นค่า pH โดยต้องมีการปรับเทียบมาตรฐาน (Calibration) ก่อนการใช้งาน โดยจะปรับเทียบกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Buffer Solution) โดยการปรับที่เลือกใช้ คือระบบ Three-Point Calibration ซึ่งจะปรับช่วง pH ที่ต้องการวัดด้วยสารบัฟเฟอร์ 3 ค่า ได้แก่ pH 4, 7 และ 10 ที่มีค่าครอบคลุมในช่วงที่ต้องการวัด ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุด



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง

3.2.9 ชุดอุปกรณ์สำหรับเซลล์อิเล็กโตรรีไฟนิ่ง

ชุดอุปกรณ์สำหรับทำเป็นเซลล์อิเล็กโตรรีไฟนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ประกอบด้วย

- บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ
- แท่งทองแดง (Copper Bar) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 2 แท่ง
- ลวดทองแดง (Copper Wire) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 cm จำนวน 2 เส้น
- สายไฟ (Electric Wire) จำนวน 2 เส้น



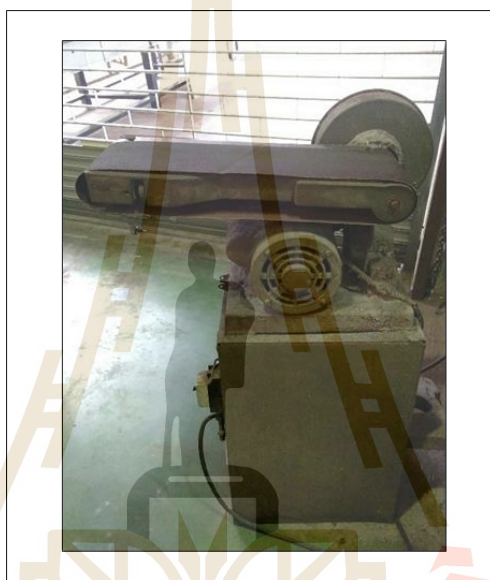
รูปที่ 3.12 ชุดอุปกรณ์สำหรับประกอบเป็นเซลล์อิเล็กโตรรีไฟนิ่ง

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี มีดังนี้

3.3.1 เครื่องจักรกระดาษทรายแบบสายพาน

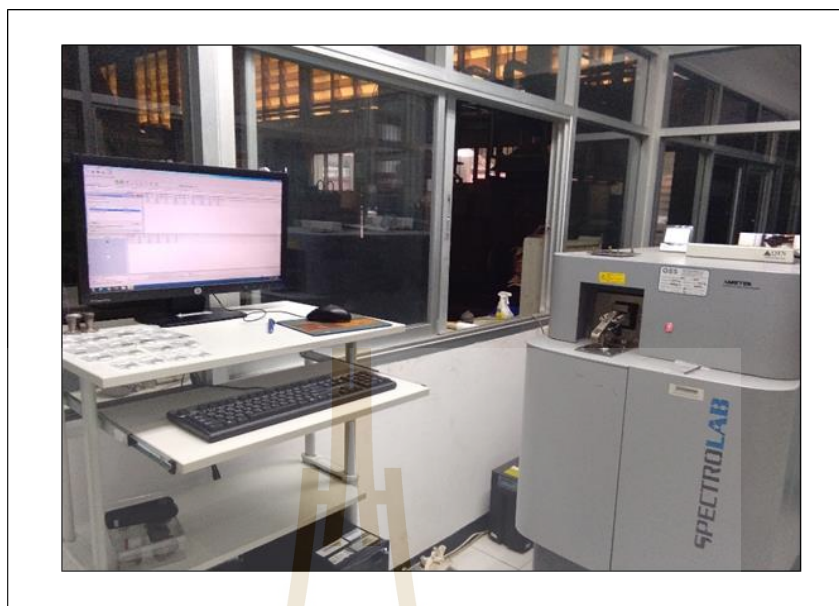
เครื่องจักรกระดาษทรายแบบสายพาน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ใช้สำหรับปรับระนาบชิ้นงานตัวอย่าง โดยขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 แต่ไม่ใช้น้ำในการขัดเพื่อไม่ให้ความชื้นในขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องมือทดสอบ Optical Emission Spectrometer



รูปที่ 3.13 เครื่องจักรกระดาษทรายแบบสายพาน

3.3.2 Optical Emission Spectrometer

Optical Emission Spectrometer (OES) เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการที่ทำให้สารที่จะวิเคราะห์เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นด้วยการสปาร์ค (Spark) เมื่อสารเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะถูกกระตุ้นกลับสู่สถานะพื้นจะปลดปล่อยแสงเส้นสเปกตรัม (Spectrum Line) ออกมา ซึ่งความเข้มของเส้นสเปกตรัมที่ปลดปล่อยออกมาจะบอกถึงปริมาณของสารนั้น ๆ Optical Emission Spectroscopy ที่ใช้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 Optical Emission Spectrometer

3.3.3 X-Ray Fluorescence Spectroscopy

X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ซึ่งเป็นส่วนผสมทางเคมีของชิ้นตัวอย่าง โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายหรือฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ออกมานั้น ใช้เครื่องตรวจจับ (Detector) วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่างซึ่งจะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้น ๆ ข้อมูลนี้จึงนำมาวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุได้ ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจวัดแบบสถานะของแข็ง (Solid-State) เหมาะสำหรับการตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si (Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิในโตรเจนเหลว X-Ray Fluorescence Spectrometer ที่ใช้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 X-ray Fluorescence Spectroscopy

3.3.4 Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectroscopy

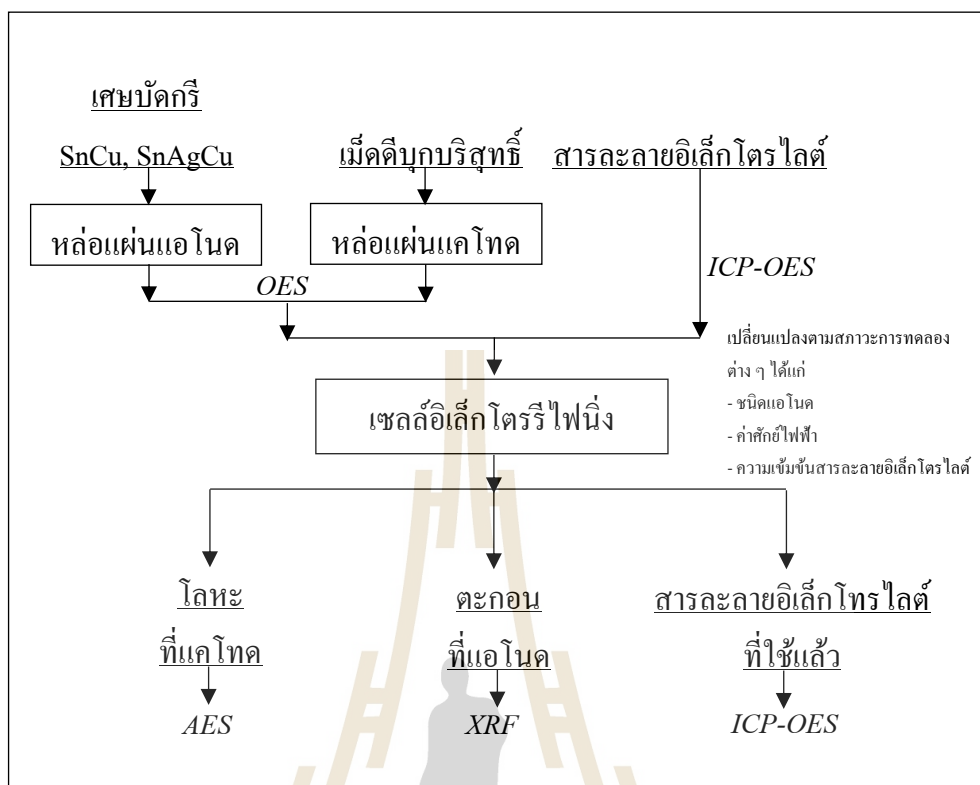
Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ พร้อมกันหลายชนิด อาศัยพลังงานจากพลาสมาเหนี่ยวนำคู่ควบ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า $10,000^{\circ}\text{C}$ ทำให้อะตอมของธาตุต่าง ๆ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (Ground State) มาอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited State) ซึ่งไม่เสถียร ทั้งนี้ เมื่ออะตอมของธาตุมีการลดระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นกลับมายังสถานะพื้น อะตอมของธาตุจะปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งในแต่ละธาตุมีความยาวคลื่นของพลังงานที่ปล่อยออกมาเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว และมีความเข้ม (Intensity) ที่เป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับความเข้มข้นของธาตุนั้นในตัวอย่างสารละลาย ทั้งนี้การวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับธาตุต่าง ๆ (Quantitative Analysis) ทำได้โดยการเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานของธาตุต่าง ๆ (Standard Solution) ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน โดย Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectroscopy ที่ใช้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectroscopy

3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

การดำเนินการวิจัย แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมแผ่นอิเล็กโทรดและการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้นตอนที่ 2 การติดตั้งเซลล์และทดลอง โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ตามที่กำหนด ได้แก่ ชนิดแอนโนด, ค่าศักย์ไฟฟ้า, ความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งแผนการดำเนินการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการวิจัย

รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการทดลองมีดังนี้

1. การเตรียมแผ่นอิเล็กโทรดและการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1.1) นำเศษบัดกรีและเม็ดดีบุกบริสุทธิ์มาหลอมและหล่อเพื่อผลิตเป็นแผ่นอะโนดและแคโทดตามลำดับ โดยนำวัตถุทั้งสองมาหลอมในเตาที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเทน้ำโลหะลงแม่พิมพ์เหล็กแล้วปล่อยให้เย็นตัว เมื่อน้ำโลหะแข็งตัวแล้วจะนำออกมาจากแบบหล่อและตัดให้มีขนาด $5.5 \times 5 \text{ cm}$ เจาะรูที่ปลายด้านบนของแผ่นอิเล็กโทรดเพื่อที่จะร้อยลวดทองแดงระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดกับแท่งทองแดง (บัสบาร์) จากนั้นนำมาจัดปรับระนาบผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320 และ 600 ตามลำดับ

1.2) นำแผ่นอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นอะโนดชนิด SnCu, ชนิด SnAgCu และแผ่นแคโทด มาวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย OES และนำมาชั่งน้ำหนักก่อนเริ่มกระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง

1.3) เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยการผสมกรดซัลฟูริกและน้ำดีไอ เพื่อให้ได้ความเข้มข้น 1.5, 2.0 และ 2.5 M จากนั้นติดตั้งเซลล์โดยให้ทั้งแอโนดและแคโทดทำมาจากโลหะดีบุกบริสุทธิ์ โดยให้แผ่นอะโนดต่อกับขั้วบวกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และแผ่นแคโทดต่อ

กับขั้วลบจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง กำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0.6 V และปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์ เพื่อที่จะทำให้ไอออนดีบุกละลายลงไปในสารละลายกรดซัลฟูริก กลายเป็นสารละลายดีบุกซัลเฟตเกิดขึ้น เวลาที่ใช้ในการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีระยะเวลา 24 ชั่วโมง

1.4) นำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากขั้นตอนที่ 1.3) ไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย ICP-OES ก่อนทำการทดลองด้วยวิธีอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง

2. ขั้นตอนของอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง มีดังนี้

2.1) ติดตั้งเซลล์อิเล็กโทรรีไฟนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยเชื่อมแผ่นแอนโนด (หมายเลข 2) กับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (หมายเลข 1) และแผ่นแคโทด (หมายเลข 3) เข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า กำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นแอนโนดและแคโทดเท่ากับ 5 cm

2.2) เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จัดเตรียมไว้ลงบีกเกอร์ (หมายเลข 4) โดยในระหว่างการทดลองจะกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที (หมายเลข 5) ทั้งนี้ในระหว่างการทดลองได้วัดความเป็นกรดด่างของสารละลายทุก ๆ 6 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวัด pH

2.3) จ่ายไฟฟ้าให้กับเซลล์โดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าตามสภาวะการทดลองที่กำหนดไว้คือ 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้โวลต์มิเตอร์ (หมายเลข 7) และวัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เซลล์ด้วยแอมป์มิเตอร์ (หมายเลข 8)

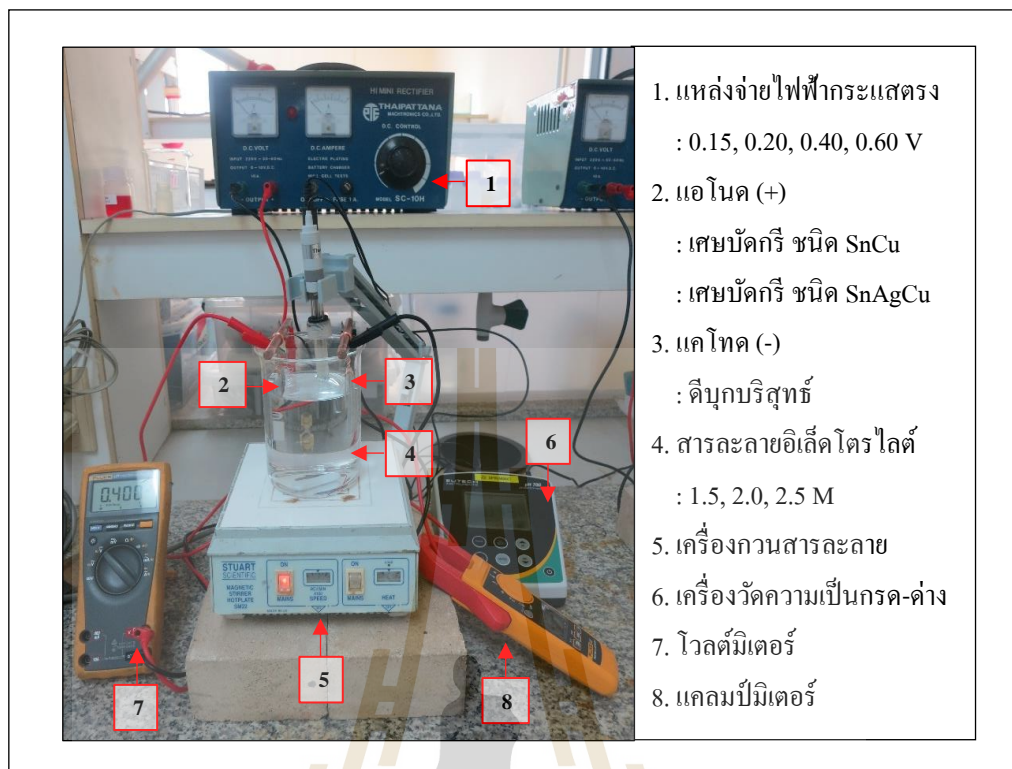
3. การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นตัวอย่าง

เครื่องมือวิเคราะห์ชิ้นตัวอย่างจากการทดลอง มีดังนี้

3.1) แผ่นแคโทดที่ได้จากการทดลองได้นำไปล้างด้วยน้ำดีไอ อบให้แห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 350 °C และเทลงแบบให้เป็นก้อนที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วย OES

3.2) แผ่นแอนโนดหลังสิ้นสุดการทดลองมีลักษณะพรุณหรือเล็กกลง เนื่องจากเนื้อโลหะบางส่วนละลายลงไปในสารละลาย และบางส่วนเกิดเป็นตะกอนเกาะที่แอนโนดและตกลงในก้นบีกเกอร์ได้ ตะกอนนี้ได้นำไปล้างด้วยน้ำดีไอ ทำให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก และนำไปวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมีด้วย XRF

3.3) เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาวิเคราะห์ด้วย ICP-OES



รูปที่ 3.18 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้านิ่ง

3.5 สถานะการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้านิ่ง เมื่อใช้แอโนดต่างชนิดกัน โดยสถานะการทดลองต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองต่าง ๆ

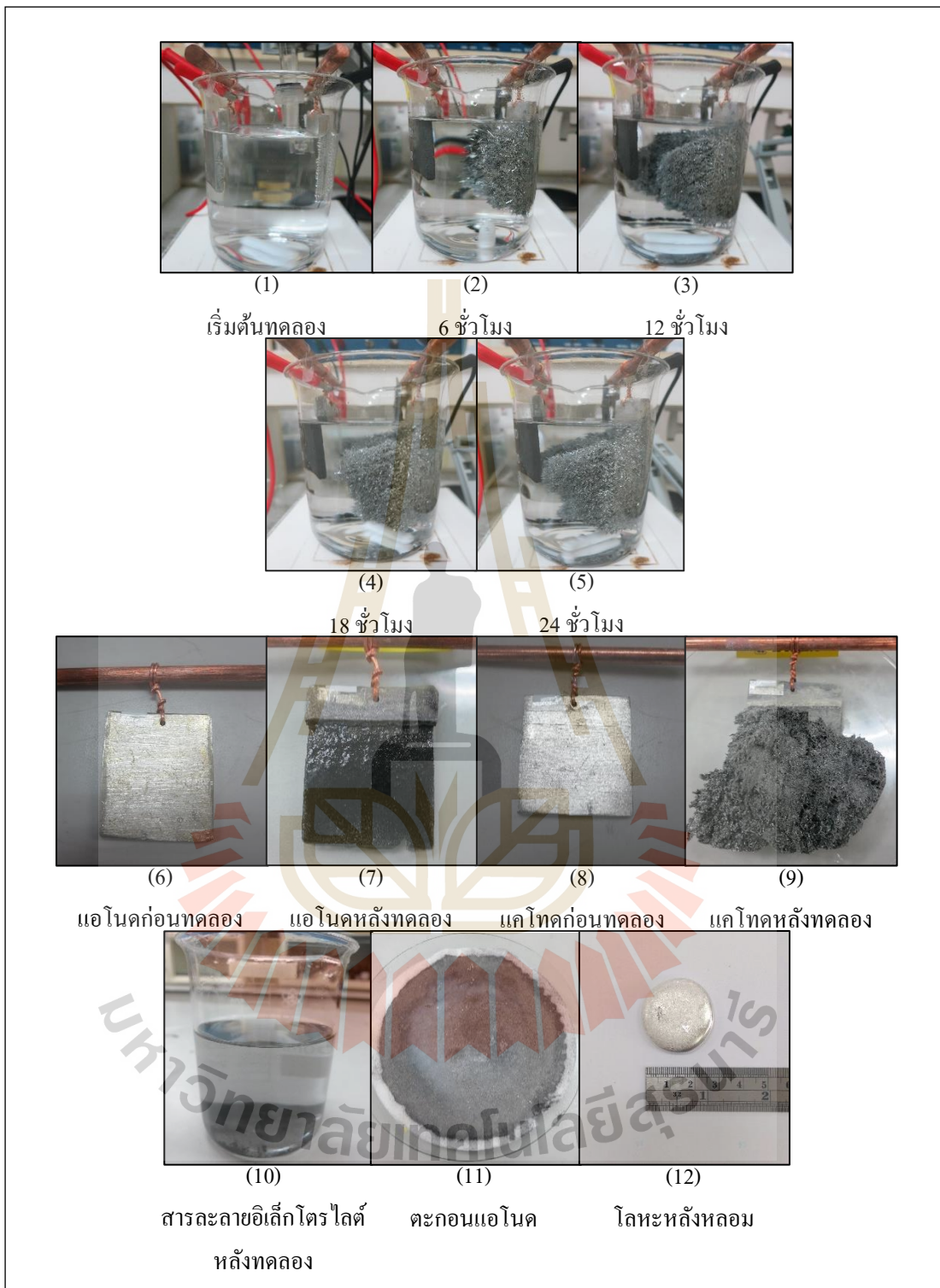
สภาวะที่	ความเข้มข้น สารละลายกรดซัลฟูริก (M)	ชนิดแอโนด	ศักย์ไฟฟ้า (V)
1	1.5	SnCu	0.15
2			0.20
3			0.40
4			0.60
5		SnAgCu	0.15
6			0.20
7			0.40
8			0.60
9	2.0	SnCu	0.15
10			0.20
11			0.40
12			0.60
13		SnAgCu	0.15
14			0.20
15			0.40
16			0.60
17	2.5	SnCu	0.15
18			0.20
19			0.40
20			0.60
21		SnAgCu	0.15
22			0.20
23			0.40
24			0.60

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการอภิปรายผล

การทดลองอิเล็กโทรลิซิสไฟนิ่งแอโนด 2 ชนิด คือ SnCu และ SnAgCu โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1.5, 2.0 และ 2.5 M และปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V จัดให้ขั้วอิเล็กโทรดห่างกัน 5 cm และมีการสังเกตการณ์เซลล์ทุก ๆ 6 ชั่วโมงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจากการทดลองจะพิจารณาถึงโลหะที่เกาะที่แคโทด, การเกิดตะกอนแอโนด และการเปลี่ยนแปลงของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

โดยมีผลการทดลอง ดังนี้ รูปที่ 4.1 (1)-(5) แสดงถึงลักษณะการเกาะของโลหะที่แคโทด ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองในเวลา 24 ชั่วโมง รูปที่ 4.1 (6)-(9) แสดงถึงลักษณะแผ่นแอโนด และแคโทดก่อนและหลังการทดลอง รูปที่ 4.1 (10) แสดงลักษณะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ได้หลังการทดลอง ซึ่งได้นำไปหาปริมาณโลหะในสารละลายด้วย ICP-OES รูปที่ 4.1 (11) แสดงลักษณะตะกอนแอโนดที่ได้จากการกรองสารละลายอิเล็กโทรไลต์และการลอกแผ่นแอโนดหลังการทดลอง ซึ่งตะกอนนี้ได้ถูกนำไปล้างด้วยน้ำดีไอแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย XRF โลหะที่เกาะที่แคโทดได้ถูกนำไปล้างด้วยน้ำดีไอ จากนั้นเป่าให้แห้ง เสร็จแล้วนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 350 °C จากนั้นเทลงในแบบให้เป็นก้อนโลหะเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย OES ลักษณะของก้อนโลหะแสดงดังรูปที่ 4.1 (12) ในระหว่างการทดลองได้ตรวจวัดความเป็นกรดต่างของสารละลาย, ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์ทุก ๆ 6 ชั่วโมง ทั้งนี้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นค่าเฉลี่ยและได้นำไปใช้ในการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าและการสิ้นเปลืองพลังงาน

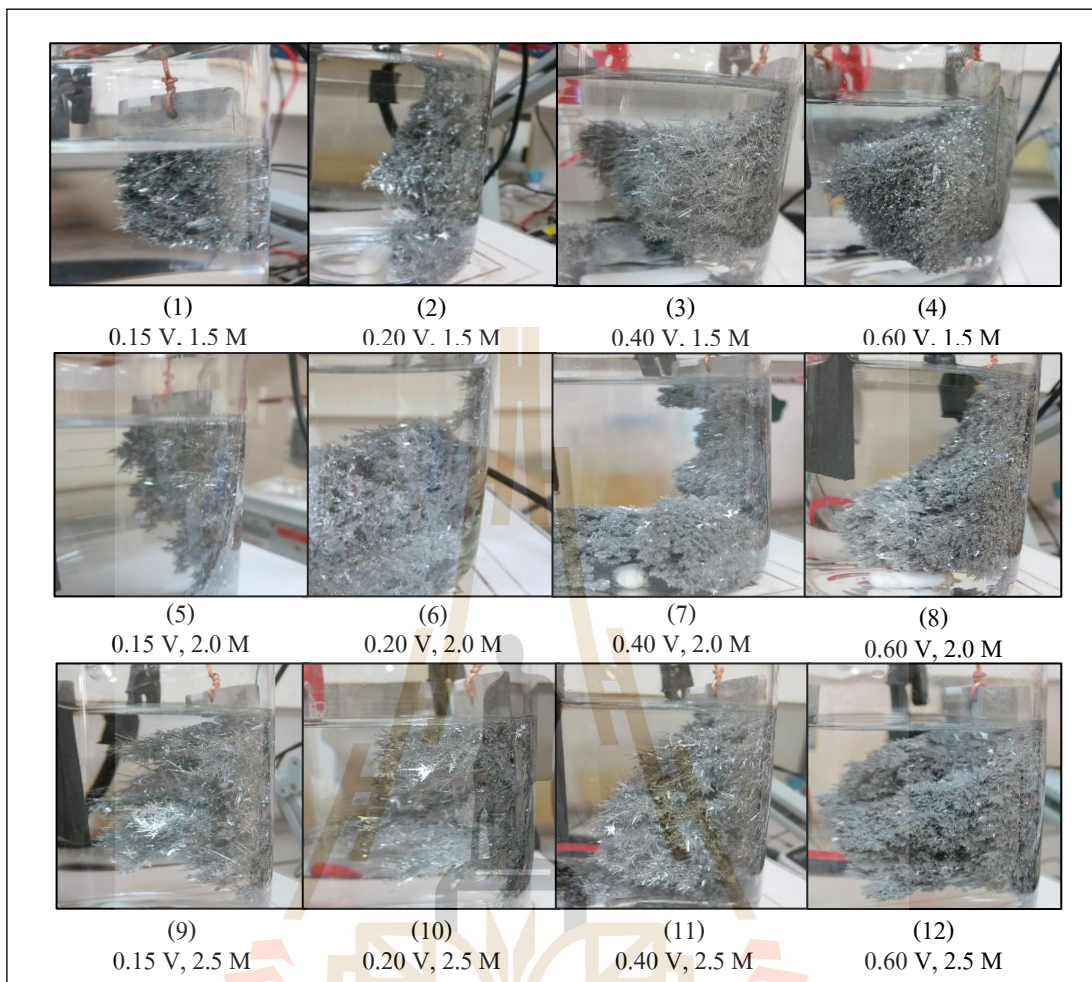


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงที่ขั้วแคโทดในระหว่างการทดลองและผลที่เกิดจากการทดลอง

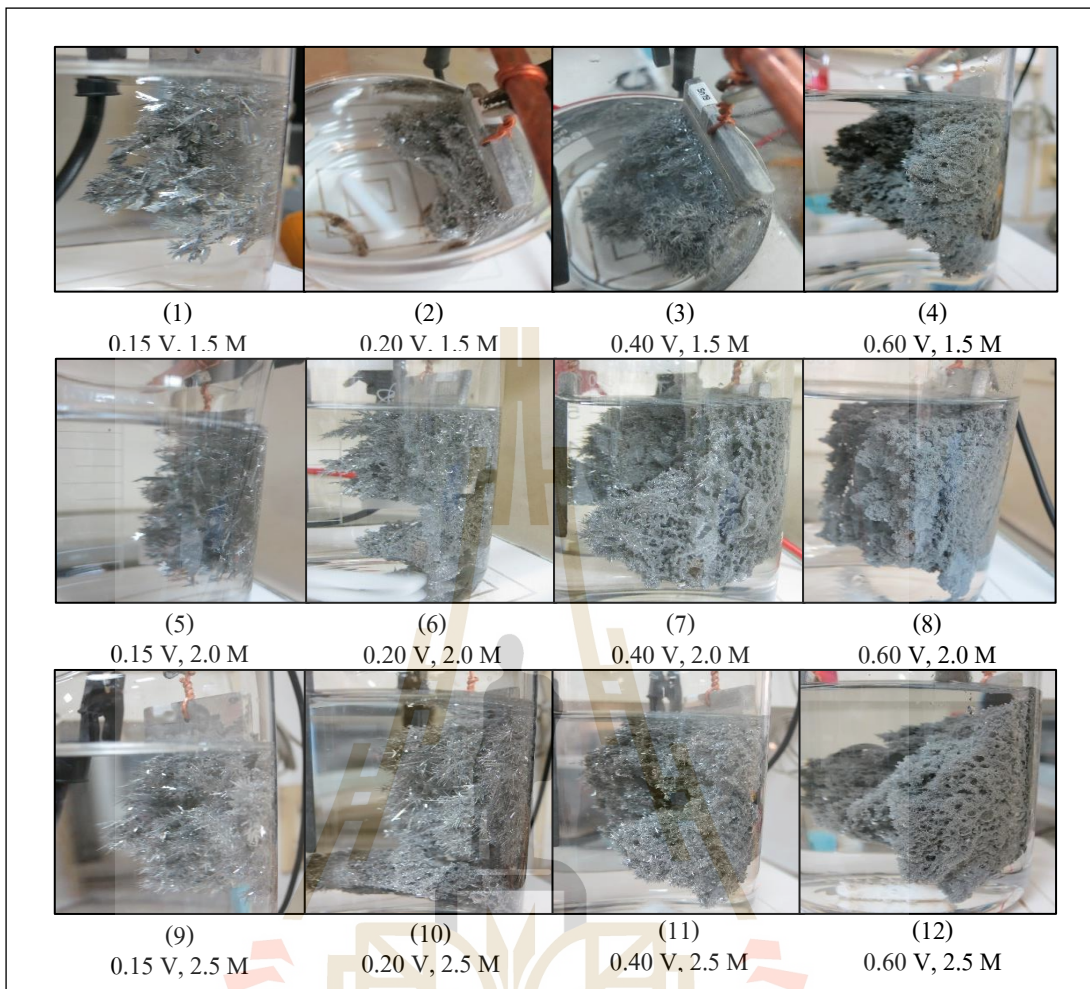
4.1 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็นค่าที่ใช้วัดความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวที่แคโทด โดยได้กำหนดพื้นที่ผิวจุ่มของแคโทดไว้ที่ 45 cm^2 ในทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งจากกฎของโอห์มอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความศักย์ไฟฟ้าได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำใด ๆ แปรผันโดยตรงกับศักย์ไฟฟ้า นั่นคือหากค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าย่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และการหาปริมาณโลหะที่ได้ตามทฤษฎีที่คำนวณจากกฎของฟาราเดย์นั้นมีตัวแปรของกระแสไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง

ดังนั้น สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงการเกาะตัวของโลหะที่แคโทดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnCu และรูปที่ 4.3 แสดงการเกาะตัวของโลหะที่แคโทดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnAgCu จากรูปดังกล่าวจะเห็นการเกาะตัวของโลหะที่แคโทดเพิ่มขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15 V ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 1.5 M การเกาะตัวของโลหะมีลักษณะคล้ายเดนไดรต์ (Dendrite) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเป็น 2.5 M และการก่อตัวโลหะเป็นทั้งแบบเดนไดรต์และเข็มแหลมยื่นออกมา ทั้งนี้ เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมาก การพาไอออนโลหะไปปรับอิเล็กตรอนที่แคโทดจะรวดเร็วตามไปด้วย แต่ถ้าหากปรับศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้น ลักษณะการเกาะตัวของโลหะจะมีลักษณะคล้ายเข็มแหลมเกือบทั้งหมด ทั้งนี้ เพราะการพาไอออนโลหะไปปรับอิเล็กตรอนที่แคโทดจะรวดเร็วมาก แม้ว่าความเข้มข้นแตกต่างกัน



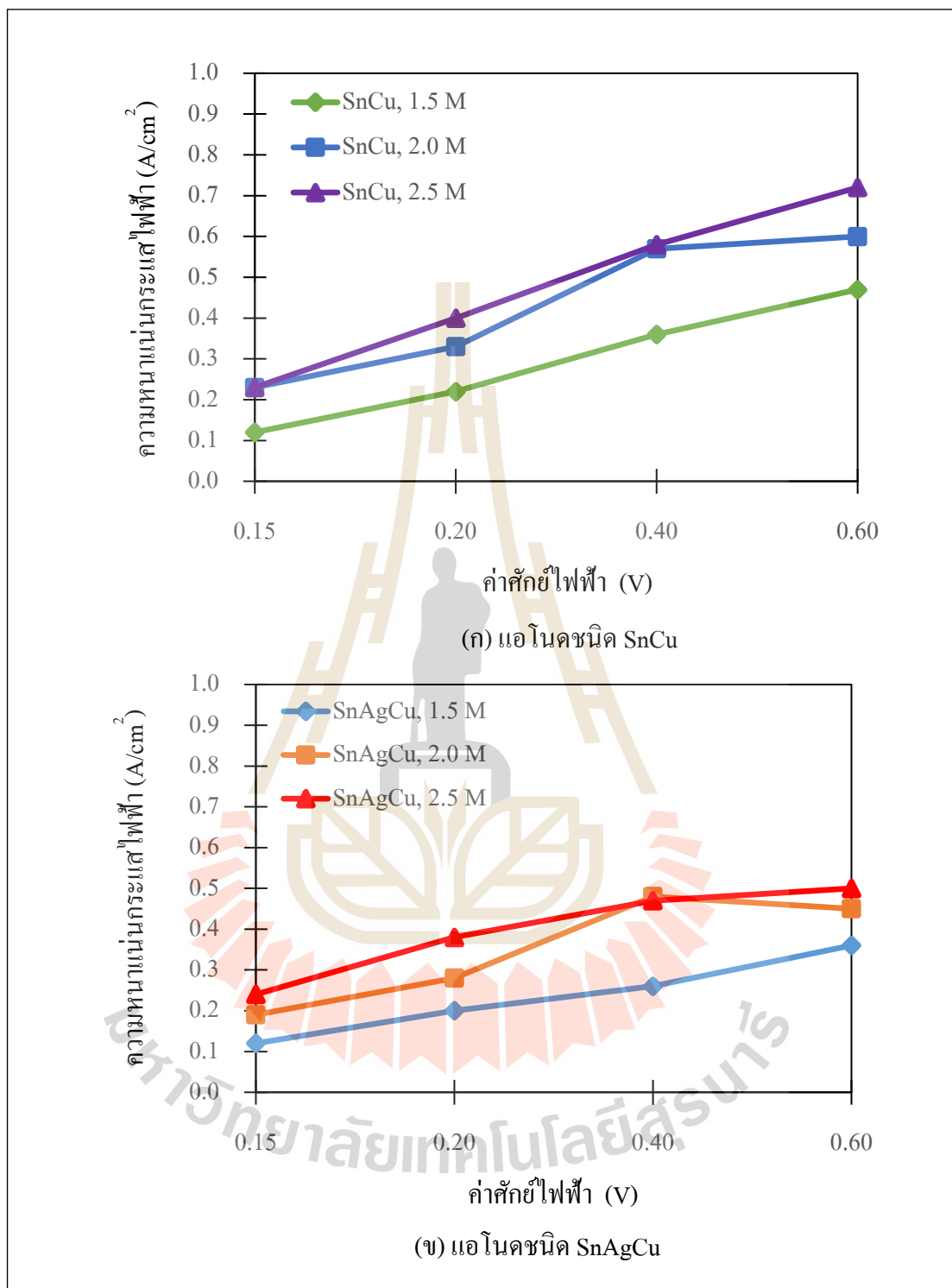
รูปที่ 4.2 การเกาะตัวของโลหะที่แคโทดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnCu



รูปที่ 4.3 การเกาะตัวของโลหะที่แคโทดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnAgCu

ผลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรรีไฟนิ่งเมื่อใช้อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ความหนาแน่นกระแสที่ได้อาจเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อเป็นแอโนดชนิด SnCu ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M ความหนาแน่นกระแสมีค่าเท่ากับ 0.23, 0.40, 0.58, 0.72 A/cm² ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ตามลำดับ

ขณะเดียวกัน เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเป็นแอโนดชนิด SnAgCu ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.20 V ความหนาแน่นกระแสมีค่าเท่ากับ 0.20, 0.28, 0.38 A/cm² ที่ความเข้มข้นของกรด 1.5, 2.0 และ 2.5 M ตามลำดับ

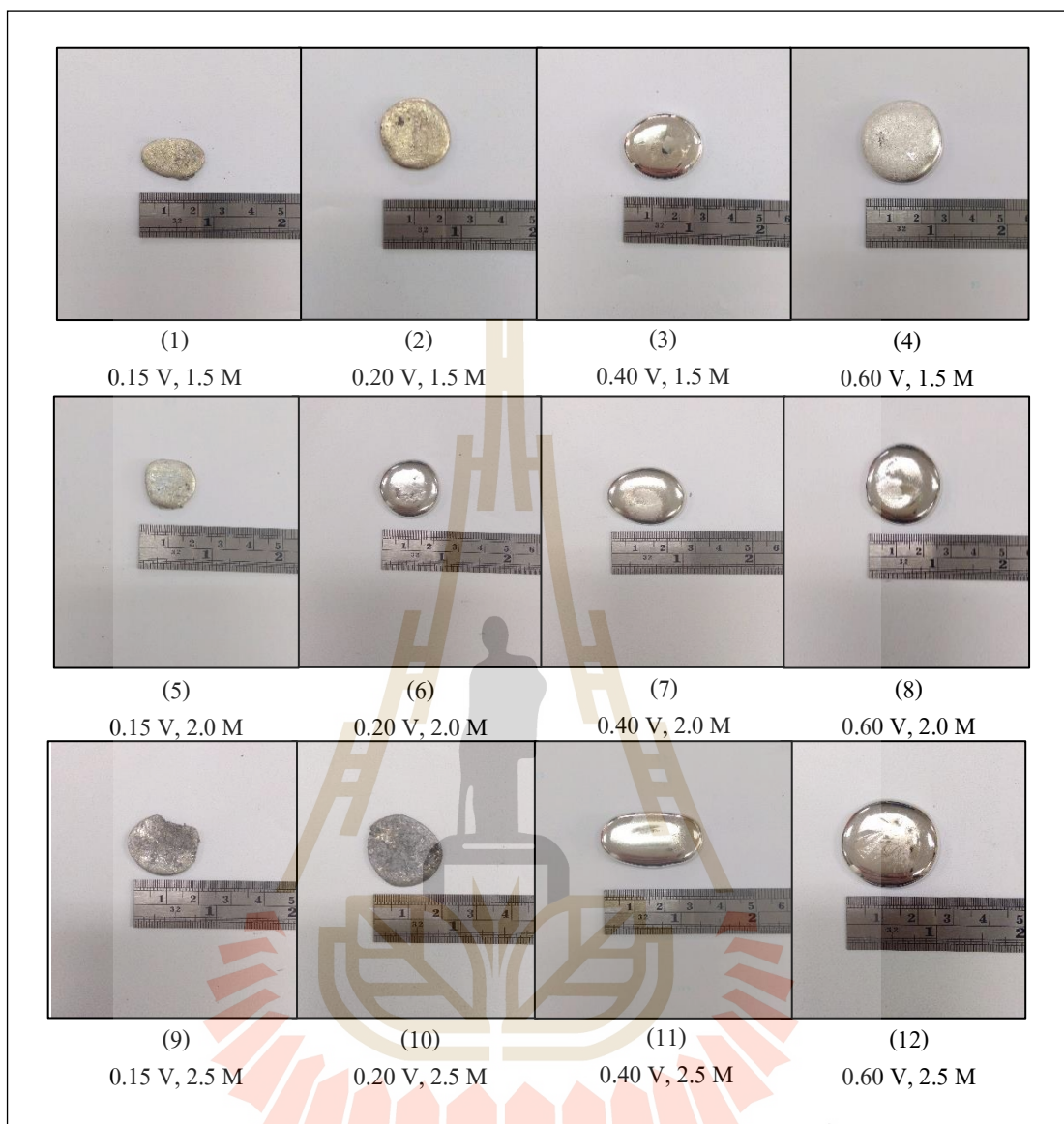


รูปที่ 4.4 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก) แอนโนดชนิด SnCu (ข) แอนโนดชนิด SnAgCu

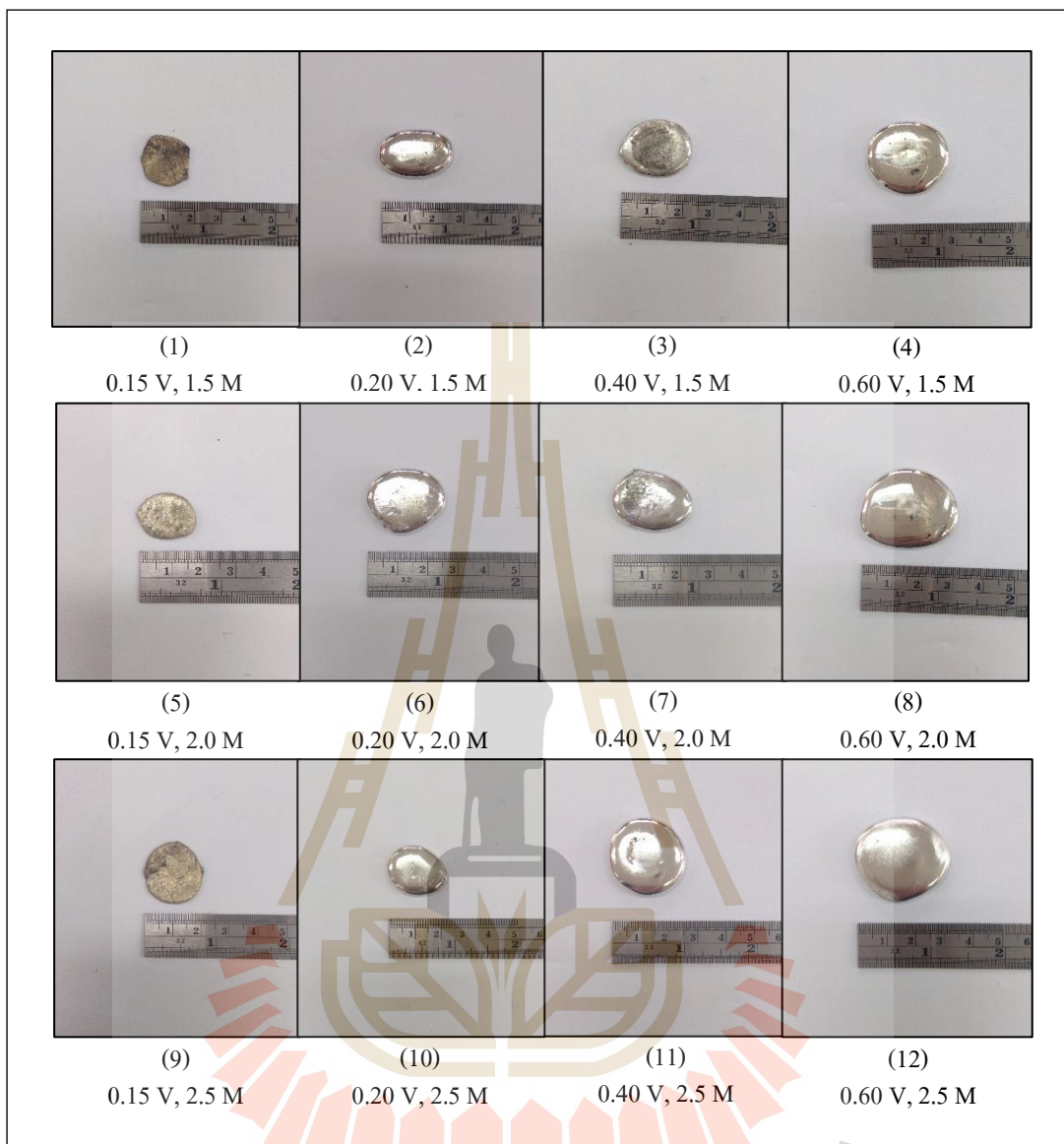
เมื่อพิจารณาการทดลองที่สภาวะเดียวกัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของแอโนดชนิด SnCu จะมากกว่าของแอโนดชนิด SnAgCu ยกตัวอย่างเช่น สภาวะเป็นแอโนดชนิด SnCu ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.12, 0.22, 0.36, 0.47 A/cm² ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ตามลำดับ ขณะที่แอโนดชนิด SnAgCu ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.12, 0.20, 0.26, 0.36 A/cm² ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ตามลำดับ เนื่องจาก ปริมาณของดีบุกในวัสดุตั้งต้นสำหรับแอโนดชนิด SnCu โดยมีปริมาณดีบุก 99.3 wt% ซึ่งมากกว่าแอโนดชนิด SnAgCu ที่มีปริมาณดีบุก 96.5 wt% นอกจากนี้แอโนดชนิด SnAgCu ยังมีตะกอนของเงินเกิดขึ้น ซึ่งจากตารางที่ 2.3 (บทที่ 2) ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของเงินมีค่าเท่ากับ +0.799 V หมายความว่าเงินสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดี หรือสูญเสียอิเล็กตรอนได้ยาก หากใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไม่มากพอ จึงทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสต่ำกว่าแอโนดชนิด SnCu

4.2 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า

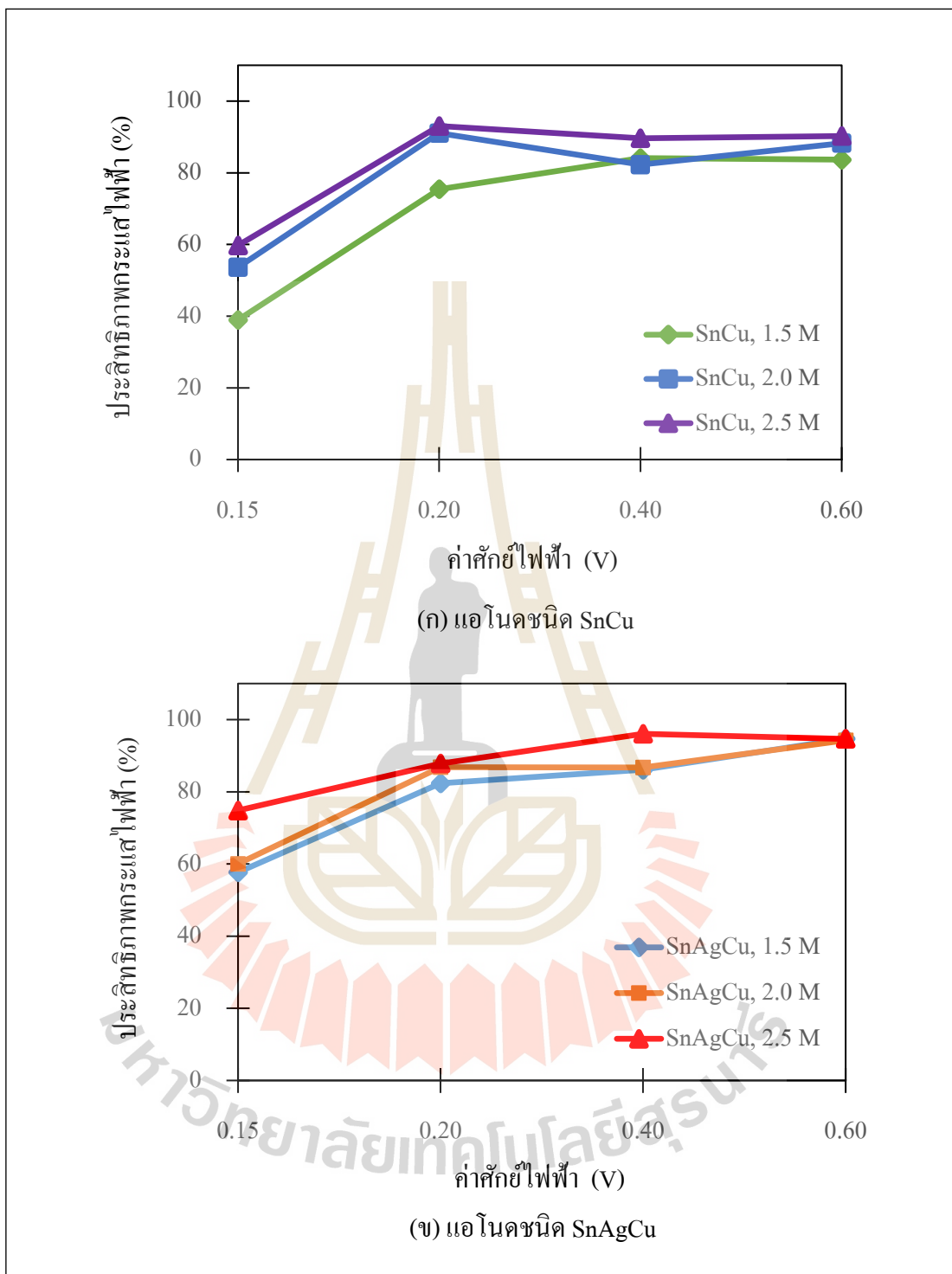
ตัวอย่างก้อน โลหะที่ได้จากการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.5 (เมื่อใช้แอโนดชนิด SnCu) และรูปที่ 4.6 (เมื่อใช้แอโนดชนิด SnAgCu) ซึ่งจากการทดลองพบว่าน้ำหนักของโลหะที่ได้มากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายกรดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ พบว่าน้ำหนักของโลหะที่ได้จากการใช้แอโนดชนิด SnCu มีค่ามากกว่าเมื่อใช้แอโนดชนิด SnAgCu



รูปที่ 4.5 ลักษณะก้อนโลหะที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ
เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnCu



รูปที่ 4.6 ลักษณะก้อนโลหะที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ
เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnAgCu



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า (ก) แอโนดชนิด SnCu (ข) แอโนดชนิด SnAgCu

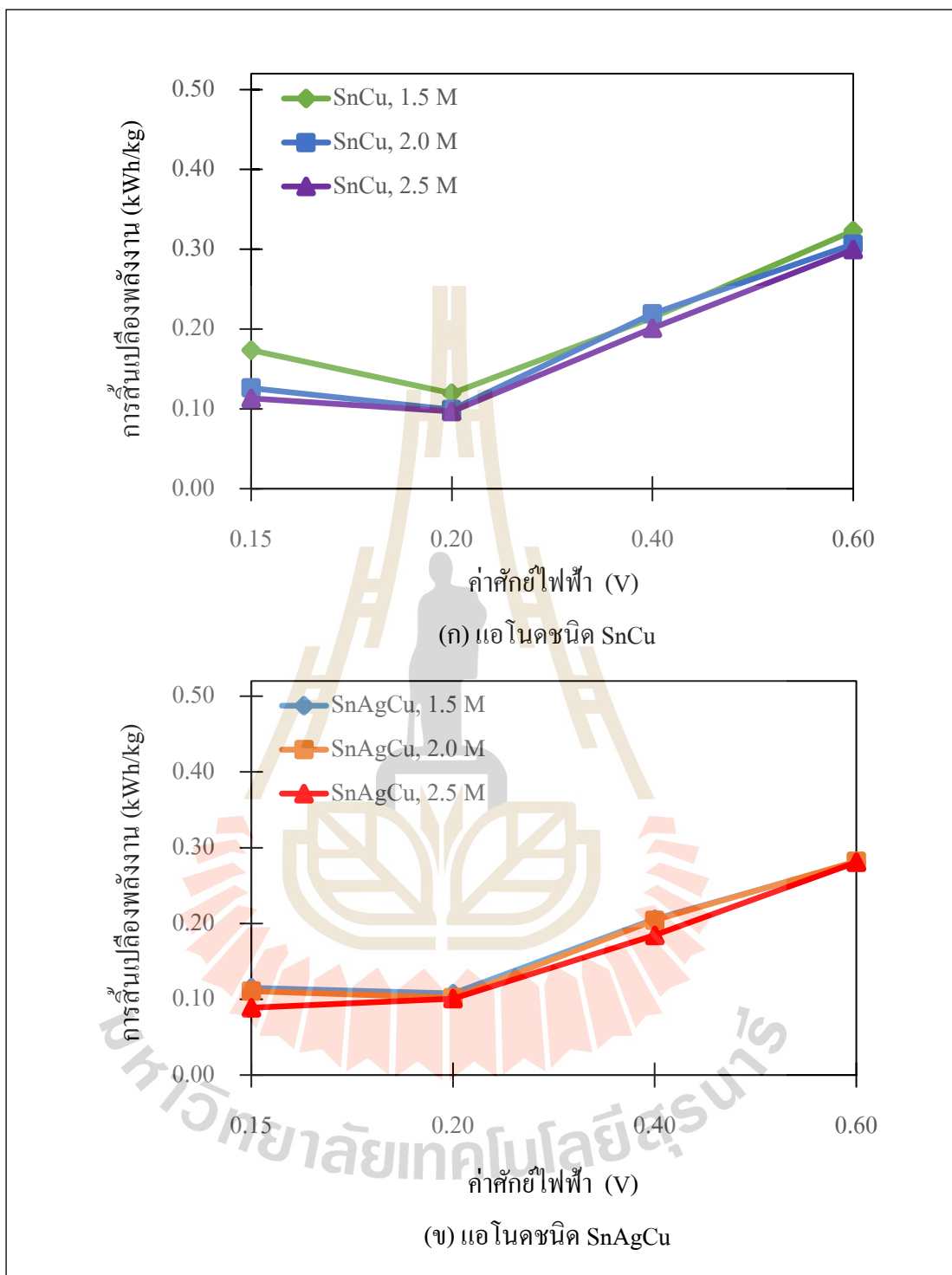
จากรูปที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สำหรับแอโนดชนิด SnCu ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 38.95, 75.42, 82.26, 83.67 ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในบางกรณี เช่น ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 2.0 และ 2.5 M ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลง ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.40 และ 0.60 V ทั้งนี้ จากการทดลองได้สังเกตเห็นว่าเกิดฟองของแก๊สไฮโดรเจนขึ้นที่ขั้วของแคโทด โดยที่ไฮโดรเจนไอออนมารับอิเล็กตรอนที่ขั้วของแคโทดกลายเป็นฟองของแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้น เมื่อทดลองที่ศักย์ไฟฟ้างดแล้วกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับความต่างศักย์ไฟฟ้าในส่วนนี้ด้วยเช่นกัน โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า H_2 Over Voltage มีผลทำให้โลหะที่ได้จริงนั้นมีน้ำหนักไม่มากเท่าที่ควร เมื่อนำมาคำนวณประสิทธิภาพกระแสจึงทำให้มีค่าลดลงจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0.20 V

เมื่อความเข้มข้นของกรดมากขึ้น ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น สำหรับแอโนดชนิด SnAgCu ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15 V ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 57.68, 60.04 และ 74.83 ที่ความเข้มข้นของกรด 1.5, 2.0 และ 2.5 M ตามลำดับ

ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับแอโนดทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ศักย์ไฟฟ้าที่ 0.15 V ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้ามีค่าร้อยละ 38.95-68.04 โดยเมื่อศักย์ไฟฟ้าเป็น 0.20-0.60 V ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 75.42-94.70 ยกตัวอย่างเช่น เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnCu ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 59.74, 93.05, 89.64 และ 90.25 ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ตามลำดับ และเมื่อเป็นแอโนดชนิด SnAgCu ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 74.83, 87.82, 96.06 และ 94.65 ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ตามลำดับ

4.3 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสิ้นเปลืองพลังงาน

การสิ้นเปลืองพลังงาน (γ) ในหน่วย กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (kWh/kg) เป็นตัวบอกกำลังไฟฟ้าที่ใช้เปรียบเทียบกับปริมาณโลหะที่ได้จริง จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ศักย์ไฟฟ้าที่ 0.20 V การสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าต่ำที่สุด ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้าที่ 0.20 V เกิดการละลายของไอออนของโลหะแล้วรับอิเล็กตรอนที่แคโทดได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ 0.15 V, 0.40 V และ 0.60 V ส่งผลต่อปริมาณโลหะที่ได้จริงมาก ทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าต่ำที่สุด



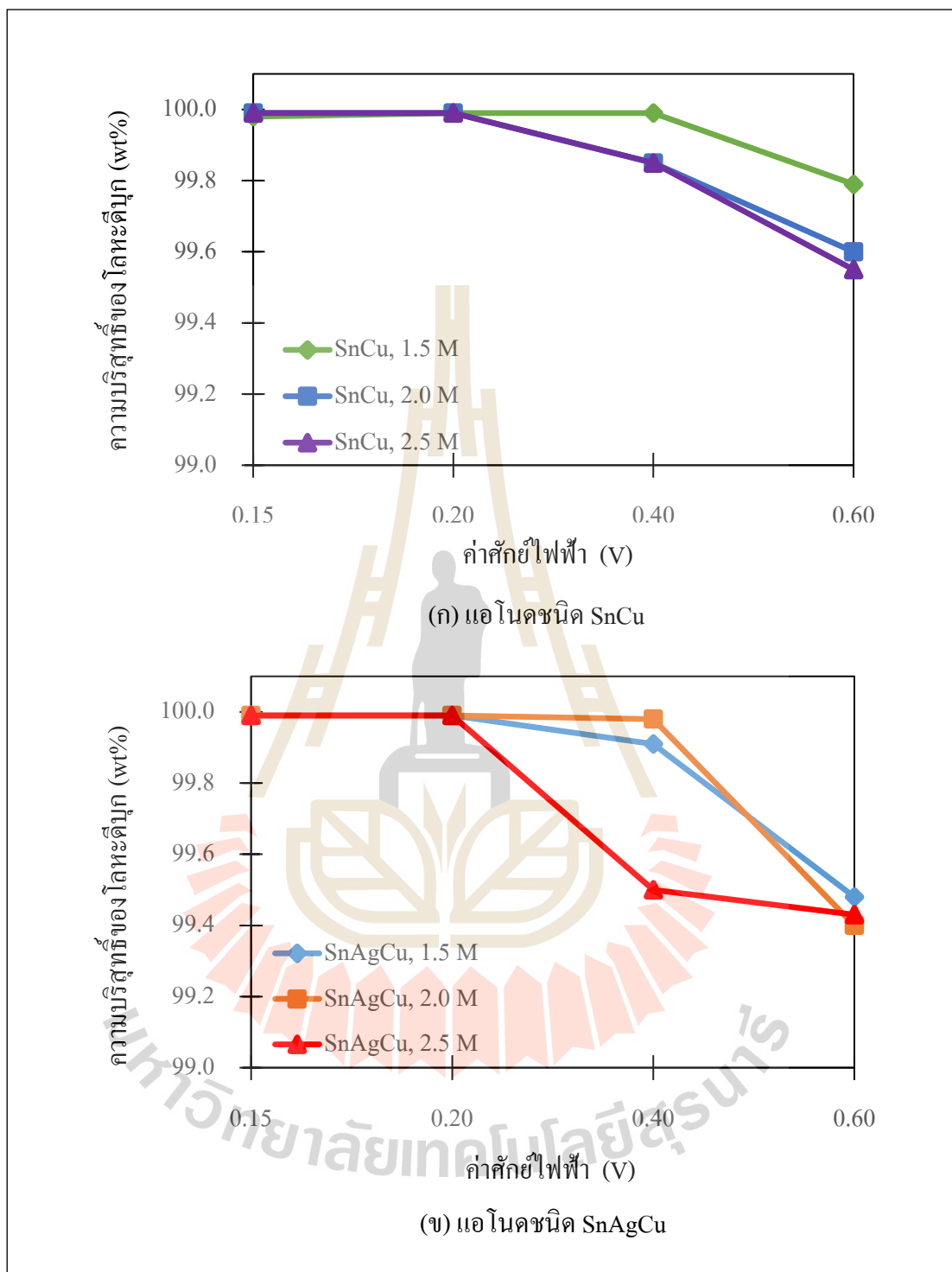
รูปที่ 4.8 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสิ้นเปลืองพลังงาน
(ก) แอนโนดชนิด SnCu (ข) แอนโนดชนิด SnAgCu

4.4 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทด

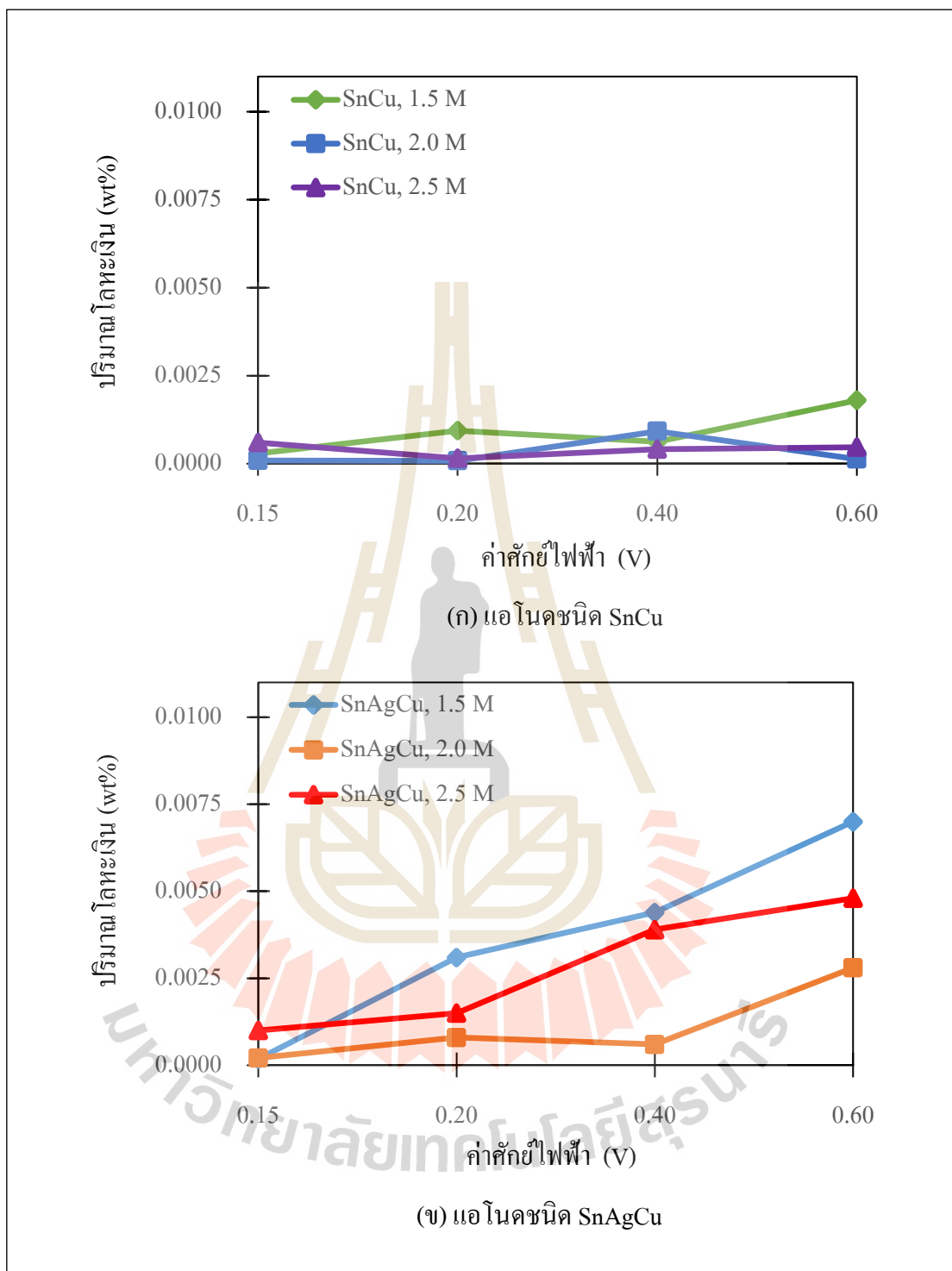
ส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่เกาะที่แคโทดได้นำมาวิเคราะห์ด้วย OES ผลการพิจารณาถึงอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายที่มีต่อส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่แคโทดได้แสดงดังในรูปที่ 4.9-4.11

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นมีผลทำให้ความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทดลดลง ซึ่งเกิดขึ้นกับทั้งแอโนดชนิด SnCu และชนิด SnAgCu ยกตัวอย่างเช่น เมื่อแอโนดเป็นชนิด SnCu ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M ค่าความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทดเท่ากับ 99.99, 99.99, 99.85 และ 99.60 wt% ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ตามลำดับ

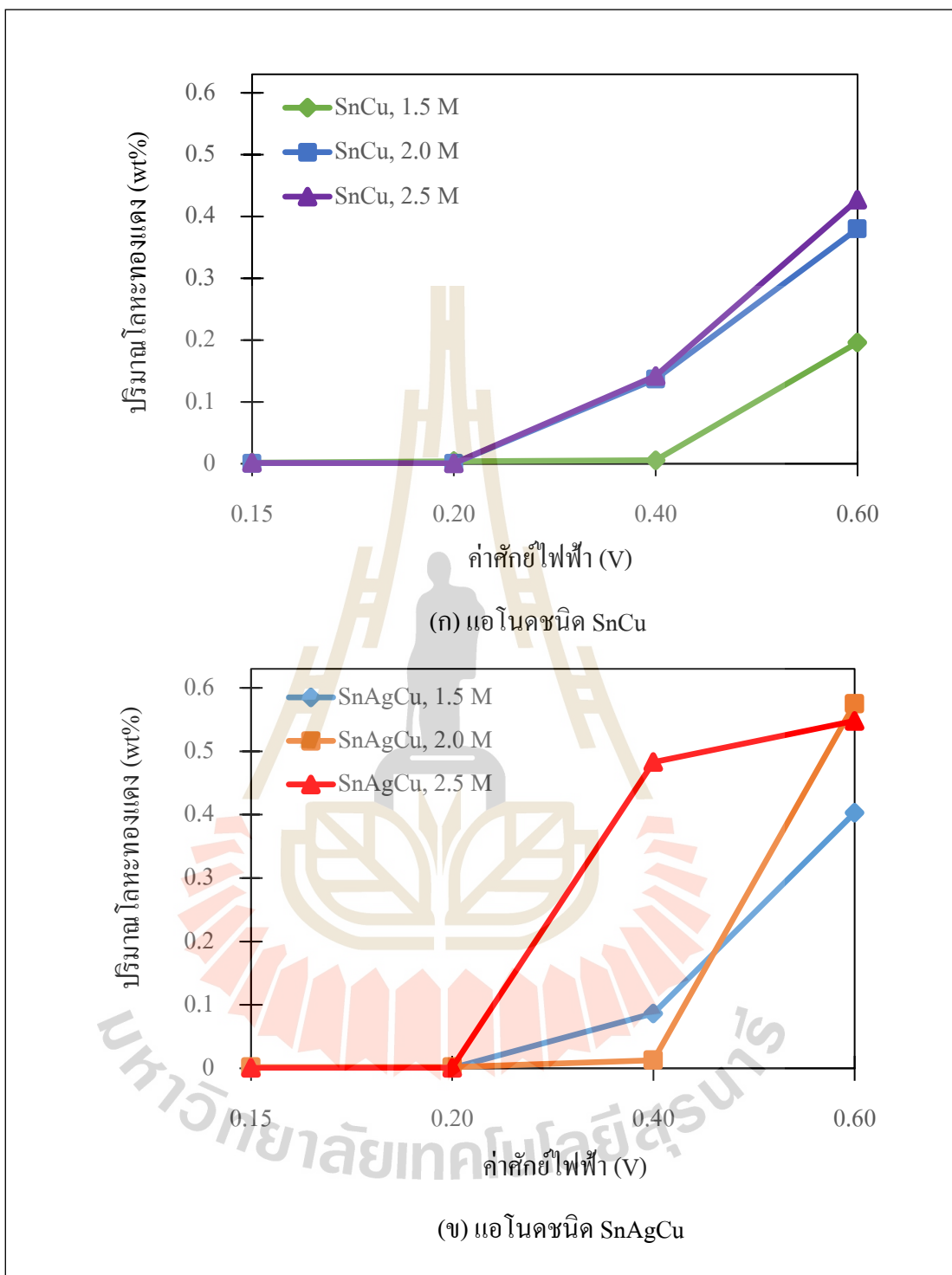
ในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ 0.15 และ 0.20 V ความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทดมีค่าสูงถึง 99.99 wt% แต่จะลดลงตามศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น การที่ศักย์ไฟฟ้าสูงแล้วทำให้ความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทดนั้นเนื่องจากเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินกว่าจะมีเพียงโลหะดีบุกที่ละลายออกมาจากแอโนด แต่ยังมีโลหะเงินและทองแดงละลายออกมาด้วย ซึ่งจากตารางที่ 2.3 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของดีบุกมีค่า E° เท่ากับ -0.141 V ทองแดงมีค่า E° เท่ากับ $+0.337$ V และเงินมีค่า E° เท่ากับ $+0.799$ V ซึ่งถ้าหากว่ากำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0.40 และ 0.60 V จะทำให้ทั้งดีบุก ทองแดง และเงิน ละลายจากแอโนดลงไปยังสารละลายทั้งหมด โดยที่ทองแดงและเงินที่มีอยู่ในสารละลายจะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าดีบุก ซึ่งโลหะที่มีค่า E° มากกว่าจะสามารถรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าจึงทำให้มีทองแดงและเงินอยู่ในก้อนโลหะด้วย ปริมาณของเงินและทองแดงของสภาวะการทดลองต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทด (ก) แอนโนดชนิด SnCu (ข) แอนโนดชนิด SnAgCu



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะเงินเกาะที่แคโทด (ก) แอนโนดชนิด SnCu (ข) แอนโนดชนิด SnAgCu



รูปที่ 4.11 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะทองแดงที่แคโทด (ก) แอโนดชนิด SnCu (ข) แอโนดชนิด SnAgCu

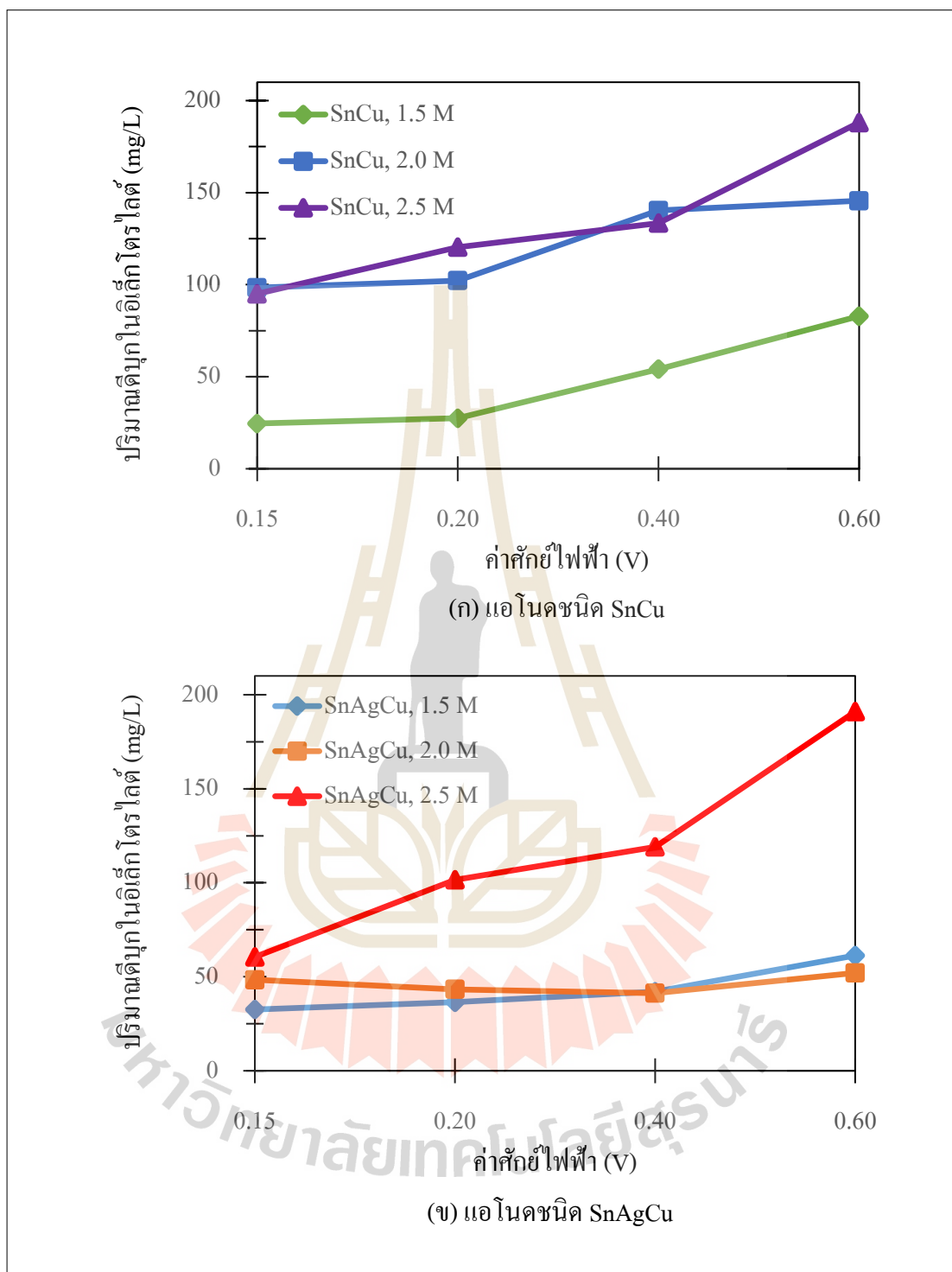
ส่วนผสมทางเคมีตั้งต้นของแอโนดมีผลต่อส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่แคโทดโดยตรง โดยจะพบว่าแอโนดชนิด SnAgCu ซึ่งมีเงินเป็นส่วนผสมมากกว่าแอโนดชนิด SnCu เมื่อนำแคโทดที่ได้จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ ไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.10

เมื่อพิจารณาปริมาณของทองแดงเกาะที่แคโทดดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น ปริมาณของทองแดงเกาะที่แคโทดเพิ่มขึ้นมาก ยกตัวอย่างเช่น สำหรับแอโนด SnCu ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.40 V ปริมาณทองแดงมีค่าอยู่ในช่วง 0.0055-0.1420 wt% และที่ 0.60 V ปริมาณทองแดงมีค่าอยู่ในช่วง 0.1960-0.4270 wt% เนื่องจากทองแดงและดีบุกมีค่า E° ที่ใกล้เคียงกัน หากใช้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไปทองแดงสามารถถูกออกซิไดซ์ออกมาได้ง่ายและทองแดงยังสามารถถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าอีก ซึ่งที่ศักย์ไฟฟ้ายิ่งมากขึ้นยังมีผลทำให้ทองแดงเกาะที่แคโทดปริมาณสูงตามไปด้วย

4.5 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีปริมาณดีบุกเริ่มต้นแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายกรด โดยที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 1.5, 2.0 และ 2.5 M มีปริมาณดีบุก 266.3 mg/L, 286.7 mg/L และ 406.1 mg/L ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของดีบุกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้วแสดงดังในรูปที่ 4.12 โดยพบว่าปริมาณของดีบุกในสารละลายเพิ่มขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น สำหรับแอโนดชนิด SnCu ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15-0.60 V ช่วงปริมาณโลหะดีบุกที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าเท่ากับ 24.60-82.91, 98.37-145.6 และ 95.04-188.1 mg/L ที่ความเข้มข้นกรด 1.5, 2.0 และ 2.5 M ตามลำดับ ส่วนแอโนดชนิด SnCu ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15-0.60 V ช่วงปริมาณโลหะดีบุกที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าเท่ากับ 32.58-61.3, 48.35-52.05 และ 60.54-191.00 mg/L ที่ความเข้มข้นกรด 1.5, 2.0 และ 2.5 M ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณโลหะดีบุกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าลดลงจากสารละลายตั้งต้น ทั้งนี้เนื่องจากไอออนดีบุกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ตั้งต้นบางส่วนรับอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะเกาะที่แคโทด แต่ยังมีไอออนดีบุกบางส่วนอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณหรือสัดส่วนของดีบุกลดลง ทั้งนี้เนื่องจากทั้งเงินและทองแดงถูกรีดิวซ์ที่แคโทดได้ง่ายกว่า

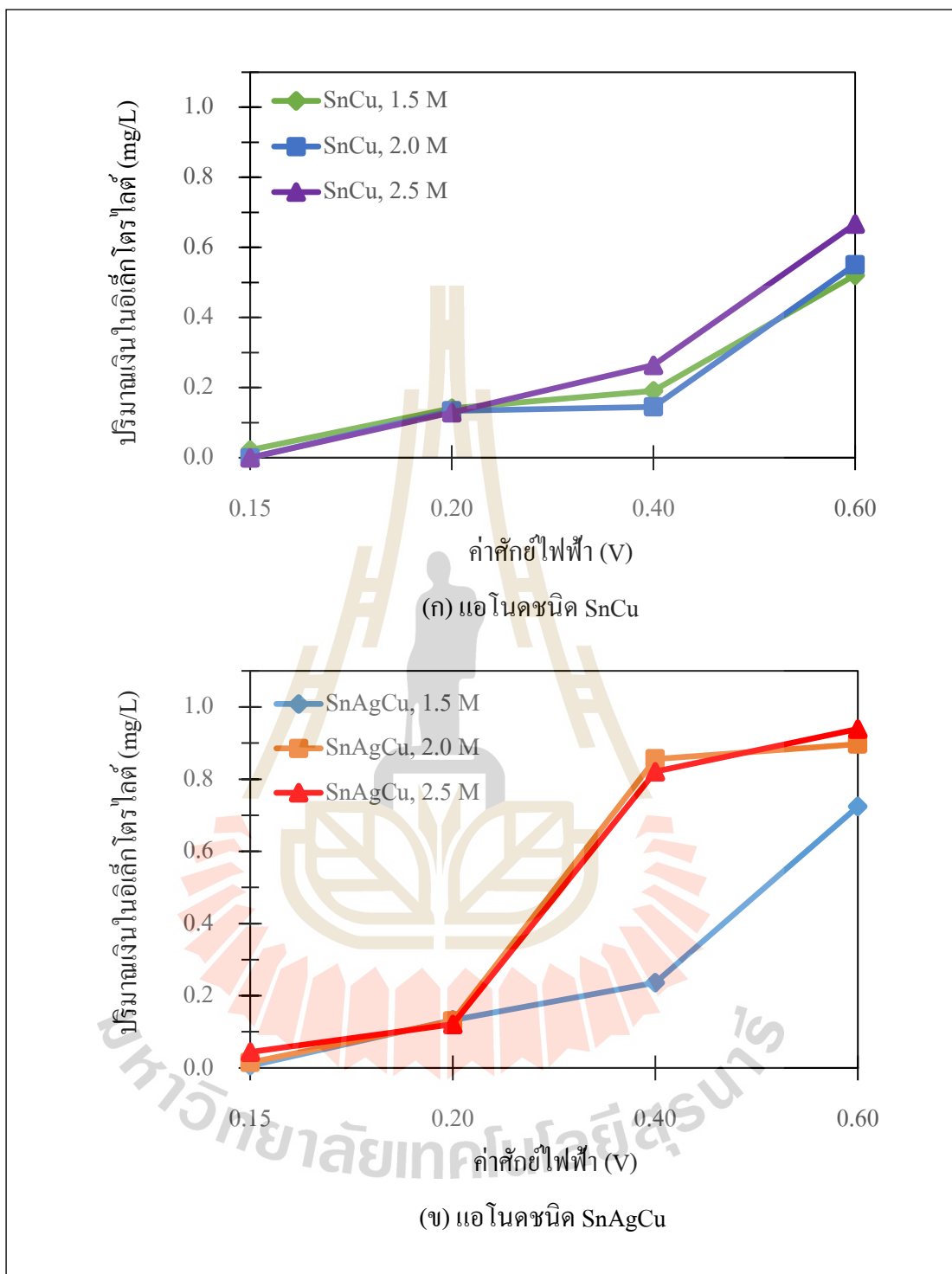


รูปที่ 4.12 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะ
 ดีบุกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ก) แอนโอดชนิด SnCu (ข) แอนโอดชนิด SnAgCu

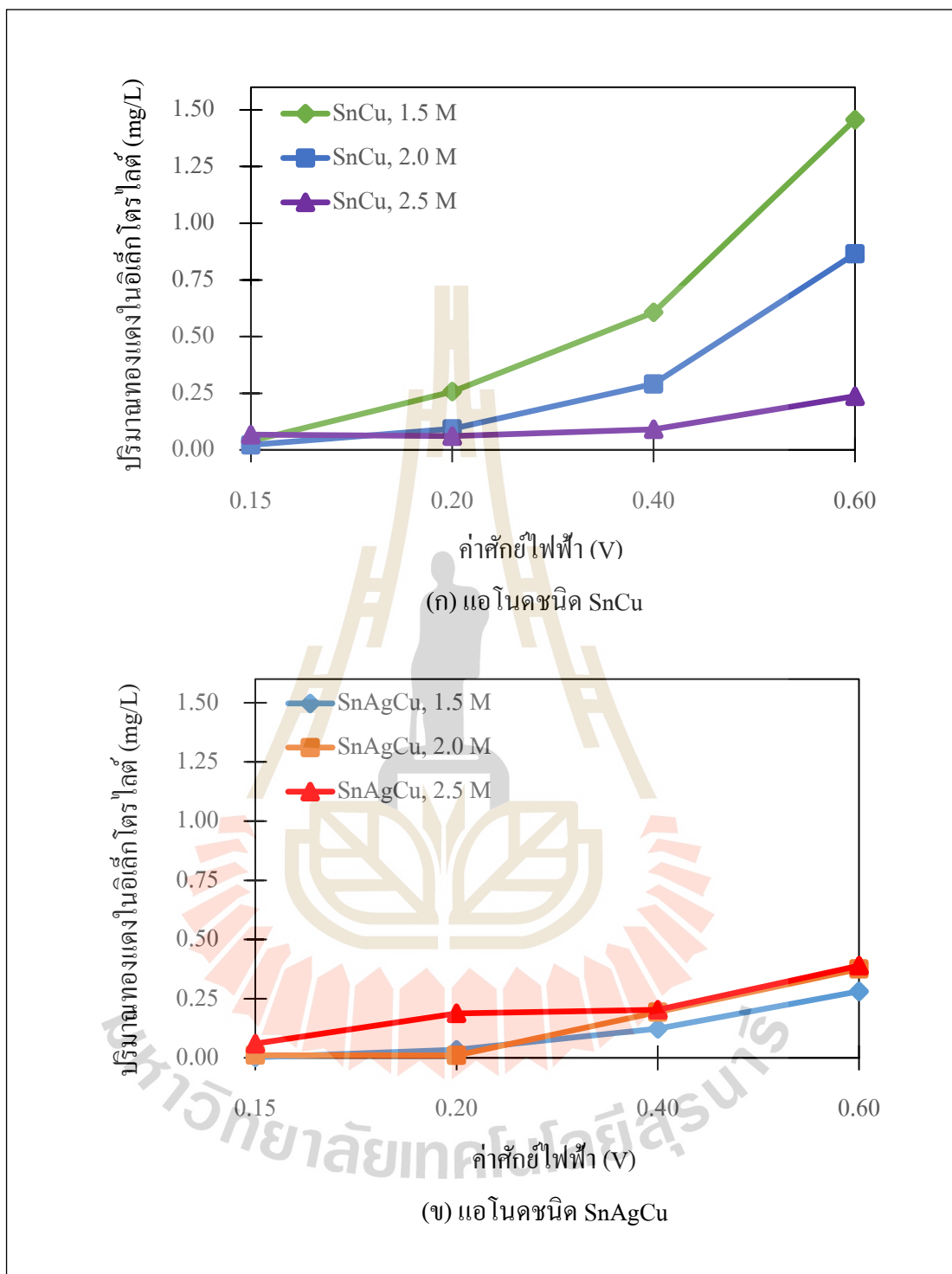
ทั้งนี้ปริมาณทั้งเงินและทองแดงจึงมีปริมาณมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะเงินและทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณโลหะเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเห็นว่าปริมาณของเงินไม่แตกต่างกันมาก แต่สำหรับแอโนดชนิด SnAgCu ช่วงความแตกต่างของปริมาณเงินมากกว่า เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นมีโลหะเงินมากกว่าในแอโนดชนิด SnCu สำหรับแอโนดชนิด SnCu ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15-0.60 V มีเงินละลายอยู่ในช่วง 0.022-0.667 mg/L ที่ความเข้มข้นกรด 1.5-2.5 M ส่วนแอโนดชนิด SnAgCu ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15-0.60 V อยู่ในช่วง 0.006-0.939 mg/L ที่ความเข้มข้นกรด 1.5-2.5 M

เมื่อพิจารณาปริมาณของโลหะทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะเห็นว่าปริมาณทองแดงในแอโนดชนิด SnCu มีช่วงความแตกต่างของปริมาณทองแดงมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นของแอโนดชนิด SnCu มีดีบุกเป็นองค์ประกอบหลัก และมีการเจือเพียงทองแดง โดยมีเงินเจือเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ผลของปริมาณทองแดงสำหรับแอโนดชนิด SnCu มีช่วงความแตกต่างของปริมาณทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากกว่าในแอโนดชนิด SnAgCu



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ก) แอนโนดชนิด SnCu (ข) แอนโนดชนิด SnAgCu



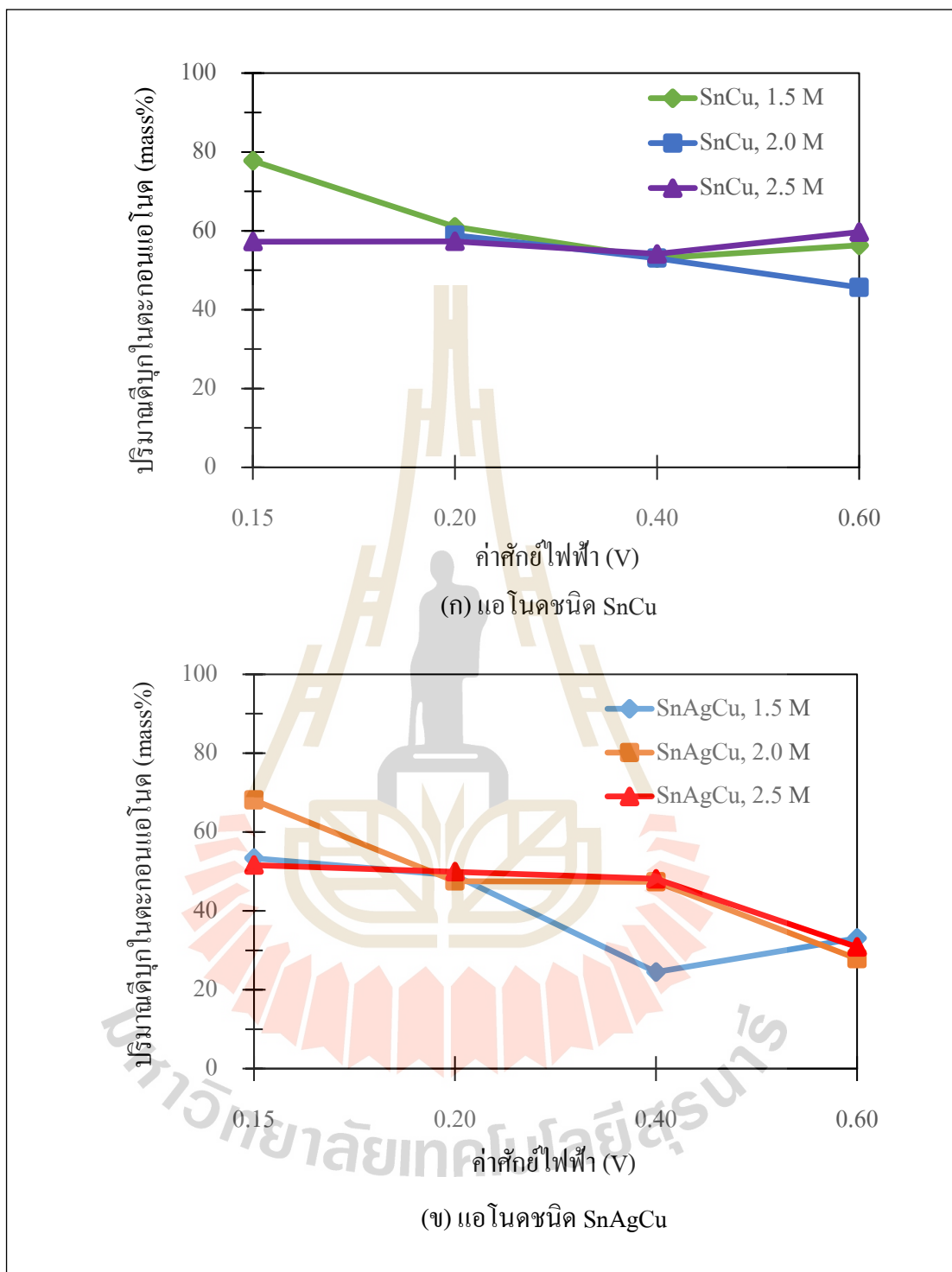
รูปที่ 4.14 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะ
ทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ก) แอนโนดชนิด SnCu (ข) แอนโนดชนิด SnAgCu

4.6 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะในตะกอนแอโนด

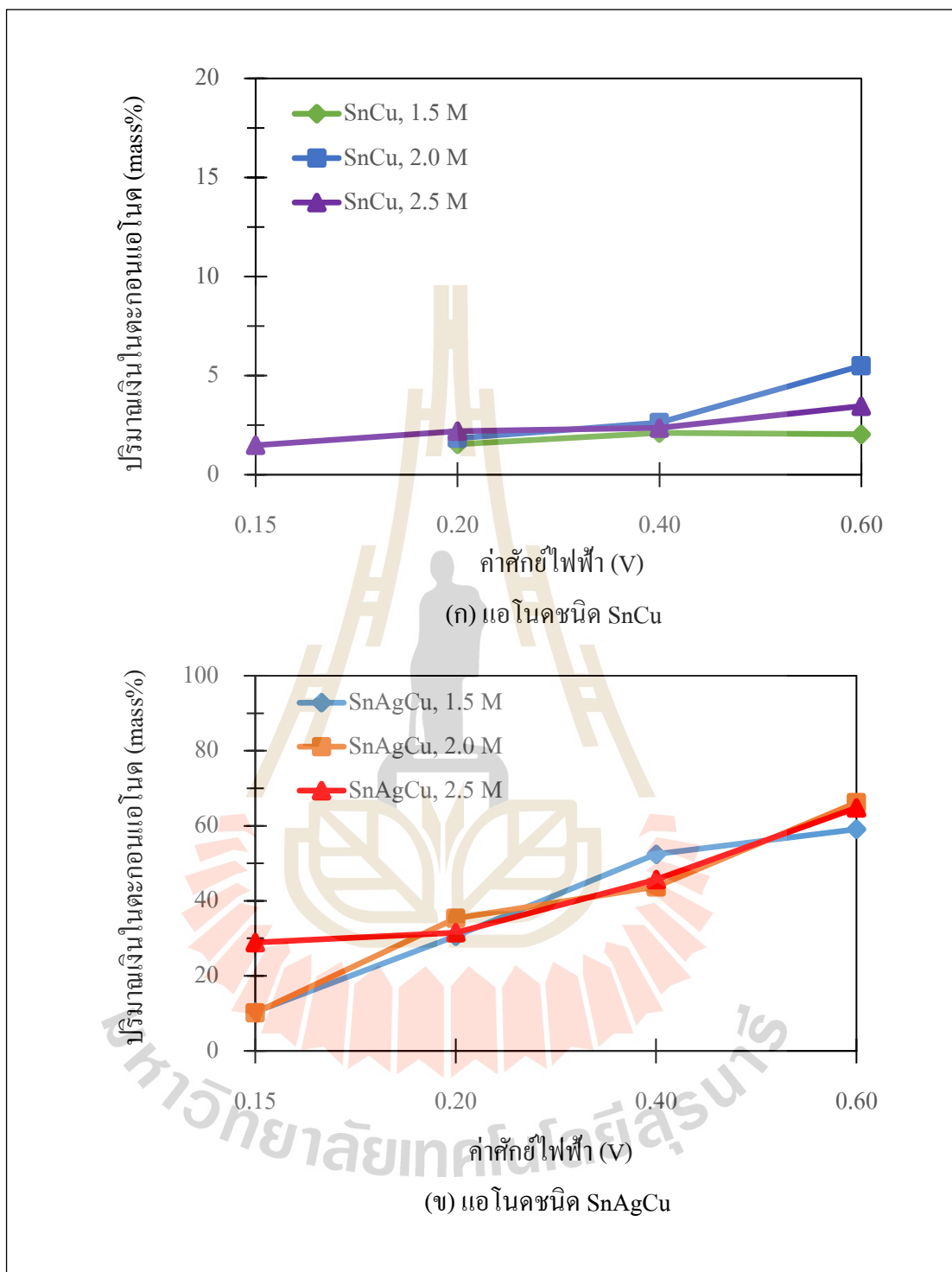
ตะกอนที่เกิดขึ้นซึ่งกองอยู่ใต้แอโนดหรือตะกอนที่ผสมอยู่ในสารละลายได้ถูกนำไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย XRF ผลการวิเคราะห์พบว่ามีส่วนผสมของดีบุกอยู่มาก ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาที่ทำการทดลอง 24 ชั่วโมง ไม่สามารถละลายให้ดีบุกลงในสารละลายได้หมดโดยยังเป็นส่วนผสมของตะกอนอยู่มาก ปริมาณดีบุกในตะกอนแอโนดที่เกิดขึ้นที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าช่วงของปริมาณดีบุกในตะกอนแอโนด 45.654-77.754 mass% ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15-0.60 V สำหรับแอโนดชนิด SnCu และช่วงของปริมาณดีบุกในตะกอนแอโนด 27.865-68.091 mass% ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15-0.60 V สำหรับแอโนดชนิด SnAgCu

ปริมาณของโลหะเงินในตะกอนแอโนดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.16 โดยจะพบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นปริมาณโลหะเงินในตะกอนแอโนดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นการละลายของไอออนโลหะต่าง ๆ ที่มี E° ของปฏิกิริยารีดักชันสูงจะละลายออกมาจากแอโนดสูง อย่างไรก็ตาม ปริมาณของโลหะที่มีค่า E° ของปฏิกิริยารีดักชันสูง ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในตะกอนแอโนด เนื่องจากการละลายของโลหะต่างชนิดกันมีความสามารถในการละลายในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นต่างกันจึงทำให้เกิดการละลายของโลหะในกรดแตกต่างกัน

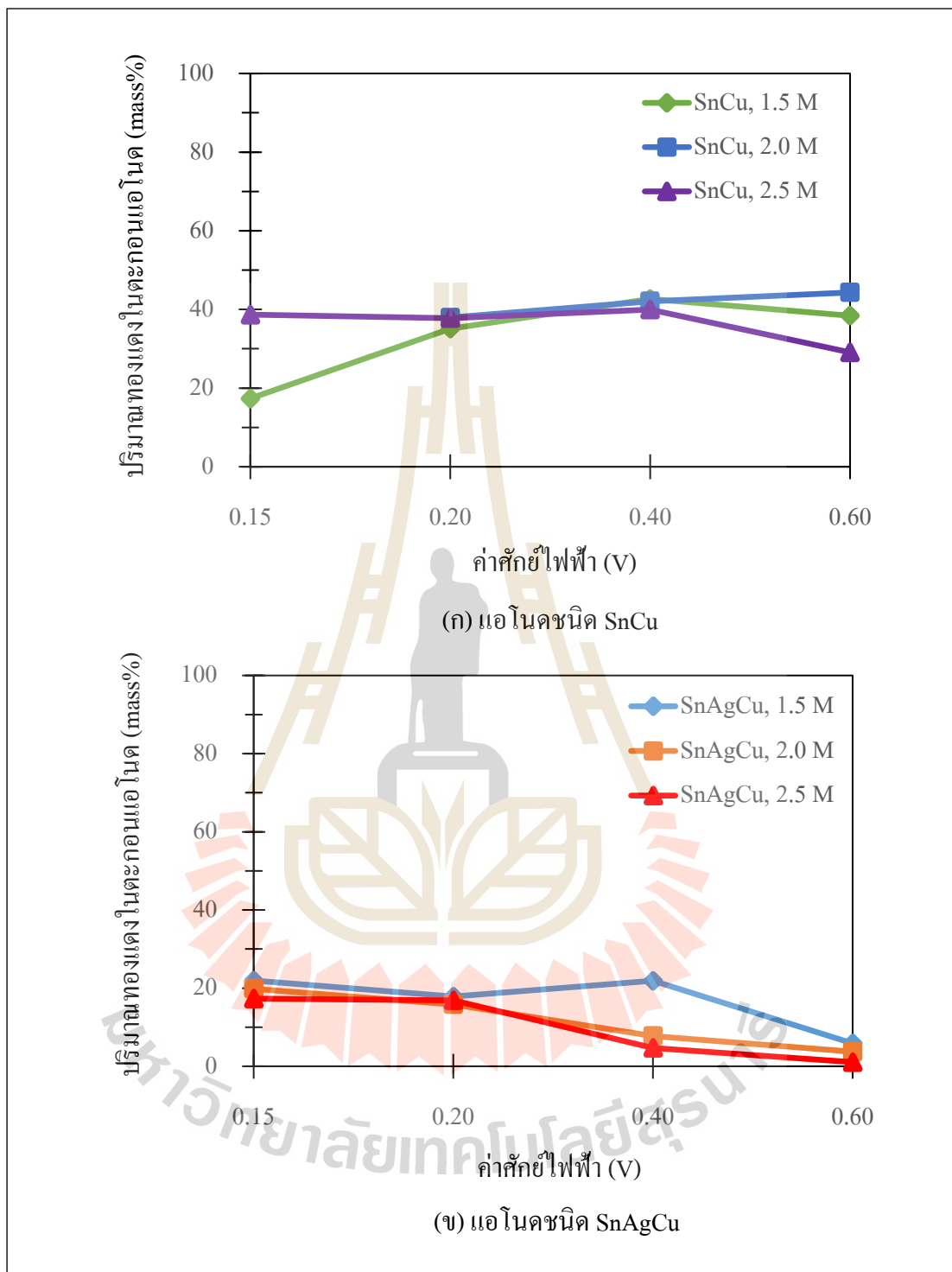
ส่วนผสมของทองแดงในตะกอนแอโนดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งแม้ทองแดงมีค่า E° ของรีดักชันสูง แต่ถ้าหากศักย์ไฟฟ้าที่ใช้และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สูง ปริมาณของทองแดงในตะกอนแอโนดจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่า E° ของปฏิกิริยารีดักชันระหว่างทองแดงกับดีบุกมีค่าใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น สำหรับแอโนดชนิด SnAgCu ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M ปริมาณของโลหะทองแดงในตะกอนแอโนดเท่ากับ 17.316, 16.867, 4.680 และ 1.061 mass% ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.15, 0.20, 0.40 และ 0.60 V ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะดีบุกในตะกอนแอโนด (ก) แอโนดชนิด SnCu (ข) แอโนดชนิด SnAgCu



รูปที่ 4.16 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะเงินในตะกอนแอโนด (ก) แอนโอดชนิด SnCu (ข) แอนโอดชนิด SnAgCu



รูปที่ 4.17 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณของโลหะทองแดงในตะกอนแอโนด (ก) แอนโอดชนิด SnCu (ข) แอนโอดชนิด SnAgCu

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากศึกษาการรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรีด้วยวิธีอิเล็กโทรลิซิส โดยเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1.5, 2.0 และ 2.5 M, แอโนดเป็นเศษบัดกรีจากของเสียอุตสาหกรรม มีองค์ประกอบของ SnCu และ SnAgCu โดยปรับค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรลิซิสระหว่าง 0.15-0.60 V ทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, ประสิทธิภาพกระแสและการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยพิจารณาถึงปริมาณและความบริสุทธิ์ของโลหะที่ไปเกาะที่แคโทด, การเกิดตะกอนแอโนด และการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยแอโนดชนิด SnCu มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าแอโนดชนิด SnAgCu
2. ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 0.15-0.20 V แต่ที่ 0.40-0.60 V ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง สำหรับแอโนดชนิด SnCu แต่สำหรับแอโนดชนิด SnAgCu มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น
3. การสิ้นเปลืองพลังงานสูงขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่การสิ้นเปลืองพลังงานที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 0.20 V มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.10 kWh/kg สำหรับแอโนดชนิด SnCu ที่ความเข้มข้นกรด 2.5 M และการสิ้นเปลืองพลังงานที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 0.15 V มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.09 kWh/kg สำหรับแอโนดชนิด SnAgCu ที่ความเข้มข้นกรด 2.5 M
4. เมื่อศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นกรดเพิ่มขึ้น น้ำหนักของโลหะเกาะที่แคโทดสูงขึ้น ที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 0.15-0.20 V ที่ความเข้มข้นกรด 1.5-2.5 M ความบริสุทธิ์ของโลหะดีบุกเกาะที่แคโทดมีค่าเท่ากับ 99.99 wt% แต่จะลดลงที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 0.40-0.60 V แต่ปริมาณของเงินและทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้น และแอโนดชนิด SnAgCu มีปริมาณของเงินเกาะที่แคโทดมากกว่าแอโนดชนิด SnCu

5. ตะกอนแอโนดยังคงมีปริมาณดีบุกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งปริมาณดีบุกในตะกอนแอโนด เท่ากับ 45.654-77.754 mass% ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15-0.60 สำหรับแอโนดชนิด SnCu และปริมาณดีบุกในตะกอนแอโนด เท่ากับ 27.865-68.091 mass% ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15-0.60 สำหรับแอโนดชนิด SnAgCu
6. เมื่อศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นกรดที่เพิ่มขึ้น ปริมาณดีบุก เงิน และทองแดง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยช่วงของปริมาณเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของแอโนดชนิด SnAgCu กว้างกว่าแอโนดชนิด SnCu ที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 0.40-0.60 V และช่วงของปริมาณทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของแอโนดชนิด SnCu กว้างกว่าแอโนดชนิด SnAgCu ที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 0.20-0.60 V
7. สำหรับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลโลหะดีบุกจากเศษบัดกรี ที่เป็นแอโนดชนิด SnCu และชนิด SnAgCu ควรเลือกใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 0.20 V ที่ความเข้มข้นกรด 2.5 M เนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวทำให้ทั้งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้ามีค่าสูง การสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าต่ำ แต่ความบริสุทธิ์ของดีบุกเกาะที่แคโทด ยังคงสูงถึง 99.99 wt%

รายการอ้างอิง

- Daniel, H. (2007). Quantitative Chemical Analysis, Seven Edition. W. H. Freeman Company, New York. Ap20-27.
- Droste, Ch. Segats, M. and Vogelsang, D. (1998). Light Metal: Proc. 127th TMS Ann. Meet, San Antonio, Tx, USA. 419-428.
- Henry, L. Metallurgy of Tin (1911). McGraw-Hill Book Company, New York.
- Huang, S. Stannum (2000). Metallurgical Industry Press, Beijing, China.
- Nestor, P. (2004). Electrochemistry and Corrosion Science. Kluwer Academic publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. 189-243.
- Peter, W. (1982). Extractive Metallurgy of Tin. 2nd ed. Elsevier Scientific Publishing Company Press, in Amsterdam New York.
- Rao, S.R. Zu, X. and Finch, J.A. (1995). Second Inter. Simp. On Waste Processing and Recycling in Mineral and Metallurgy Industries.
- Seong, H.S. Sung, C.P. Jin, H.K. Yong, H.K. MAN S.L. and JAE W.A. (2015). Study on the Electrefining of Tin in Acid Solution from Electronic Waste. Archives of Metallurgy and Materials. Vol. 60. 1217-1220.
- Song, C. Tin Metallurgy (2011). Metallurgical Industry Publishing Company, Beijing, China.
- Twidwell, L.G. (1978). Electrometallurgy. Unit Process in Extractive Metallurgy, NFS Project SED 75-04821.
- Veileux, B. Laffront, A.M. and Ghali, E. (2001). Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 40, No.3, 343-354.
- Zijian, S. Yuanbo, Z. Bingbing, L. Manman, L. Guanghui, L. and TAO, J. (2017). Extraction and Separation of Tin from Tin-Bearing Secondary Resources: A Review. The Minerals, Metals & Materials Society. JOM, Vol. 91, No. 11. 2364-2372.
- ชาคร จารุพิสิฐธร. ถลุงแร่ดีบุก. ฝ่ายสนเทศและวิเทศสัมพันธ์ กองเศรษฐกิจและเผยแพร่ กรมทรัพยากรธรณี.
- ณิชชา บุรณสิงห์. (2016). ขยะอิเล็กทรอนิกส์. เอกสารข้อมูลพื้นฐาน กลุ่มงานบริการวิชาการ 3 สำนักวิชาการ สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร.

ประพิศ ประคุณหังสิต. และวาสนา คงสุข. (2001). โลหะบัดกรี. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ปี
ที่ 49, ฉบับที่ 155. 21-23.





ภาคผนวก ก

ตัวอย่างลักษณะของเซลล์ระหว่างทำการทดลอง ที่ระยะเวลาต่าง ๆ
และลักษณะตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

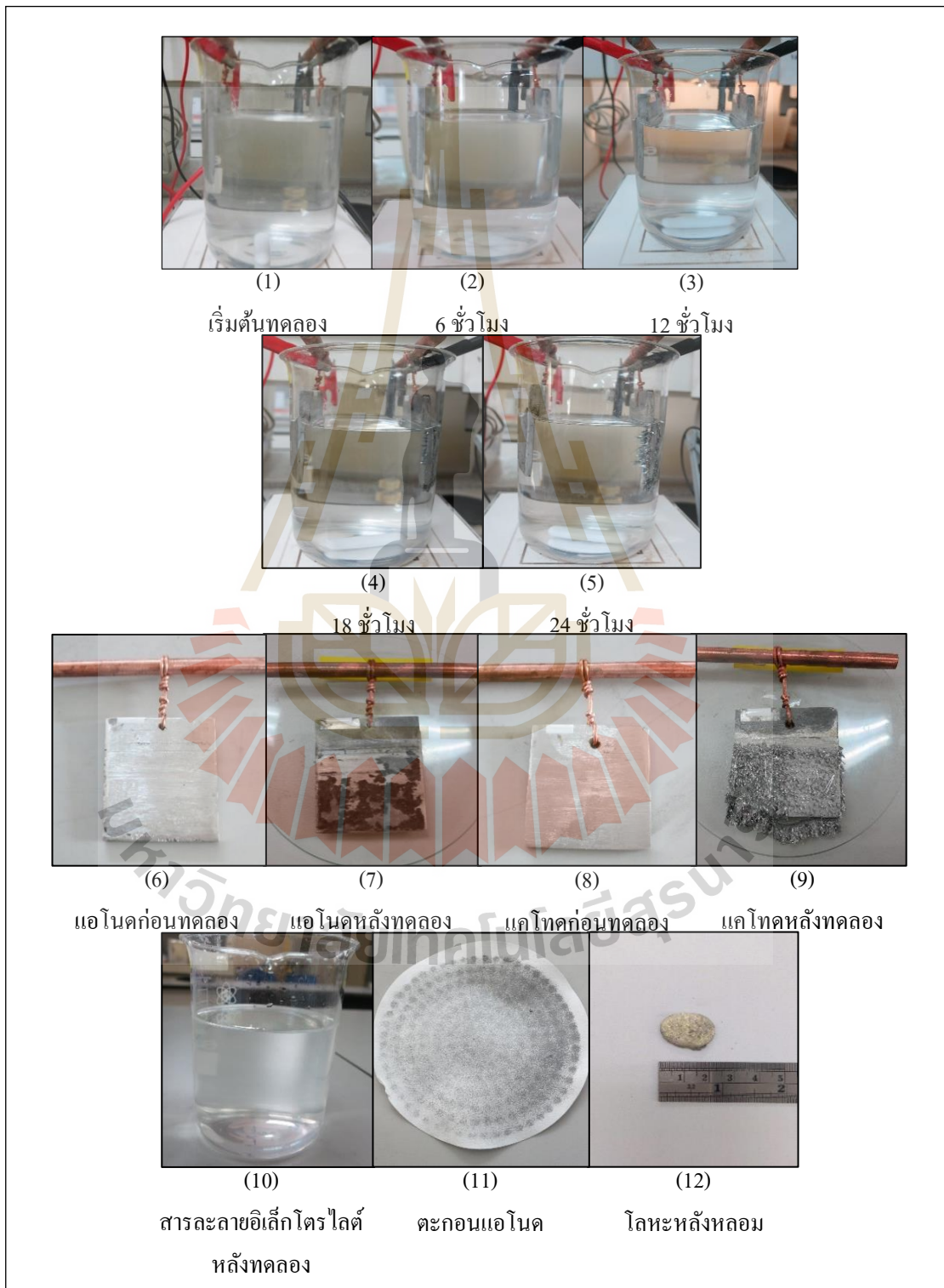
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สภาวะการทดลองที่ 1

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.15 V

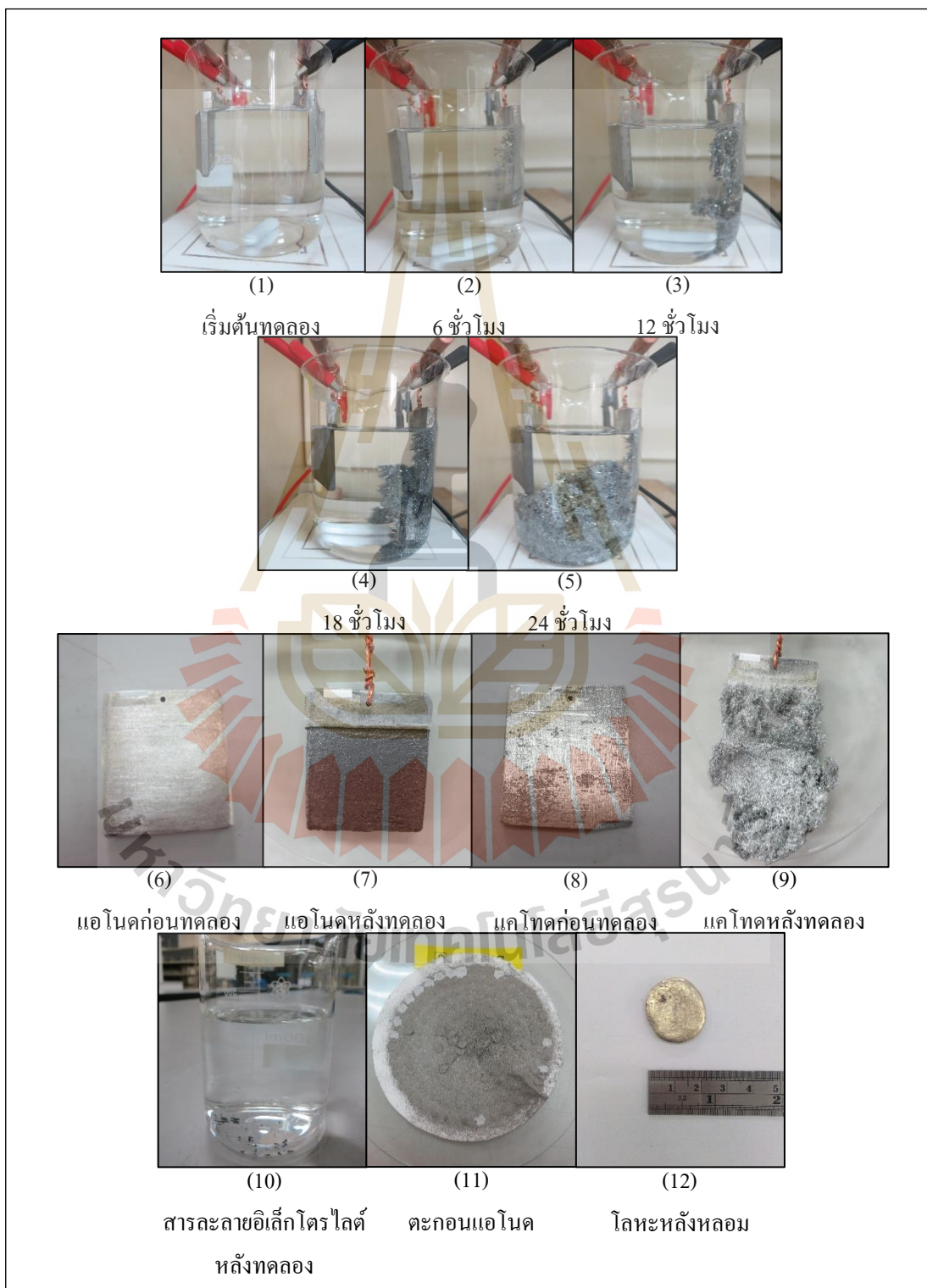


สภาวะการทดลองที่ 2

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.20 V

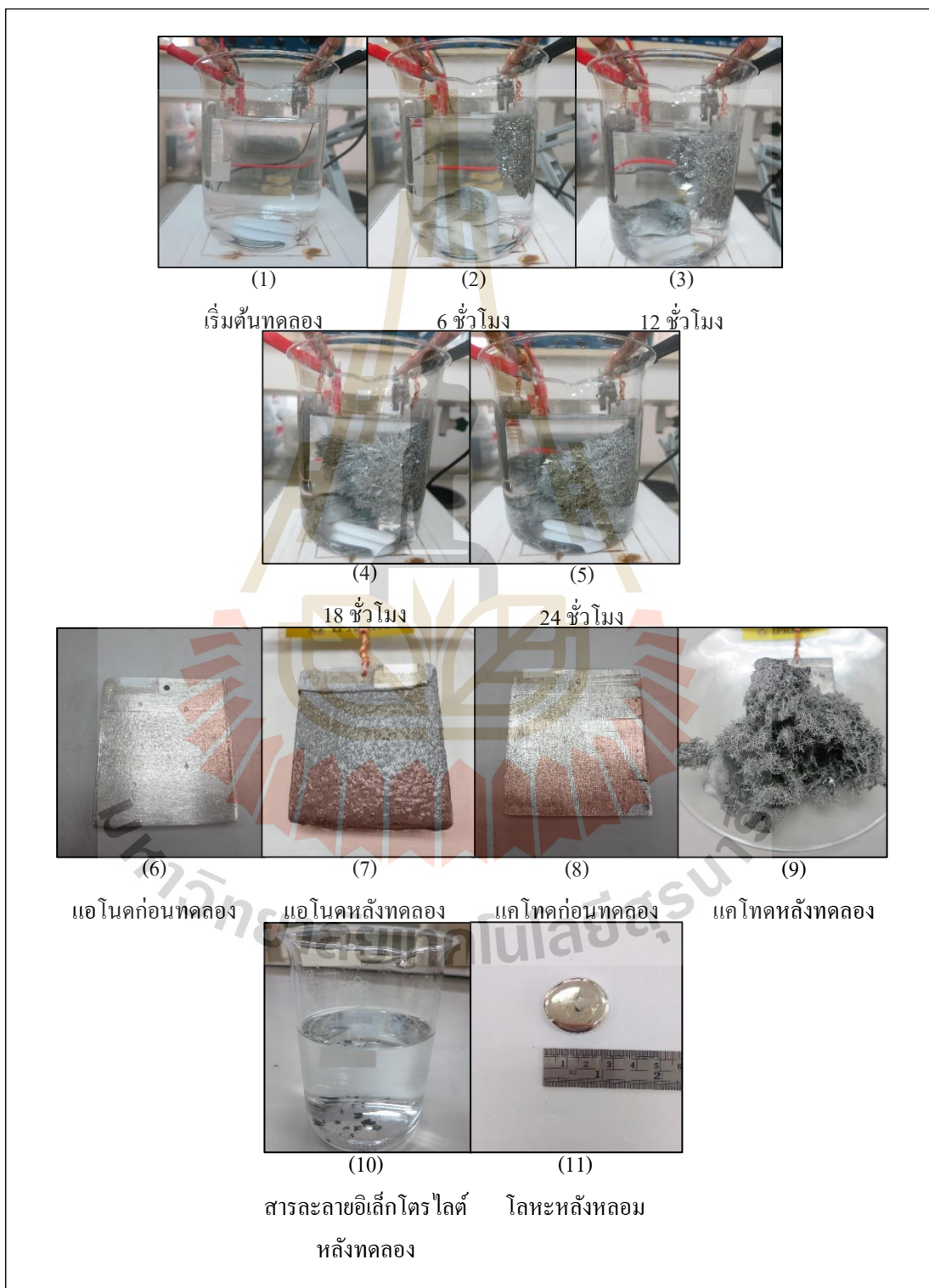


สภาวะการทดลองที่ 3

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.40 V

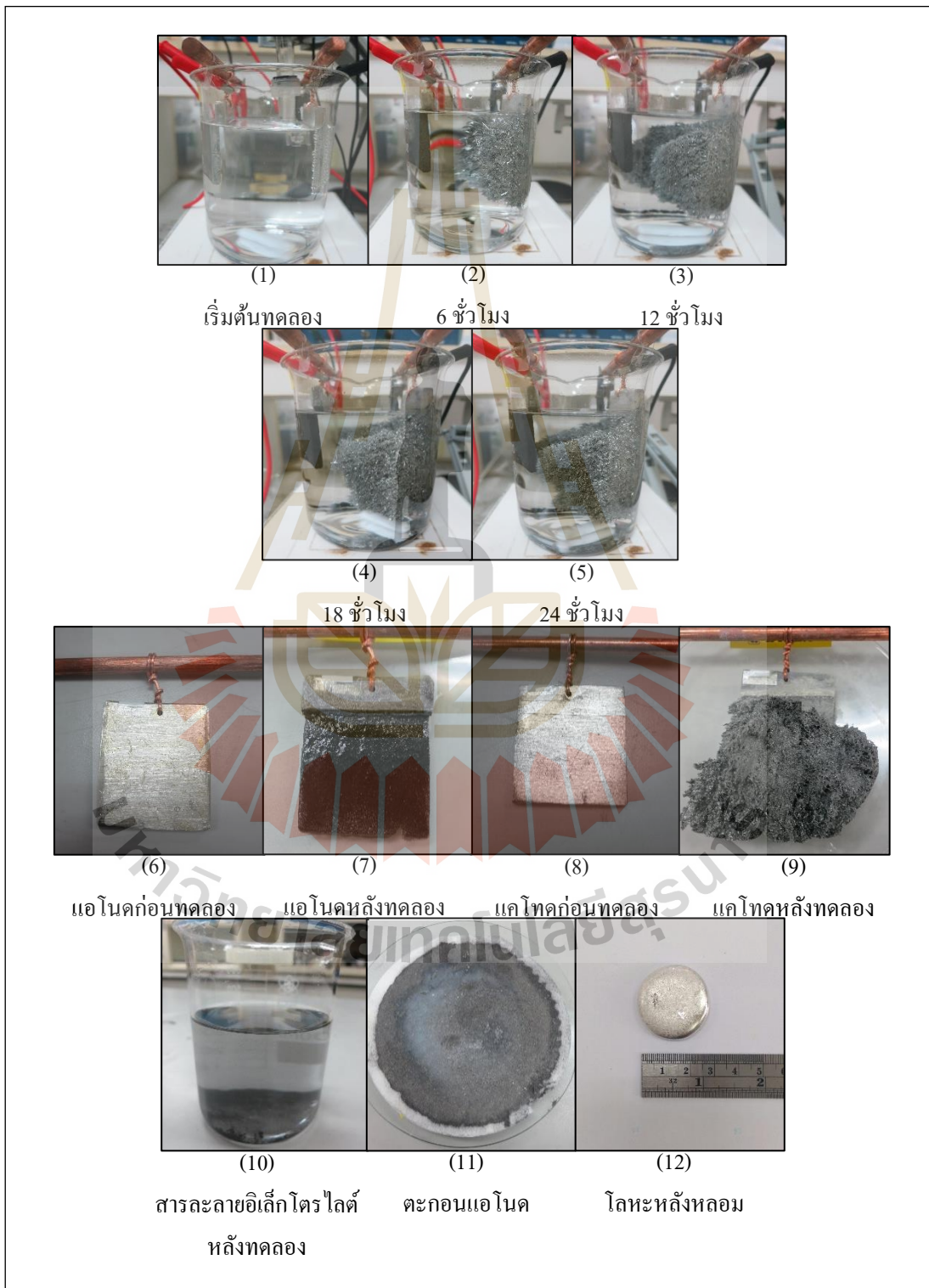


สภาวะการทดลองที่ 4

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.60 V



สภาวะการทดลองที่ 5

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.15 V



สภาวะการทดลองที่ 6

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.20 V

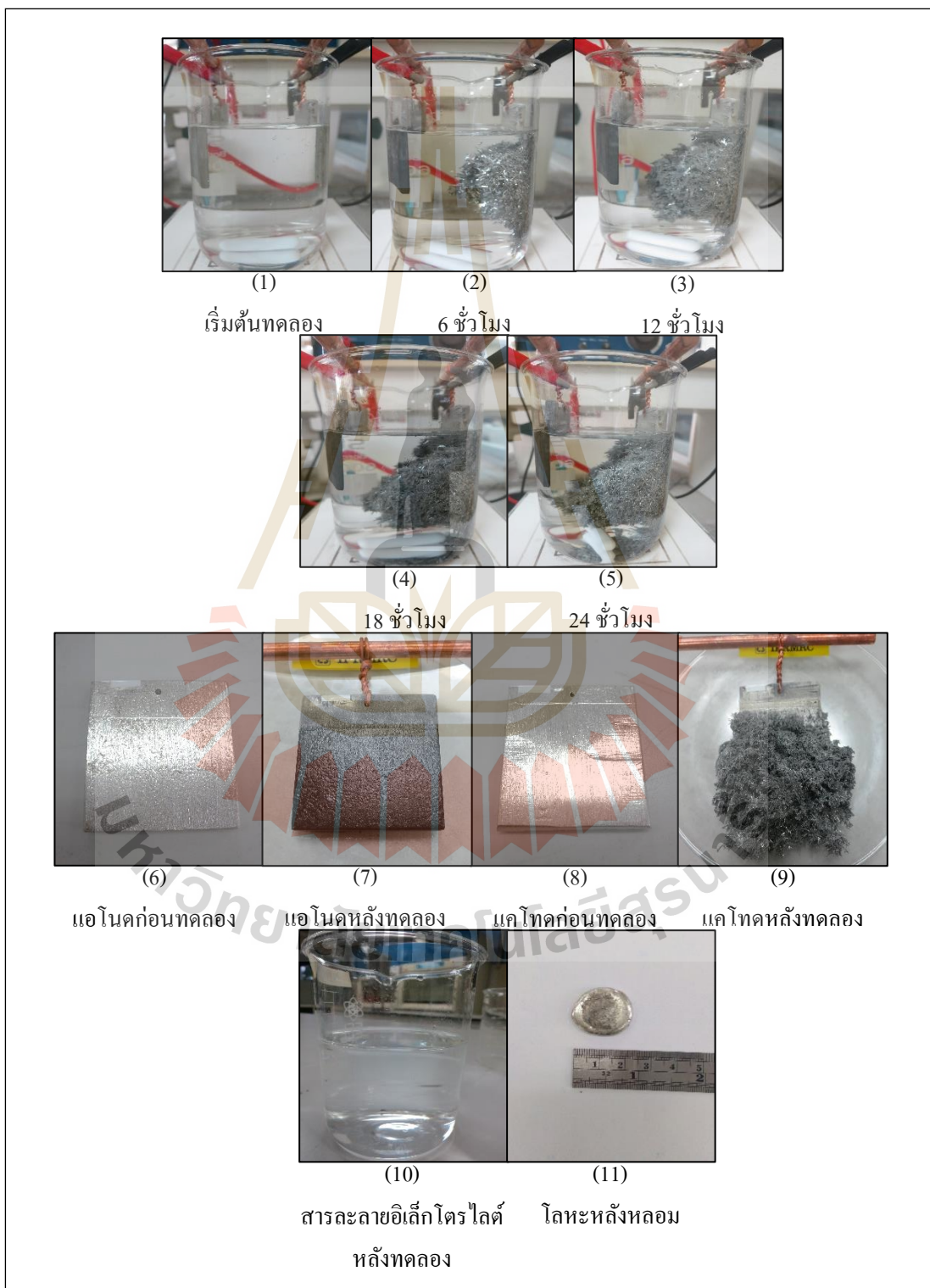


สภาวะการทดลองที่ 7

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.40 V

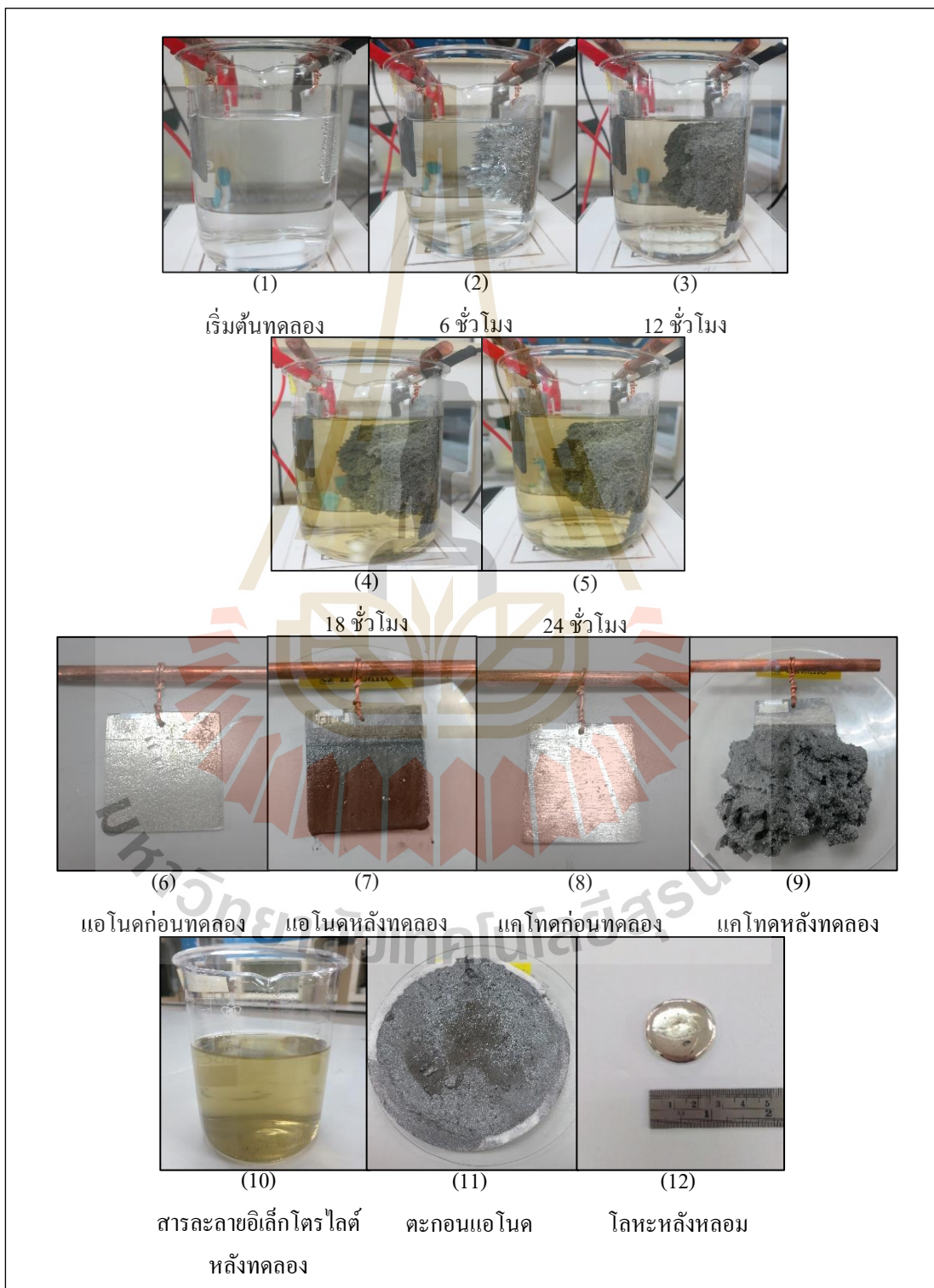


สภาวะการทดลองที่ 8

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1.5 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.60 V

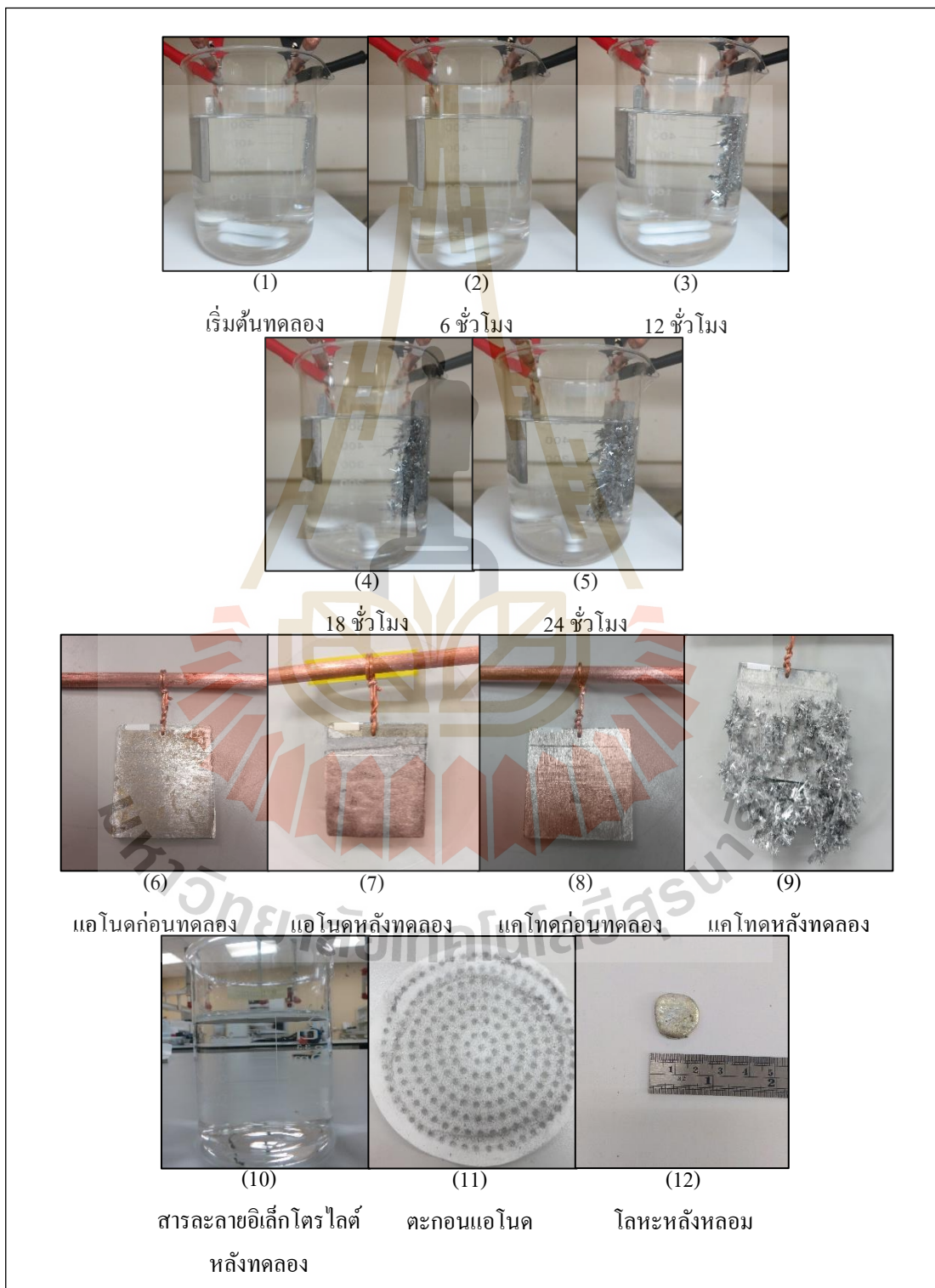


สภาวะการทดลองที่ 9

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.0 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.15 V

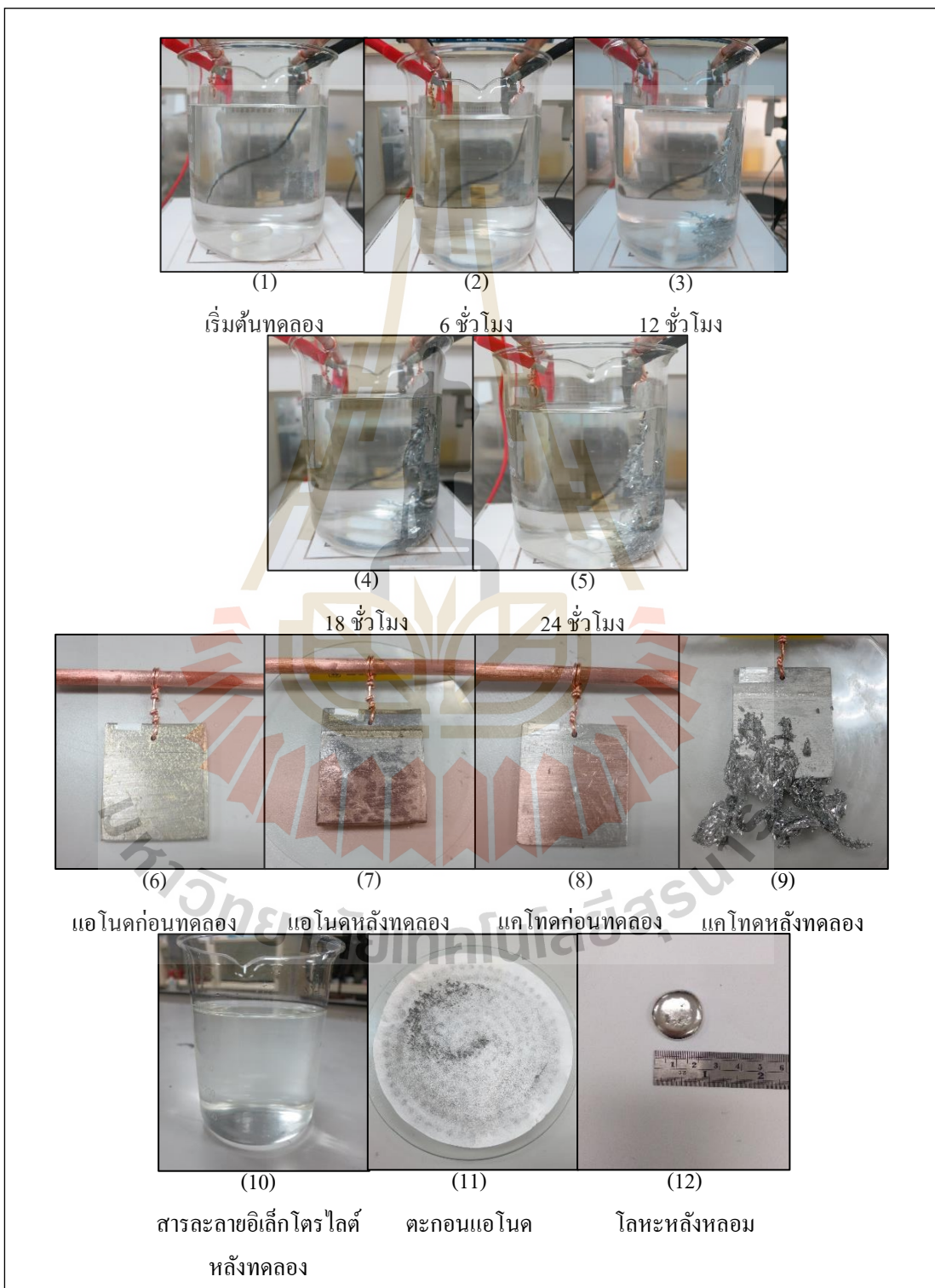


สภาวะการทดลองที่ 10

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.0 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.20 V



สภาวะการทดลองที่ 11

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.0 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.40 V

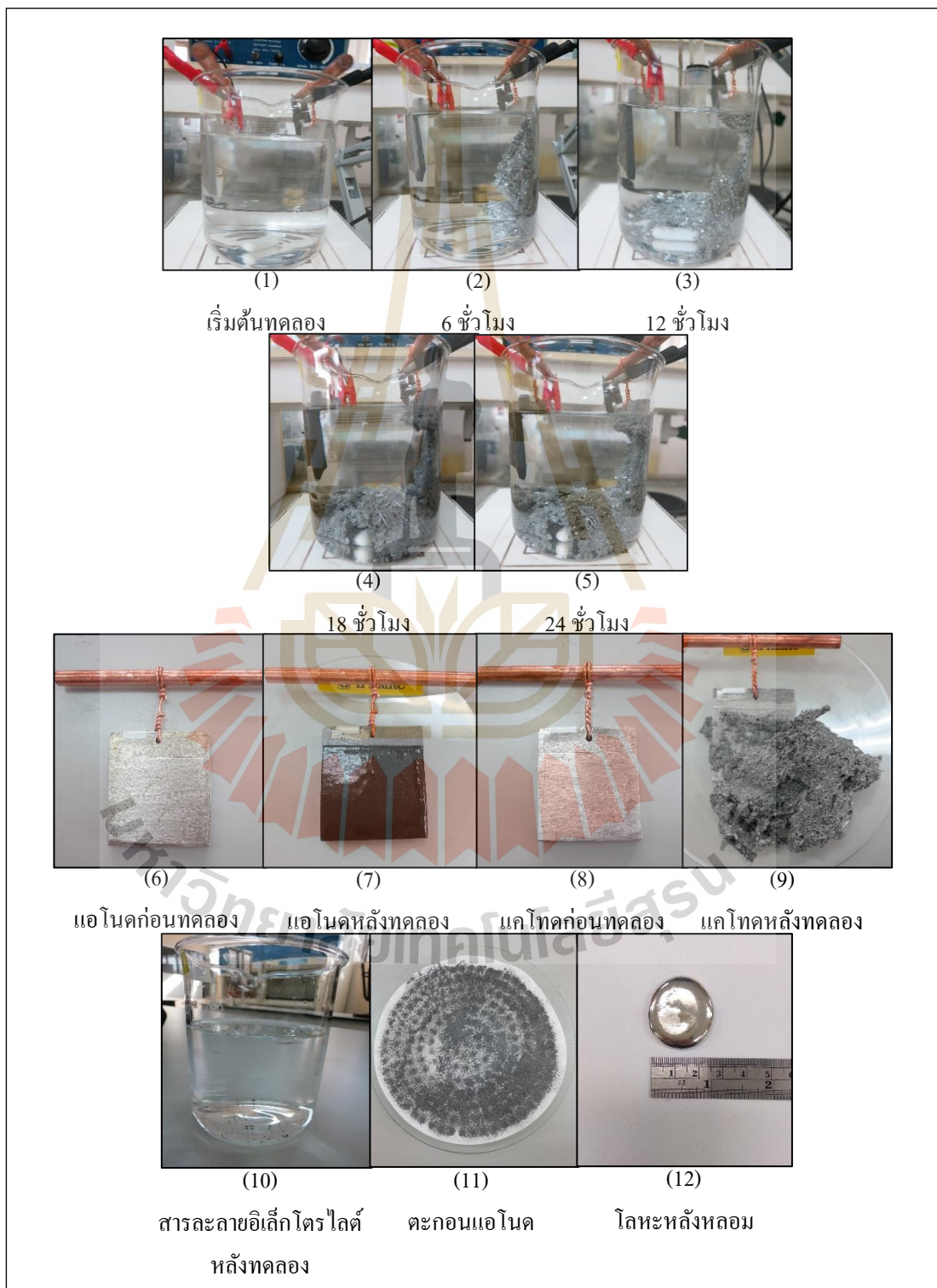


สภาวะการทดลองที่ 12

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.0 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.60 V

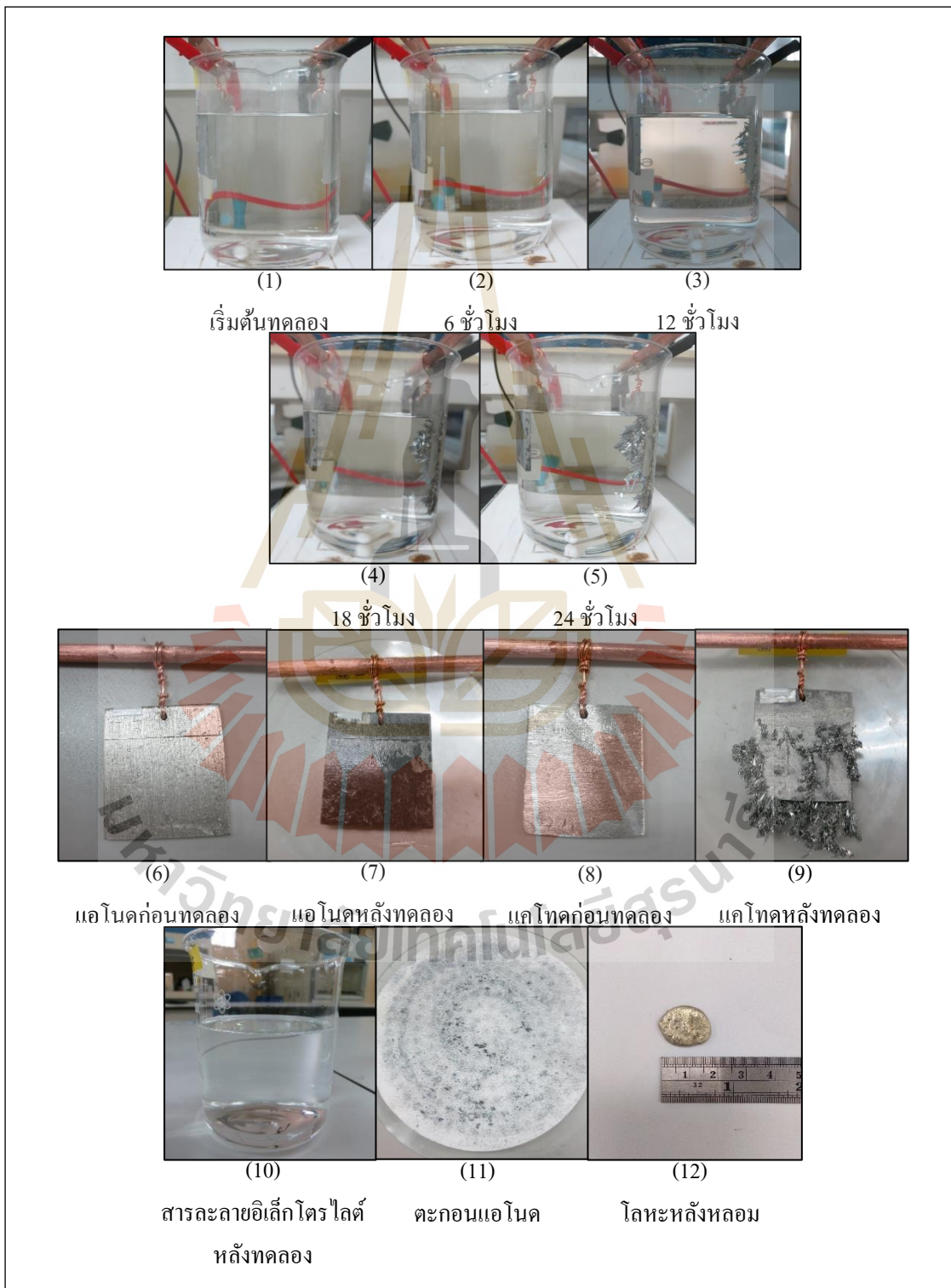


สภาวะการทดลองที่ 13

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.0 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.15 V

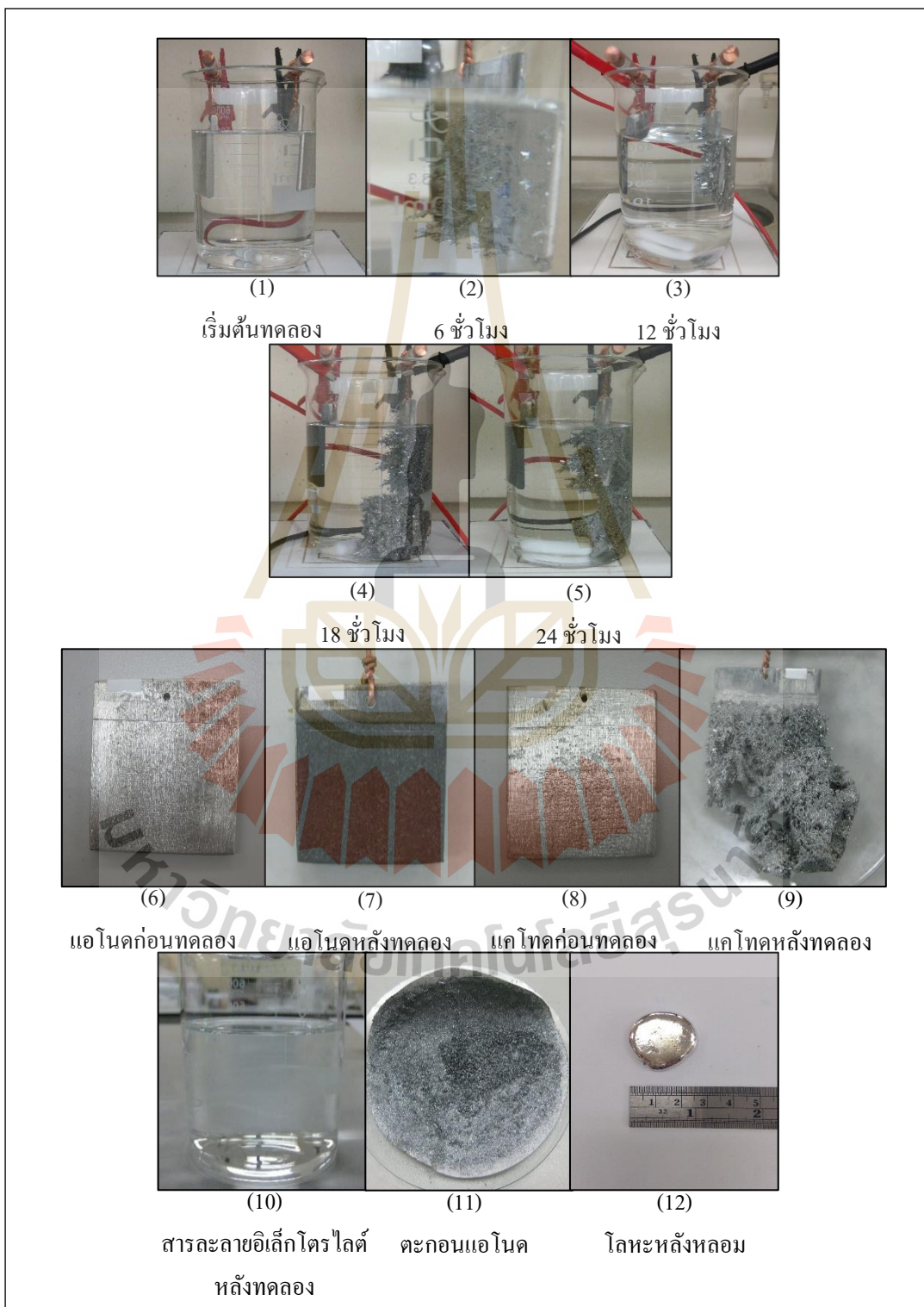


สภาวะการทดลองที่ 14

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.0 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.20 V

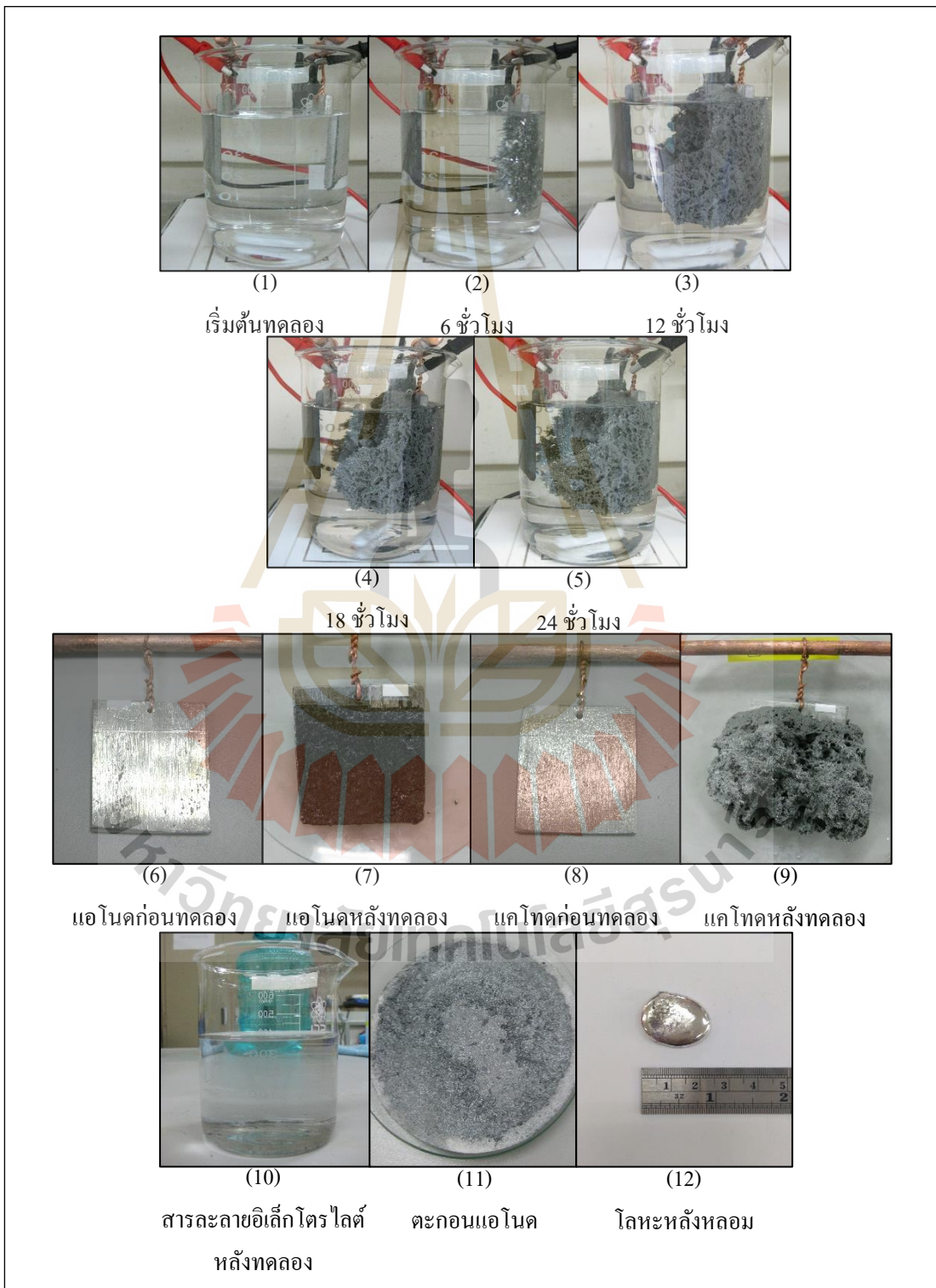


สภาวะการทดลองที่ 15

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.0 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.40 V

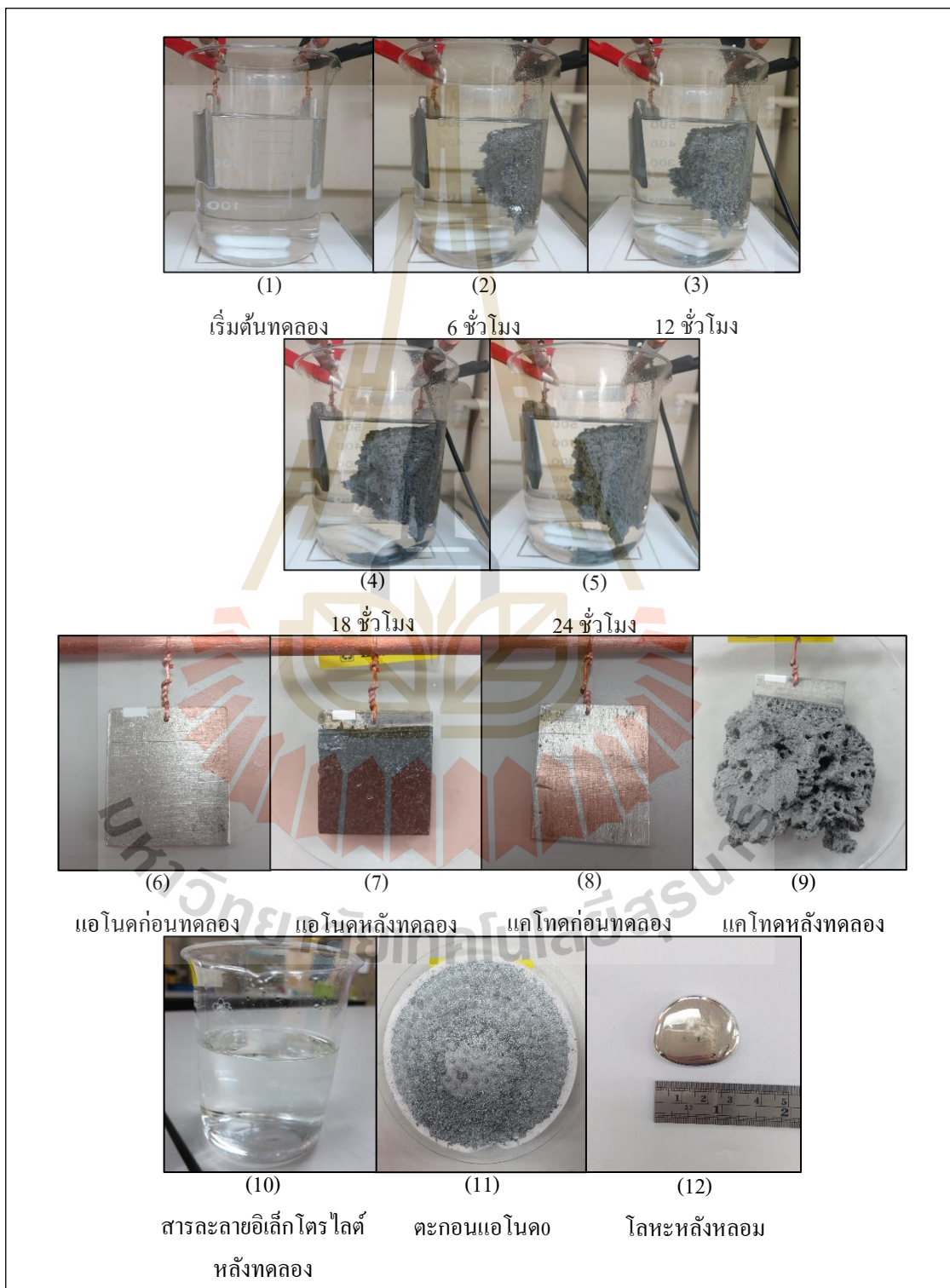


สภาวะการทดลองที่ 16

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.0 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.60 V

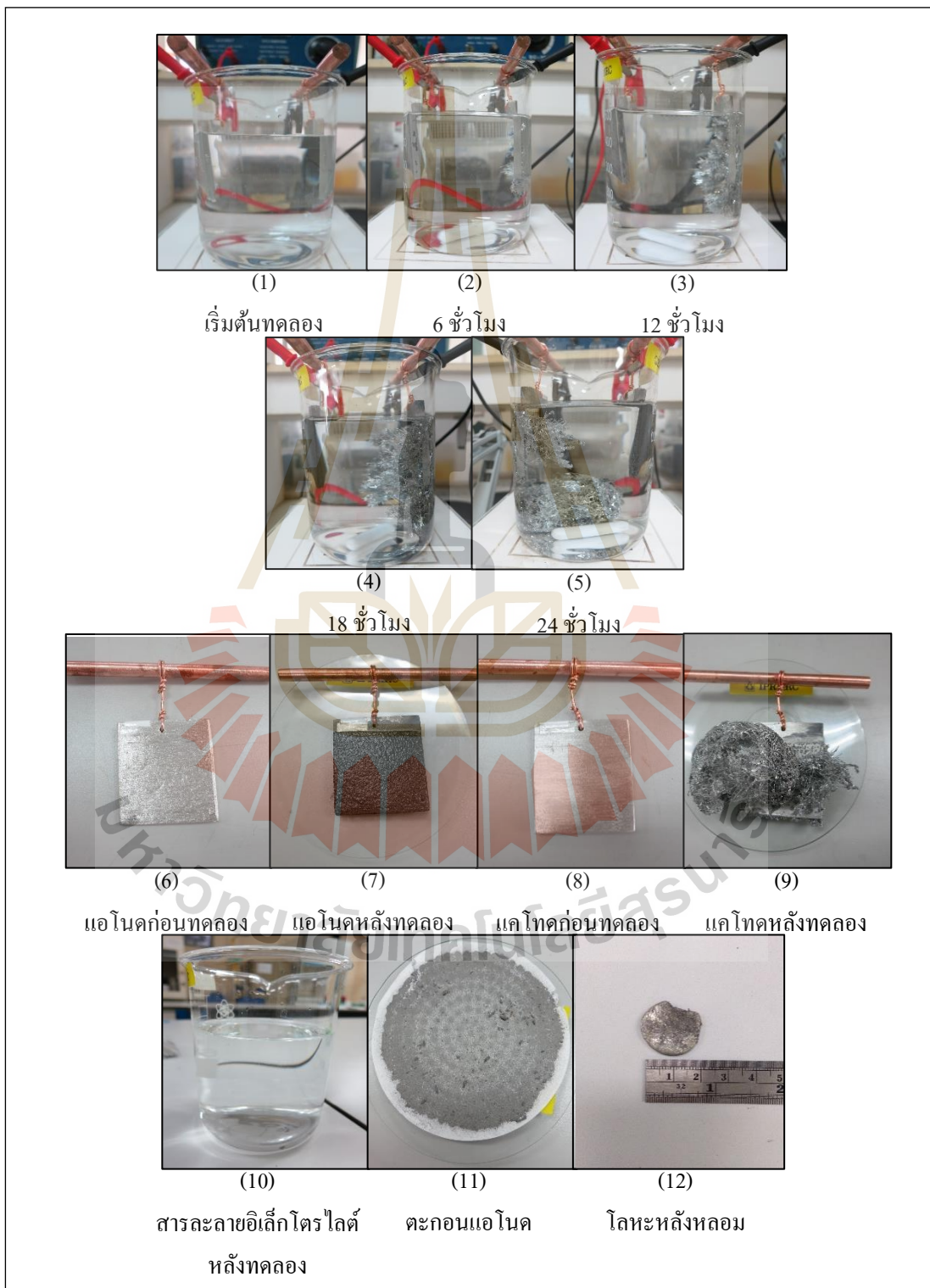


สภาวะการทดลองที่ 17

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.15 V

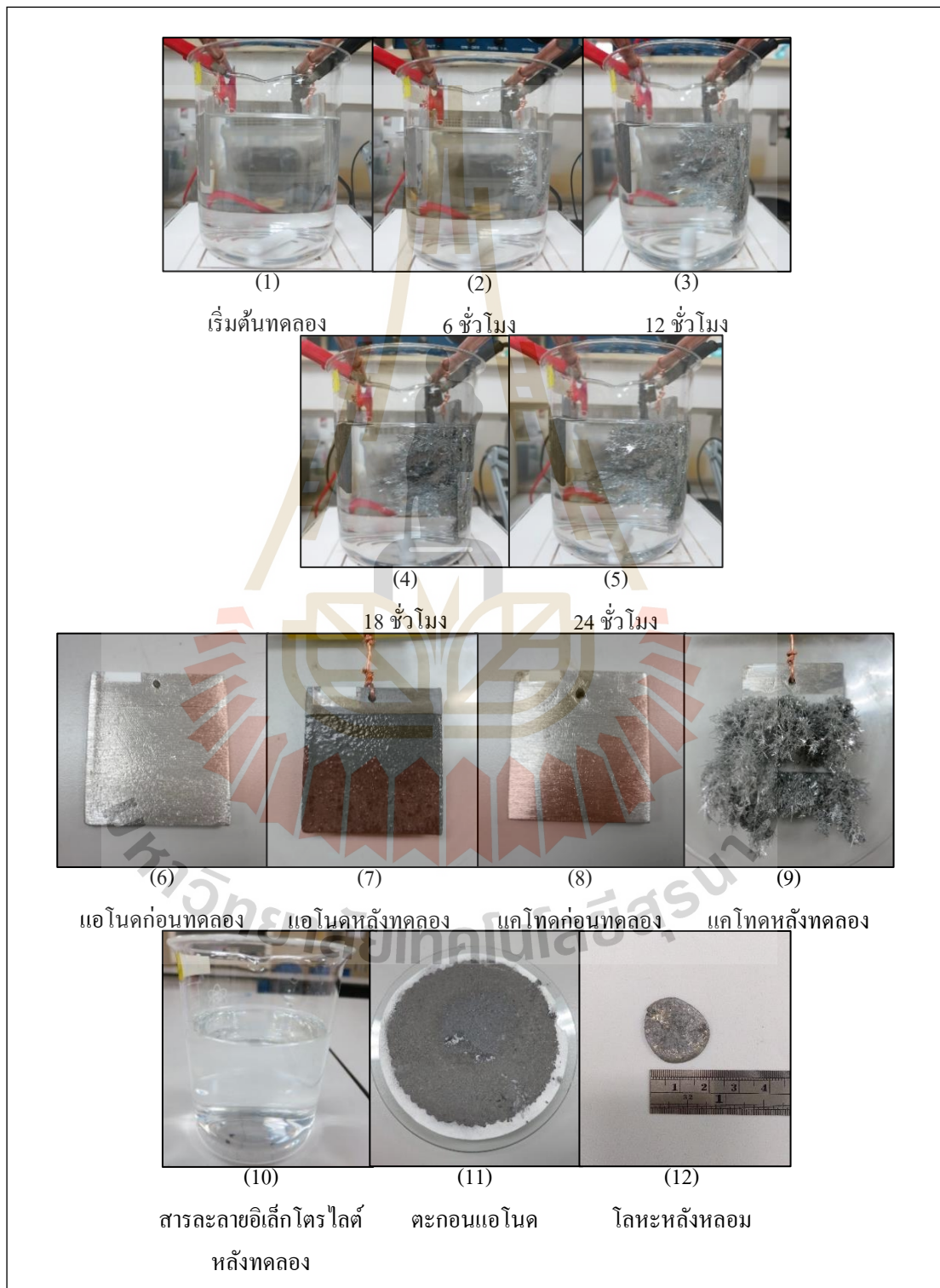


สภาวะการทดลองที่ 18

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.20 V

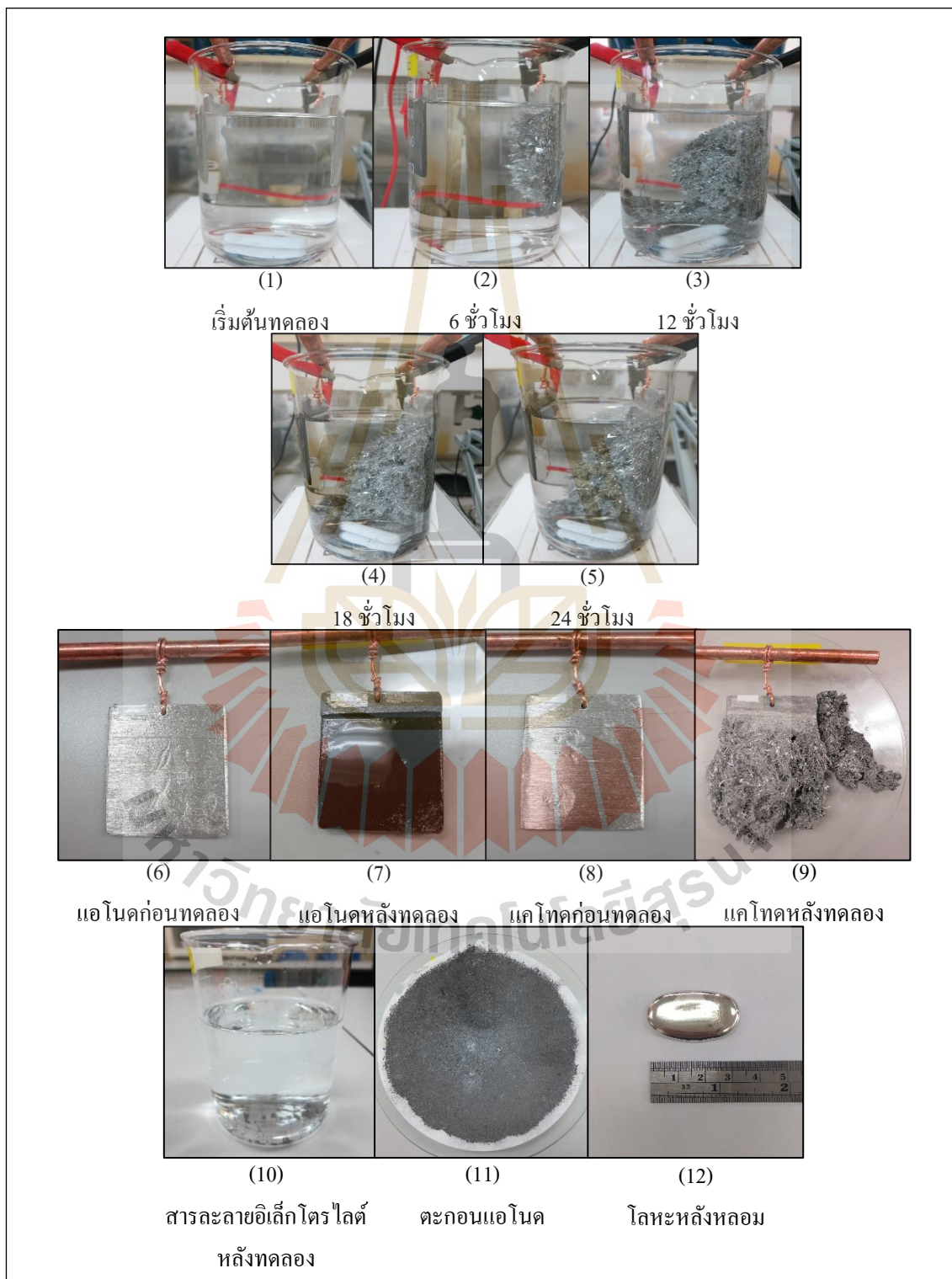


สภาวะการทดลองที่ 19

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.40 V



สภาวะการทดลองที่ 20

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M

แอโนดชนิด SnCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.60 V

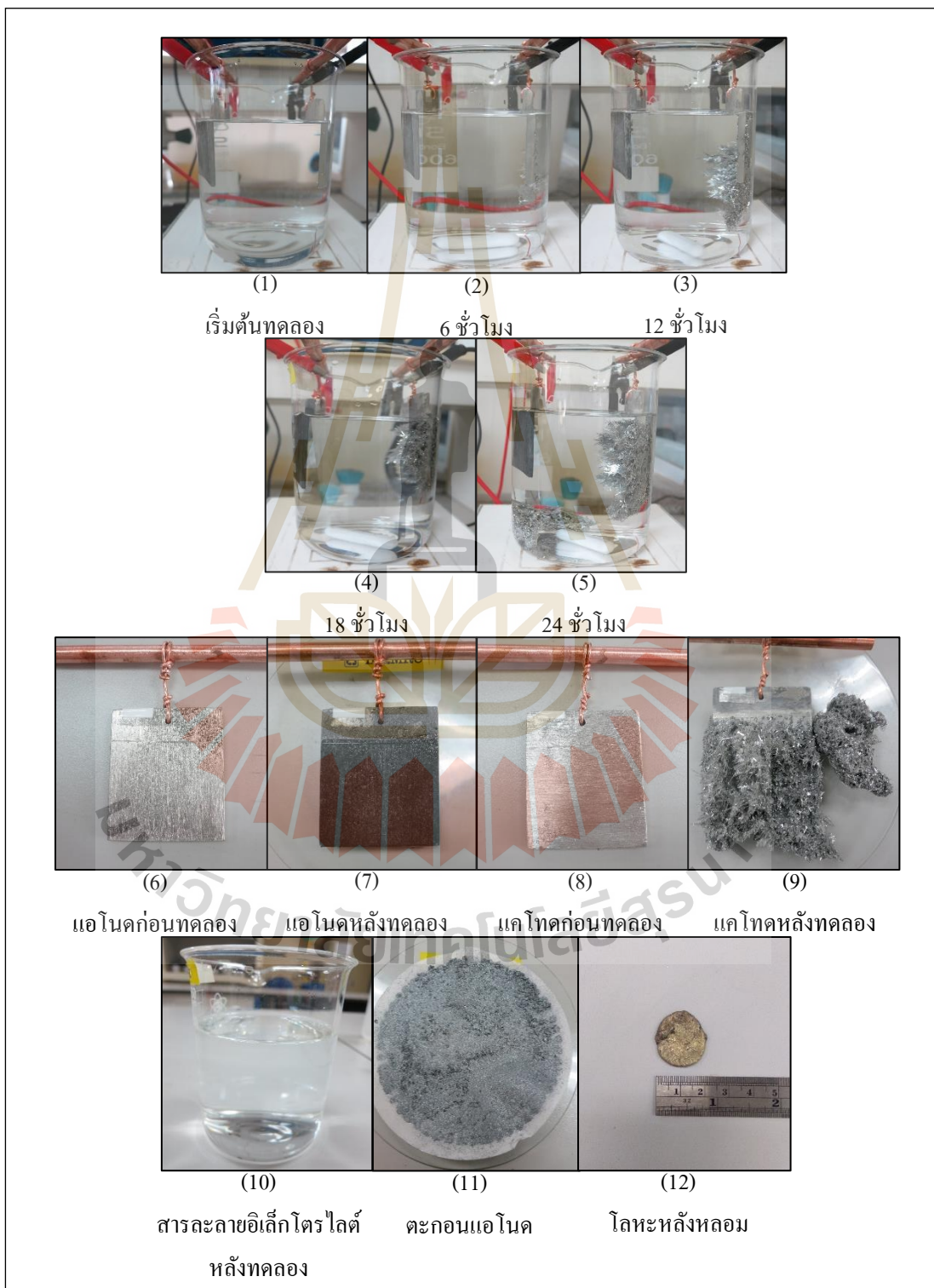


สภาวะการทดลองที่ 21

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.15 V

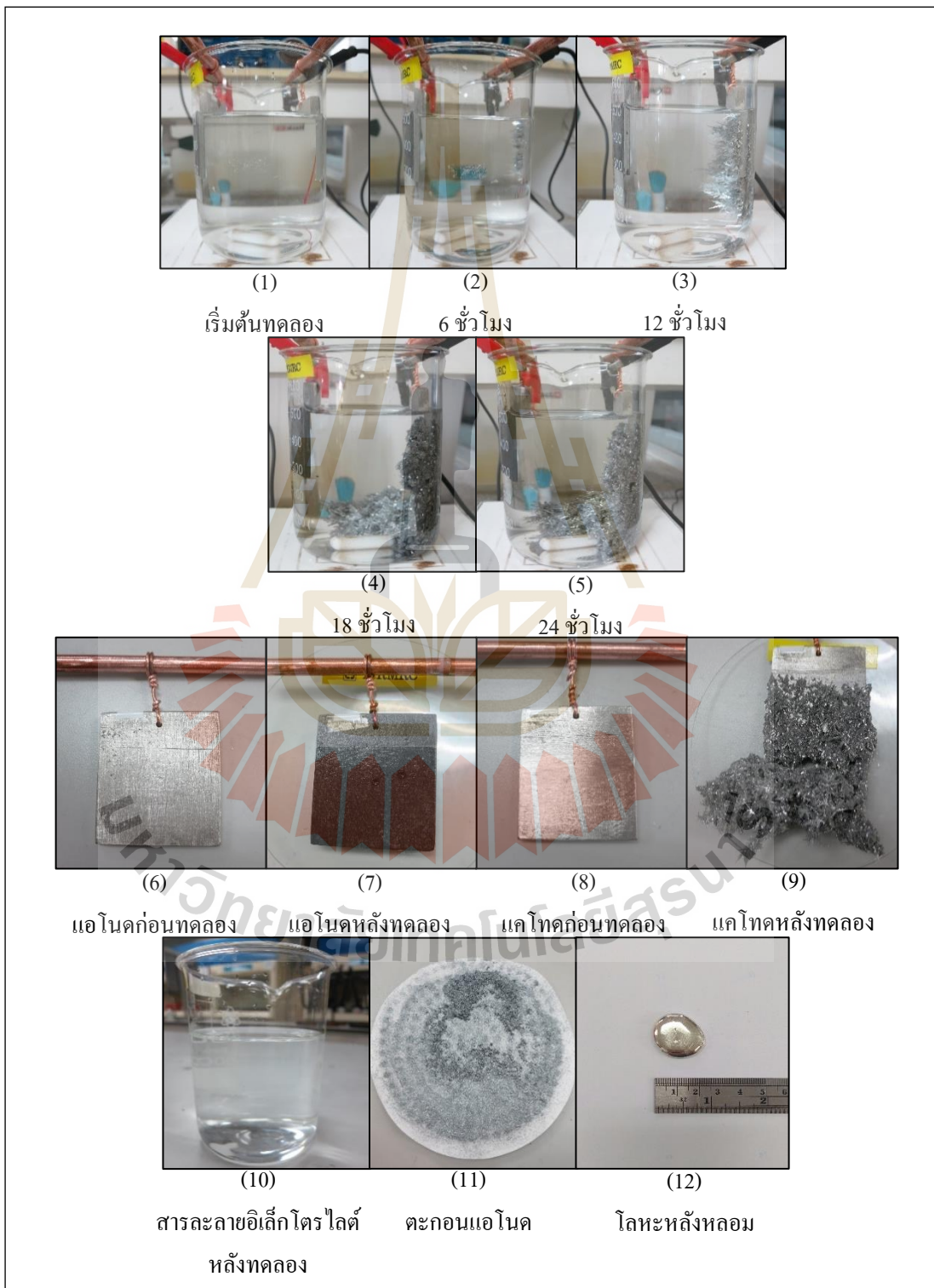


สภาวะการทดลองที่ 22

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.20 V

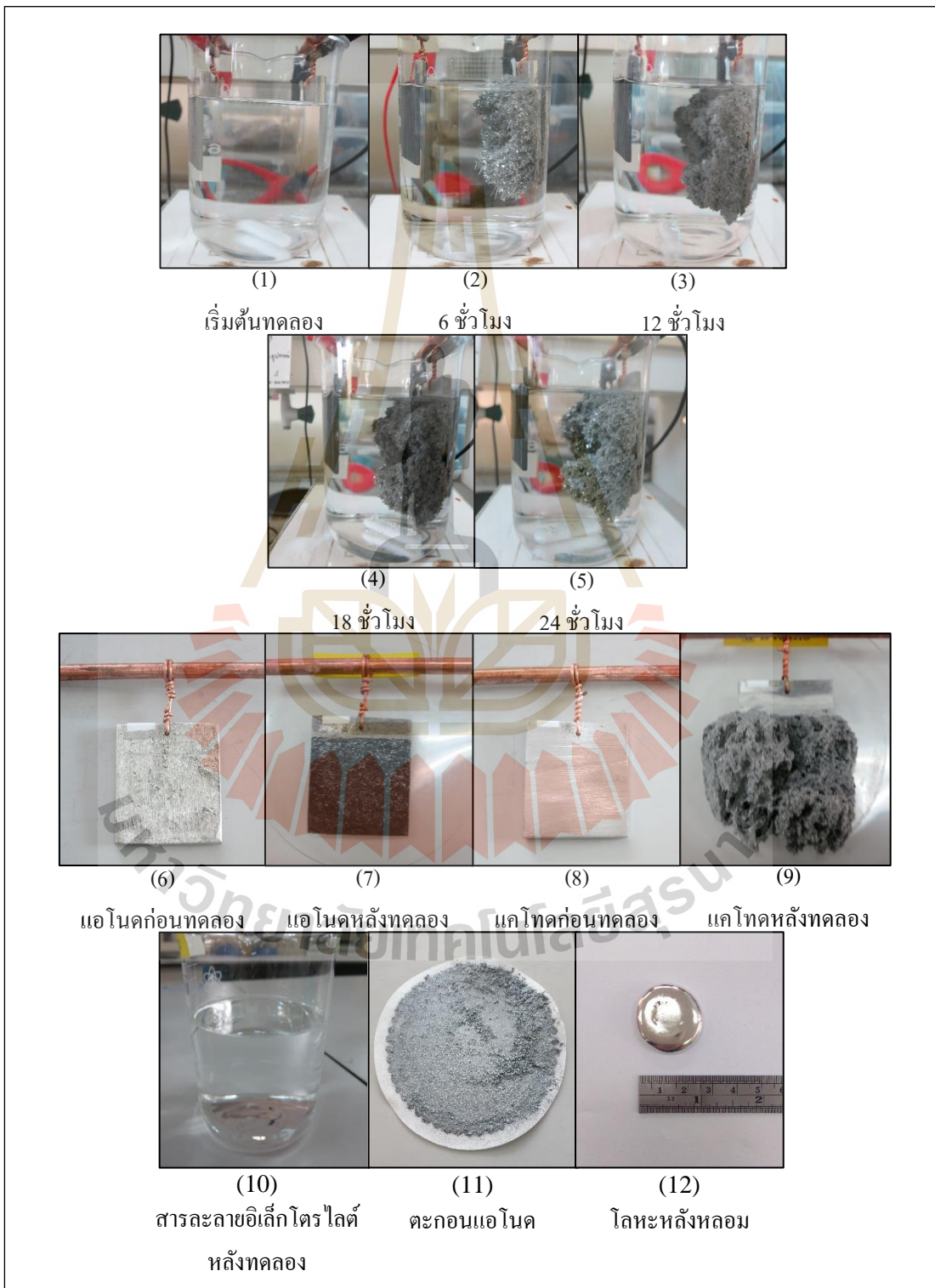


สภาวะการทดลองที่ 23

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.40 V



สภาวะการทดลองที่ 24

ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2.5 M

แอโนดชนิด SnAgCu

ศักย์ไฟฟ้า 0.60 V





ภาคผนวก ข

ผลการทดลองและผลการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ไฟนิ่ง

ตาราง ข-1

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น สารละลายกรดซัลฟูริก (M)	ชนิด แอโนด	ศักย์ไฟฟ้า (V)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/cm ²)	น้ำหนักดีบุก เกาะที่แคโทด (g)
1	1.5 M	SnCu	0.15	0.12	3.49
2			0.20	0.22	9.84
3			0.40	0.36	17.13
4			0.60	0.47	20.95
5		SnAgCu	0.15	0.12	4.25
6			0.20	0.20	8.92
7			0.40	0.26	12.13
8			0.60	0.36	18.47
9	2.0 M	SnCu	0.15	0.23	6.57
10			0.20	0.33	13.01
11			0.40	0.57	24.98
12			0.60	0.60	28.21
13		SnAgCu	0.15	0.19	6.18
14			0.20	0.28	12.17
15			0.40	0.48	22.56
16			0.60	0.45	22.98
17	2.5 M	SnCu	0.15	0.23	7.32
18			0.20	0.40	15.83
19			0.40	0.58	28.70
20			0.60	0.72	34.62
21		SnAgCu	0.15	0.24	9.73
22			0.20	0.38	19.08
23			0.40	0.47	24.46
24			0.60	0.50	25.64

ตาราง ข-2

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น สารละลายกรดซัลฟูริก (M)	ชนิด แอโนด	ศักย์ไฟฟ้า (V)	ประสิทธิภาพ การใช้กระแสไฟ (%)	ปริมาณการใช้ พลังงาน (kWh/kg)
1	1.5 M	SnCu	0.15	54.59	0.12
2			0.20	83.95	0.11
3			0.40	89.31	0.20
4			0.60	83.67	0.32
5		SnAgCu	0.15	65.37	0.10
6			0.20	82.32	0.11
7			0.40	86.11	0.21
8			0.60	94.70	0.28
9	2.0 M	SnCu	0.15	53.62	0.13
10			0.20	74.00	0.12
11			0.40	82.26	0.22
12			0.60	88.25	0.31
13		SnAgCu	0.15	60.04	0.11
14			0.20	80.23	0.11
15			0.40	86.75	0.20
16			0.60	94.26	0.28
17	2.5 M	SnCu	0.15	59.74	0.11
18			0.20	74.28	0.12
19			0.40	92.88	0.19
20			0.60	90.25	0.30
21		SnAgCu	0.15	74.83	0.09
22			0.20	92.68	0.10
23			0.40	96.06	0.18
24			0.60	94.65	0.28

ตาราง ข-3

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น สารละลายกรดซัลฟูริก (M)	ชนิด แอโนด	ศักย์ไฟฟ้า (V)	ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะ เกาะที่แคโทด (wt%)		
				Sn	Ag	Cu
1	1.5 M	SnCu	0.15	99.98	0.00029	0.0017
2			0.20	99.99	0.00094	0.0041
3			0.40	99.99	0.00062	0.0055
4			0.60	99.79	0.00180	0.1960
5		SnAgCu	0.15	99.99	0.00018	0.0004
6			0.20	99.99	0.00310	0.0005
7			0.40	99.91	0.00439	0.0866
8			0.60	99.48	0.00700	0.4030
9	2.0 M	SnCu	0.15	99.99	0.00009	0.0007
10			0.20	99.99	0.00008	0.0004
11			0.40	99.85	0.00092	0.1370
12			0.60	99.60	0.00013	0.3800
13		SnAgCu	0.15	99.99	0.00021	0.0019
14			0.20	99.99	0.00080	0.0019
15			0.40	99.98	0.00060	0.0128
16			0.60	99.40	0.00280	0.5750
17	2.5 M	SnCu	0.15	99.99	0.00060	0.0014
18			0.20	99.99	0.00015	0.0006
19			0.40	99.85	0.00041	0.1420
20			0.60	99.55	0.00047	0.4270
21		SnAgCu	0.15	99.99	0.00100	0.0005
22			0.20	99.99	0.00150	0.0007
23			0.40	99.50	0.00390	0.4830
24			0.60	99.43	0.00480	0.5480

ตาราง ข-4

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น สารละลายกรดซัลฟูริก (M)	ชนิด แอโนด	ศักย์ไฟฟ้า (V)	ปริมาณโลหะในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ (mg/L)		
				Sn	Ag	Cu
1	1.5 M	SnCu	0.15	24.60	0.022	0.039
2			0.20	27.41	0.141	0.257
3			0.40	54.08	0.191	0.607
4			0.60	82.91	0.521	1.457
5		SnAgCu	0.15	32.58	0.006	0.002
6			0.20	36.50	0.133	0.034
7			0.40	42.02	0.236	0.123
8			0.60	61.30	0.724	0.281
9	2.0 M	SnCu	0.15	98.37	0.034	0.022
10			0.20	102.2	0.134	0.093
11			0.40	140.3	0.145	0.291
12			0.60	145.6	0.551	0.865
13		SnAgCu	0.15	48.35	0.015	0.011
14			0.20	43.29	0.130	0.010
15			0.40	41.27	0.856	0.193
16			0.60	52.05	0.897	0.375
17	2.5 M	SnCu	0.15	95.04	0.036	0.067
18			0.20	120.4	0.129	0.061
19			0.40	133.5	0.264	0.091
20			0.60	188.1	0.667	0.237
21		SnAgCu	0.15	60.54	0.044	0.060
22			0.20	101.6	0.121	0.188
23			0.40	119.1	0.821	0.203
24			0.60	191.0	0.939	0.389

ตาราง ข-5

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น สารละลายกรดซัลฟูริก (M)	ชนิด แอโนด	ศักย์ไฟฟ้า (V)	ส่วนประกอบทางเคมีของตะกอน ที่แอโนด (mass%)		
				Sn	Ag	Cu
1	1.5 M	SnCu	0.15	77.754	-	17.357
2			0.20	61.004	1.537	35.128
3			0.40	53.035	2.111	42.664
4			0.60	56.317	2.042	38.436
5		SnAgCu	0.15	53.352	10.410	21.939
6			0.20	48.982	30.593	17.823
7			0.40	24.493	52.428	21.874
8			0.60	33.097	59.088	5.868
9	2.0 M	SnCu	0.15	-	-	-
10			0.20	58.874	1.838	37.953
11			0.40	53.031	2.633	42.068
12			0.60	45.656	5.497	44.316
13		SnAgCu	0.15	68.091	10.166	19.823
14			0.20	47.531	35.377	15.806
15			0.40	47.375	43.716	7.747
16			0.60	27.865	66.184	3.731
17	2.5 M	SnCu	0.15	57.264	1.485	38.664
18			0.20	57.324	2.197	37.801
19			0.40	54.137	2.359	39.960
20			0.60	59.683	3.463	29.083
21		SnAgCu	0.15	51.598	28.897	17.316
22			0.20	49.906	31.524	16.867
23			0.40	48.143	45.672	4.680
24			0.60	30.849	64.788	1.061



ภาคผนวก ค

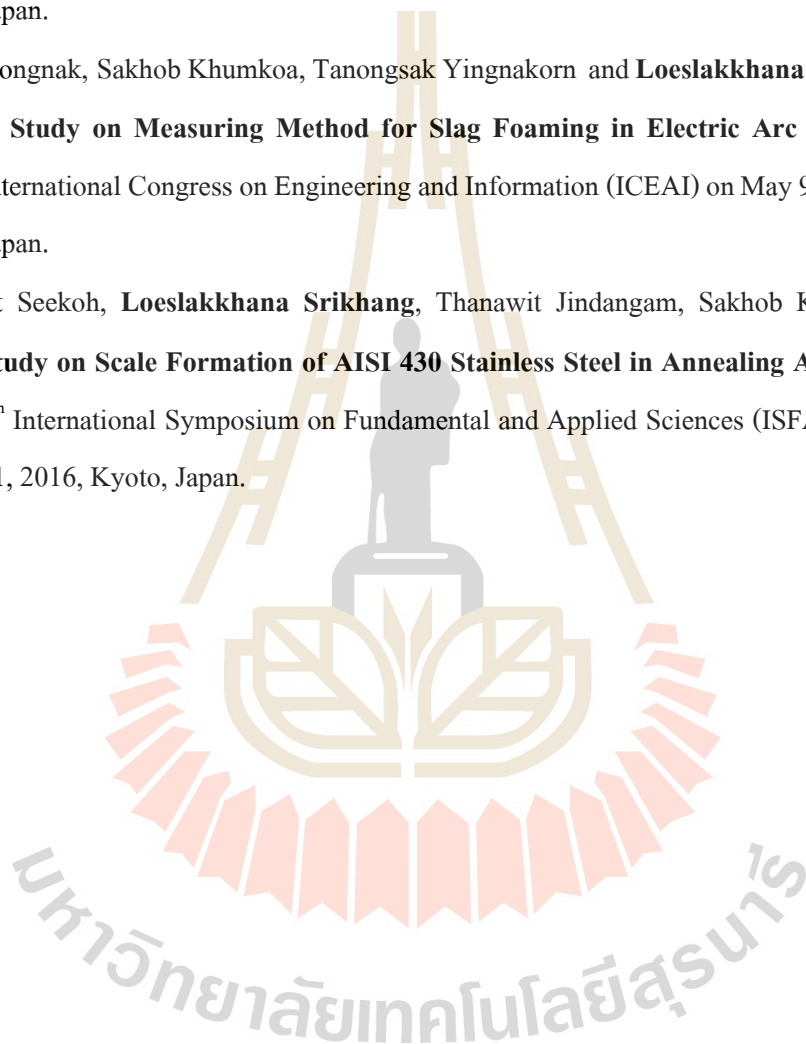
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Loeslakkhana Srihang, Sakhob Khumkoa, Panya Buahombura, and Narong Akkarapattanagoon (2017). **A Study on Recycling of Tin from Solder Wire Scrap by Electrorefining**, The 7th International Congress on Engineering and Information (ICEAI) on May 9-11, 2017, Kyoto, Japan.

Siam Thongnak, Sakhob Khumkoa, Tanongsak Yingnakorn and **Loeslakkhana Srihang** (2017). **A Study on Measuring Method for Slag Foaming in Electric Arc Furnace**, The 7th International Congress on Engineering and Information (ICEAI) on May 9-11, 2017, Kyoto, Japan.

Thanakit Seekoh, **Loeslakkhana Srihang**, Thanawit Jindangam, Sakhob Khumkoa, (2016). **Study on Scale Formation of AISI 430 Stainless Steel in Annealing Atmospheres**. The 4th International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) on March 29-31, 2016, Kyoto, Japan.



ICEAI-0033**A Study on Recycling of Tin from Solder Wire Scrap by Electrorefining**Loeslakkhana Srikhang | *Suranaree University of Technology*Sakhob Khumkoa | *Suranaree University of Technology*Panya Buahombura | *Suranaree University of Technology*Narong Akkarapattanaoorn | *Suranaree University of Technology***A Study on Recycling of Tin from Solder Wire Scrap by Electrorefining**

Loeslakkhana Srikhang ^a, Sakhob Khumkoa ^b,
 Panya Buahombura ^c, Narong Akkarapattanaoorn ^d

School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of
 Technology, Thailand

E-mail: aswerty22@hotmail.com^a, sakhob@sut.ac.th^b, panya_b@sut.ac.th^c, narong@sut.ac.th^d

Abstract

Solder waste contains lots of valuable metals like Sn, Ag and Cu. This type of waste has generally been considered to be tin metal and suitable for recovery using electrolysis process. The aim of this study is to recover pure tin from solder waste using the electrorefining method. By varying the electrolysis parameters, such as type of raw materials, concentration of electrolysis solution and voltage level of the electrolysis cell. The basic principle of electrorefining is to dissolve a desired metal contained in an anode into electrolysis solution, when the cell is applied a suitable voltage the desired metal ion in the solution will be deposited at the cathode. This method is general applied to produce pure metal from the solution. For this study, lead free solid solder waste composed of 96.5Sn-2.85Ag-0.471Cu as SnAgCu and 99.3Sn-0.108Ag-0.485Cu as SnCu were used as raw materials. These materials were melted and subsequently cast to be an anode of electrolysis cells. Electrolysis cells compose of anode, cathode and electrolytic solution. Anode is made by casting solder waste, while cathode is made by pure tin. Sulfuric acid with a different concentration of 1.5-2.5 M is used as electrolytic solution. The electricity is applied using a DC power supply, by varying voltage between 0.15-0.6 volts for 24 hours. The chemical composition of the raw materials and product deposited at cathode is analyzed using an emission spectrometer. Preliminary results indicated that both the electrorefining cell using SnAgCu and SnCu as anode, deposition of tin at the cathode is increased with increasing cell voltage and electrolytic solution concentration. SnCu anode caused the deposition of tin at the cathode to be higher than that of SnAgCu anode for all ranges of voltage. The deposition of pure tin at the cathode is observed when the applied voltage does not exceed 0.2 volts for SnCu anode and 0.4 volts for SnAgCu anode. When the applied voltage exceeds 0.2 volts for SnCu anode and 0.4 volts for SnAgCu anode, this caused a higher deposition of tin at the cathode, but the purity of the tin is decreased. Lowest purity of tin in electrolytic solution is observed when the applied voltage is 0.15 volts, as well as the

deposition of tin being decreased.

Keywords: Solder Waste, Recycling of Tin, Electrorefining

1. Background/Objectives and Goals

Normally, the solder alloy is characterized by a lower melting point. Soldering is a normal process in electronics industry and needs a low melting point of the solder material for the soldering process. For this purpose the eutectic alloy of 63 wt.%Sn-37 wt.%Pb with a melting point of 183°C has been normally used [1]. However, it is realized that lead is a toxic element and influential on a negative impact for health. By these reasons, lead-free solder alloys are widely used not only in the electronics industry but also in general purpose [2]. Sn-Cu (or SnCu) alloy and Sn-Ag-Cu (or SnAgCu) replace the Sn-Pb alloy and are commonly used in electronics industry [3]. Solder waste or the so-called solder dross in the soldering process by using SnCu or SnAgCu normally contains a high content of tin. High content tin solder wastes could be recycled to extract valuable metal, especially tin for further use as a raw material. To extract tin metal from solder waste, pyrometallurgy and electrometallurgy can be applied. Selective oxidation and sulfidization reaction for oxide/dross products are used as pyrorefining process. The limitations of this process are the multi-step method and the high energy cost. Electrorefining method can be applied to refine the solder waste containing tin to pure tin metal in one step. The feature of this method is inexpensive of electrical consumption, because only lower cell voltage is needed to dissolve a desired metal contained in anode into electrolysis solution [4]. The current density is the term used to indicate the intensity of current transferred to a specific area of the cathode by amperes per square meter. Faraday's Law describes the production rate in any electrochemical operation; the law states that when one Faraday of charge is passed, one gram equivalent of metal will be reacted [5]. The aim of this study is to recover pure tin from solder waste using Electrorefining process by varying electrolysis parameters such as type of raw materials, concentration of electrolysis solution and voltage level of electrolysis cell.

2. Methods

Based on the framework of this study, lead free solid solder waste composed of 96.5 wt.%Sn-2.85 wt.%Ag-0.471 wt.%Cu designed as SnAgCu and 99.3 wt.%Sn-0.108 wt.%Ag-0.485 wt.%Cu designed as SnCu were used as raw materials. The chemical composition of these raw materials (or anode of electrolysis cell) are shown in Table 1. Electrolysis cells compose of anode, cathode and electrolytic solution. Anode is made of casted solder waste, while cathode is made of pure tin. The electrolytic solution was made up dissolving pure tin (anode) in sulfuric acid (H_2SO_4) by the electrolytic cell for 24 hours. Sulfuric acid with a different concentration of 1.5-2.5 M is used as electrolytic solution. All the chemicals used in this study were of analytical reagent grade. The electrorefining of tin was

achieved by circulation of the electrolytic solution at the room temperature using a magnetic stirrer. The anodes were cast by melting the lead free solid solder waste at 350°C and removing the dross. The cathode plate was cast of purified tin. The electrode plate was grounded with #180, #320 and #600 grit SiC abrasive paper. The immersed surface was 0.0045 m², the electricity was applied using a DC power supply by varying voltage between 0.15-0.6 volts for 24 hours. The chemical composition of raw materials and product deposited at cathode was analyzed using emission spectrometer. The metals in electrolytic solution were analyzed by the Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) method.

Table 1: Chemical composition of the raw materials used (wt.%)

Element	Anode material	
	SnAgCu	SnCu
Sn	96.5	99.3
Ag	2.850	0.108
Cu	0.471	0.485
Pb	0.0108	0.0306
Bi	0.0018	0.0102
Sb	0.0049	0.0068
Ni	0.0148	0.0172

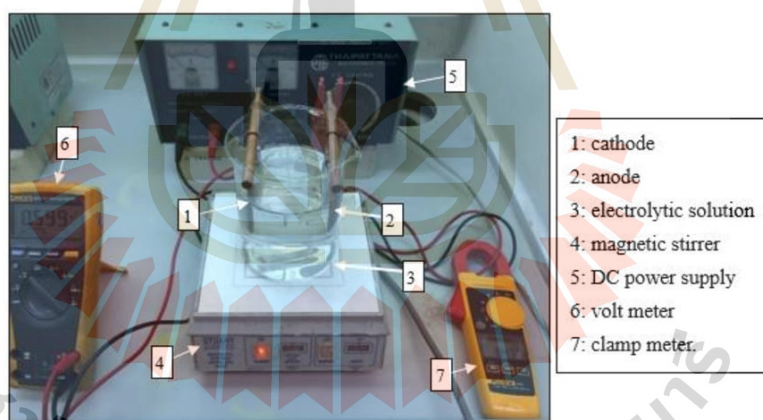


Fig. 1: The experimental electrorefining cell

The electrorefining equipment cell was set up as shown in Fig. 1. The equipment consist of cathode (1) and anode (2). These electrode were immersed in the electrolytic solution (3). The electrolytic solution is circulated by magnetic stirrer controlled by magnetic controller (4). DC

current is supplied to the electrolytic cell (5) by power supply through copper bus and the voltage of the cells is monitored Fluke 177 volt meter (6), while the cell current was monitored by Fluke 325 clamp meter (7). The metal deposition at cathode was characterized of needle shape as shown in Fig. 2.

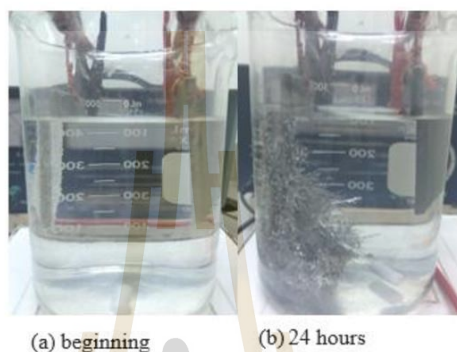


Fig. 2: Metal deposition at cathode in the electrorefining cell

3. Results

3.1 Effect of Electrolysis Parameters on Current Density

In the electrorefining process, the amount of metal deposited at cathode plate obeys Faraday's Law. Based on this study the voltage of 0.15-0.60 volts is applied to the cells contained in the electrolytic solution of 1.5-2.5 M H_2SO_4 . The cell is started when the DC current was supplied and current density of the cells shown in Fig. 3.

The variation of current density within the time of the test condition with electrolytic solution of 1.5 M H_2SO_4 and the variation of cell voltage of 0.15, 0.20, 0.40 and 0.60 volts for 24 hours is shown in Fig. 3(a) and (b). Initial current density of the cell with SnCu anode and SnAgCu anode is 6.67 A/m^2 and 11.11 A/m^2 , respectively. Current density will be increased by a higher voltage and longer time. The average current density of SnCu anode is 64.76, 86.35, 116.83 and 136.83 A/m^2 . It is higher than that of SnAgCu anode, 53.33, 76.83, 104.13 and 129.37 A/m^2 . The purity of tin of SnCu anode and SnAgCu anode is 99.3 and 96.5 wt.%, respectively. The variation of current density with time of electrolytic solution of 2.0 M and 2.5 M H_2SO_4 showed the positive correlation of current density with the voltage and time. Current density of SnCu anode is higher than that of current density of SnAgCu anode for every range of voltage. Increasing concentration of sulfuric acid will lead to increase of current density. High concentration of tin in SnSO_4 solution will be deposited at cathode faster, then the current is increased.

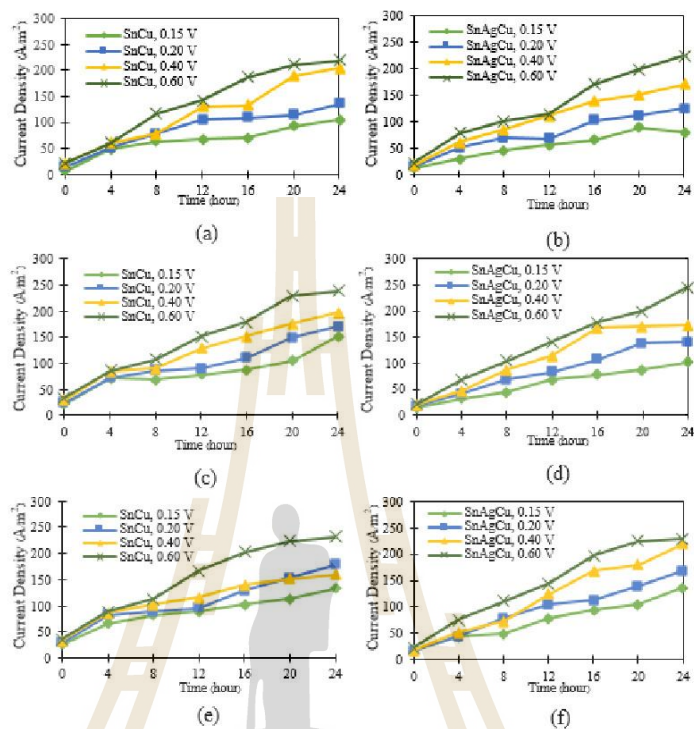


Fig. 3: Changes in the current density during electrorefining with
 (a) SnCu and (b) SnAgCu anode in 1.5 M H₂SO₄,
 (c) SnCu and (d) SnAgCu anode in 2.0 M H₂SO₄,
 (e) SnCu and (f) SnAgCu anode in 2.5 M H₂SO₄

3.2 Effect of Electrolysis Parameters on Deposition of Metal at Cathode

The deposition of metal at cathode of different test conditions is shown in Fig. 4. For the cell with SnCu anode and with 1.5 M of electrolytic solution, the deposition of tin at cathode is 15.634, 17.517, 27.477 and 30.532 g for the voltage of 0.15, 0.2, 0.4 and 0.6 volts, respectively. It is observed for both electrorefining cells with SnAgCu anode and SnCu anode, that the increase of electrolytic solution concentration increased the deposited amount of tin at the cathode. The deposition of tin at the cathode of the cell with SnCu is higher than that of the cell with SnAgCu anode for every electrolysis concentration and voltage level.

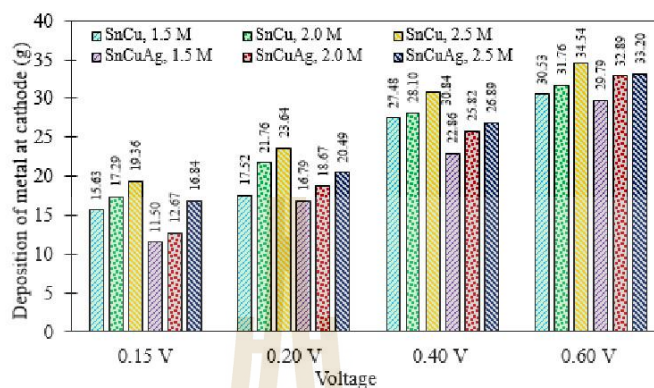


Fig. 4: Effects of raw material type, concentration of electrolysis solution and voltage on deposition of metal at cathode for 24 hours

3.3 Effect of Electrolysis Parameters on Chemical Composition of Metal at Cathode

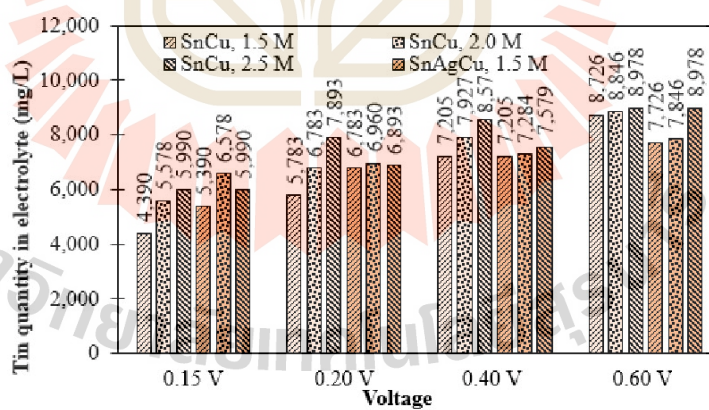
The applied voltage of the electrorefining cell will effect on the chemical composition or purity of the deposited metal at the cathode. The chemical composition of deposited metal was analyzed by using emission spectrometer and is shown in Table 2. It is observed that the amounts of copper and silver are increased by increasing the cell voltage and the concentration of sulfuric acid in the solution. The amount of copper for the cell with SnCu anode and with SnAgCu anode is 0.16100 and 0.19700 wt.%, respectively, for the applied voltage of 0.6 volts and of 2.5 M H₂SO₄. The amount of silver for the cell with SnCu anode and with SnAgCu anode is 0.00072 and 0.00110 wt.%, respectively for the applied voltage of 0.6 volts and of 2.5 M H₂SO₄. The amount of tin is 99.80 wt.%, for the cell with SnAgCu anode when applied voltage is 0.40 and 0.60 volts while the for cell with SnCu anode is 0.60 volts.

3.4 Effect of Electrolysis Parameters on Tin and Copper Quantity in Electrolyte

The concentration of sulfuric acid that is used as electrolyte are 1.5, 2.0 and 2.5 M H₂SO₄, the amounts of tin are 190, 370, and 574 mg/L respectively. After the cell is started for 24 hours for every voltage level, increasing the concentration of electrolytic, increased the amount of tin in solution for both types of anodes, Fig. 5(a). The change of copper in electrolyte is the same as in the case of tin. It is found that increasing the concentration of electrolytic, increased the amount of copper in the solution for both types of anodes, Fig. 5(b). Based on the above result, it can be observed that dissolved of metal ion from anode is influenced by applied voltage. Theoretically, the standard electrode potential (E°) of metal must be taken into consideration. E° of tin, copper and silver are -0.136, +0.337 and +0.799 volts, respectively. It can be found that E° of silver is higher than that of the applied voltage used in this experiment, 0.15-0.60 volts, thus, silver will not be dissolved from the anode into the solution.

Table 2: Chemical composition of the deposited metal at cathode (wt.%)

Anode	Concentration of H ₂ SO ₄ in electrolyte	Voltage	Element		
			Sn	Cu	Ag
SnCu	1.5 M	0.15 V	99.99	0.00037	0.00017
		0.20 V	99.99	0.00040	0.00018
		0.40 V	99.99	0.00042	0.00028
		0.60 V	99.80	0.14100	0.00059
	2.0 M	0.15 V	99.99	0.00040	0.00021
		0.20 V	99.99	0.00024	0.00029
		0.40 V	99.99	0.00045	0.00031
		0.60 V	99.80	0.15400	0.00064
	2.5 M	0.15 V	99.99	0.00041	0.00024
		0.20 V	99.99	0.00027	0.00031
		0.40 V	99.99	0.00470	0.00044
		0.60 V	99.80	0.16100	0.00072
SnCuAg	1.5 M	0.15 V	99.99	0.00012	0.00012
		0.20 V	99.99	0.00016	0.00012
		0.40 V	99.80	0.17900	0.00061
		0.60 V	99.80	0.18200	0.00097
	2.0 M	0.15 V	99.99	0.00018	0.00014
		0.20 V	99.99	0.00020	0.00016
		0.40 V	99.80	0.18100	0.00071
		0.60 V	99.80	0.19200	0.00101
	2.5 M	0.15 V	99.99	0.00020	0.00019
		0.20 V	99.99	0.00024	0.00020
		0.40 V	99.80	0.18500	0.00082
		0.60 V	99.80	0.19700	0.00110



(a)

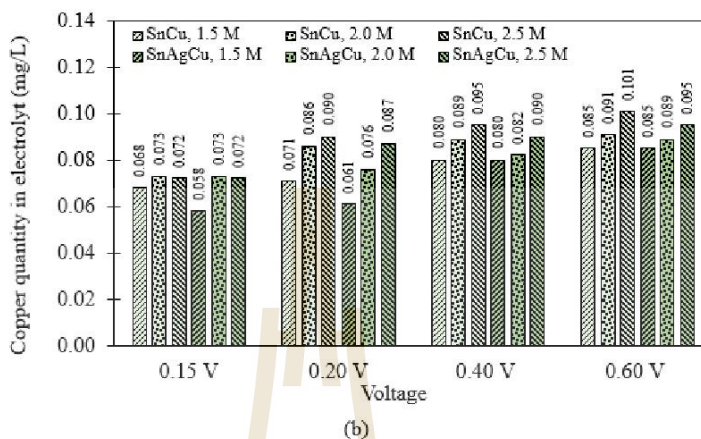


Fig. 5: Effects of raw material type, concentration of electrolysis solution and voltage on tin and copper quantity in electrolyte for 24 hours

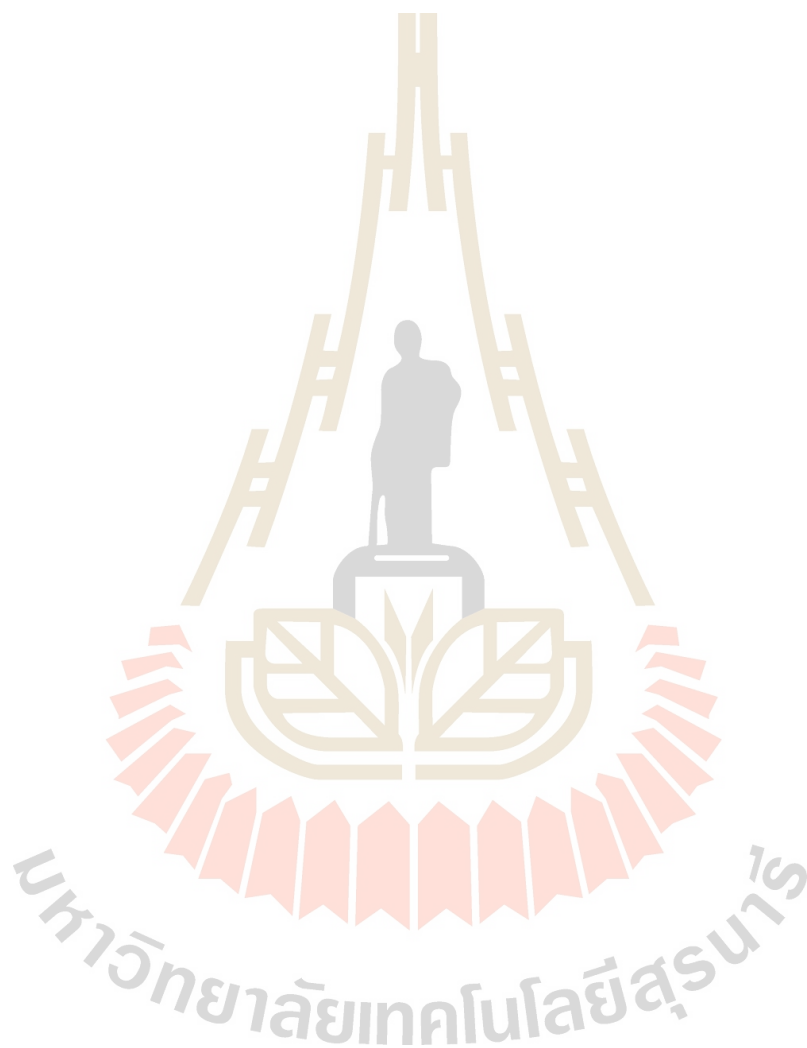
4. Conclusions

The effect of the solder dross type that is used as the anode raw materials for electrolytic cell, concentration of electrolysis solution and applied voltage level of electrolysis cell on the current density, deposition of tin at cathode, purity of tin at cathode and impurity quantity in electrolyte behavior are investigated. The results indicated that both electrorefining cells using SnAgCu and SnCu as anode, current density and deposition of tin at cathode are increased with increasing cell voltage and electrolytic solution concentration. SnCu anode caused the deposition of tin at cathode higher than that of SnAgCu anode for all range of voltage. The deposition of pure tin at cathode is observed when the applied voltage does not exceed 0.2 volts for SnCu anode and 0.4 volts for SnAgCu anode. When the applied voltage does exceed 0.2 volts for SnCu anode and 0.4 volts for SnAgCu anode, this caused higher deposition of tin at cathode but purity of the tin is decreased. Lowest copper in electrolytic solution is observed when the applied voltage is 0.15 volts, as well as the deposition of tin is decreased.

5. References

- [1] Sung, K.K. (2001), Recent Progress in Pb-free Solders and Soldering Technologies, JOM, pp.16
- [2] Kyoungkeun, Y., Jae-chun, L., Kwang-sek, L., Byung-su, K., Min-seuk, K., Soo-kyoung, K. and B. D. P. (2012), Recovery of Sn, Ag and Cu from Waste Pb-Free Solder Using Nitric Acid Leaching, Materials Transactions, Vol. 53, No. 12, pp. 2175-2180
- [3] Cui, J., Zhang, L. (2008), Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. J. Hazard. Mater. pp. 158-228

- [4] Mantell, C.L. (1949), Tin Its Mining, Production, Technology and Application, Am. Chemical Soc. Monograph Series No. 51, 2nd Ed., pp. 170-183
- [5] Krauss C. J. (1976), Cathode Deposit Control in Lead Electrorefining, Journal of Metals, pp. 4-9



ประวัติผู้เขียน

นางสาวเลิศลักษณ์ ศรีคลัง เกิดเมื่อ 22 มกราคม พ.ศ. 2534 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนชุมชนประทาย ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนประทาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนเมืองพลพิทยาคม จังหวัดขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2551 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2555 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557 โดยได้รับทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยมีบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ดังนี้

- (1) **Loeslakkhana Srikhang**, Sakhob Khumkoa, Panya Buahombura, and Narong Akkarapattanagoon (2017). **A Study on Recycling of Tin from Solder Wire Scrap by Electrorefining**, The 7th International Congress on Engineering and Information (ICEAI) on May 9-11, 2017, Kyoto, Japan.
- (2) Siam Thongnak, Sakhob Khumkoa, Tanongsak Yingnakorn and **Loeslakkhana Srikhang** (2017). **A Study on Measuring Method for Slag Foaming in Electric Arc Furnace**, The 7th International Congress on Engineering and Information (ICEAI) on May 9-11, 2017, Kyoto, Japan.
- (3) Thanakit Seekoh, **Loeslakkhana Srikhang**, Thanawit Jindangam, Sakhob Khumkoa, (2016). **Study on Scale Formation of AISI 430 Stainless Steel in Annealing Atmospheres**. The 4th International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) on March 29-31, 2016, Kyoto, Japan.