

การเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยวิธีการหลอมแบบรีดักชัน



นางสาวพรไพฑูรย์ เหล่าสมบัติทวี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

METALS RECOVERY FROM ELECTRONIC WASTE BY REDUCTION MELTING METHOD

Miss Pornpaitoon Laosombatthawee



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering

Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยวิธีการ หลอมแบบรีดักชัน
โดย	นางสาวพรไพฑูรย์ เหล่าสมบัติทวี
สาขาวิชา	วิศวกรรมทรัพยากรธรณี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วีวรรณนะเดช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.สุจาริณี คชวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วีวรรณนะเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.สุจาริณี คชวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ทรงวุฒิ อาทิตย์ทอง)

พรไพฑูรย์ เหล่าสมบัติทวี : การเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดย
วิธีการหลอมแบบรีดักชัน (METALS RECOVERY FROM ELECTRONIC WASTE BY
REDUCTION MELTING METHOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ดาวัลย์ วิ
วรรณะเดช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร.สุจาริณี คชวัฒน์, หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งทำการศึกษาศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการหลอมแบบรีดักชันเพื่อเก็บกลับคืนโลหะ
จากขยะอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งนับวันจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยแหล่งของขยะอิเล็กทรอนิกส์ใน
งานวิจัยนี้ คือ จอซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ขั้นตอนการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาสภาวะ
ที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ที พบว่า ณ อุณหภูมิการหลอมที่ 1200
องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ร่วมกับการคงอุณหภูมิในการแยกตัวของโลหะที่ 500 องศา
เซลเซียส ระยะเวลาในการแยกตัว 2 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บกลับคืน ผล
จากการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วออกไซด์ (PbO) ตกค้างในแก้วด้วยเทคนิค XRF (X-ray
Fluorescence) แสดงปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างที่ต่ำที่สุด ผลวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับปริมาณ
ของโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้ สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาขั้น
ต่อไป โดยประยุกต์ใช้ในการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และใช้
เทคนิค EPMA (Electron Probe Micro Analysis) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบที่เกิดขึ้น พบว่า
วิธีการหลอมแบบรีดักชันสามารถเก็บกลับคืนโลหะทองแดง ตะกั่ว และดีบุก อันเป็นองค์ประกอบ
ที่มีอยู่ในขยะอิเล็กทรอนิกส์ได้ในปริมาณสูง งานวิจัยนี้สามารถยืนยันได้ว่าวิธีการหลอมแบบ
รีดักชันเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา	วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมทรัพยากรธรณี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570304121 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: E-waste recycling / Reduction melting method / Metals recovery from e-wastes

PORNPAITON LAOSOMBATTHAWEE: METALS RECOVERY FROM ELECTRONIC WASTE BY REDUCTION MELTING METHOD. ADVISOR: ASSOC. PROF. DAWAN WIWATTANADATE, Ph.D., CO-ADVISOR: SUJARINEE KOCHAWATTANA, Ph.D., pp.

In this research, an application of reduction melting method for metal recovery from the electronic waste was evaluated. The study started with heat treatments of CRT (Cathode Ray Tube) glass at various temperatures in order to identify the optimal metal recovery condition. The % remaining PbO determined by XRF (X-ray Fluorescence) showed the lowest amount when heat treatment was performed at 1200°C for 1 hour coupled with annealing at 500°C for 2 hours. The results from XRF were in line with the the % Pb recovery results. The optimal heat treatment condition was then, applied to recover metals, e.g., Cu, Pb, Sn, from an example of electronic waste; CRT glass mixed with PCB (Printed Circuit Boards). By EPMA (Electron Probe Micro Analysis), it was found that the reduction melting method could recovery high amount of metals from electronic waste. In addition, % metal recovery increased with the PCB addition. The results from this research confirmed that reduction melting is one of promising methods for metal recovery from electronic waste.

Department: Mining and Petroleum Student's Signature

Engineering Advisor's Signature

Field of Study: Georesources Engineering Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่อง การเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยวิธีการหลอมแบบรีดักชัน จะไม่สามารถประสบความสำเร็จจูล่วงไปได้ หากขาดซึ่งคุณูปการจากบุคคลและหน่วยงานดังกล่าวต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณะเดช อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

อาจารย์ ดร. สุจาริณี คชวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำในกระบวนการทดลองพร้อมทั้งเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้สนับสนุนด้านเงินทุนสำหรับดำเนินงานวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ประเทศญี่ปุ่น ที่มอบทุนแลกเปลี่ยนเพื่อการวิจัยและศึกษาดูงาน พร้อมทั้งให้ความรู้จุดประกายงานวิจัยในครั้งนี้

ตลอดจน บิดามารดา อาจารย์ทุกท่าน บุคลากรและเพื่อนทุกคน ทั้งจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิตินิติผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความกรุณาและความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยมา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 คำจำกัดความ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 ลำดับและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับขยะอิเล็กทรอนิกส์.....	4
2.2 จอซีอาร์ที หรือ จอโทรทัศน์ (Cathode Ray Tube : CRT).....	6
2.2.1 การทำงาน โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไป.....	6
2.2.2 การจัดการจอซีอาร์ทีในปัจจุบัน.....	8
2.3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Boards : PCB).....	8
2.3.1 รูปแบบและองค์ประกอบของแผงวงจร.....	8
2.3.2 ประเภทของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	9
2.3.2.1 Single Sided Board	9
2.3.2.2 Double Sided Board.....	10

2.3.2.3 Multi Layered Board.....	11
2.3.2.4 Flexible Board	12
2.3.3 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	13
2.4 กระบวนการในการเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไป	14
2.4.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Process).....	14
2.4.2 กระบวนการทางความร้อน (Pyrometallurgy).....	15
2.4.3 กระบวนการทางสารละลายเคมี (Hydrometallurgy).....	16
2.4.4 กระบวนการทางไฟฟ้า (Electrometallurgy).....	16
2.4.4.1 Electrowinning.....	16
2.4.4.2 Electrorefining	17
2.4.5 กระบวนการทางชีวภาพ (Biometallurgy)	17
2.4.5.1 การชะด้วยจุลินทรีย์ (Bioleaching).....	18
2.4.5.2 การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption).....	18
2.5 การหลอมแบบรีดักชัน (Reduction Melting).....	18
2.6 แผนภาพเอลลิงแฮม (Ellingham Diagrams).....	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูล	25
3.2 สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์.....	25
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	28
ส่วนที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกตัวของโลหะจากแก้วซีอาร์ที.....	28
ส่วนที่ 2 ประยุกต์ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะจากส่วนผสมของแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	29

3.4 ผังสรุปขั้นตอนการทดลอง.....	31
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	32
4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วซีอาร์ทึ่จากจอกแก้วซีอาร์ทึ่	32
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ทึ่	33
4.2.1 ผลการศึกษาปริมาณโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้จากแก้วซีอาร์ทึ่ ณ สภาวะ ต่างๆ.....	33
4.2.2 ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทึ่ที่สภาวะต่างๆ	34
4.3 ผลการศึกษาชิ้นงานโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้	38
4.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของชิ้นงานโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้จากแก้วซีอาร์ทึ่	38
4.3.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบในชิ้นงานโลหะตะกั่วด้วยเทคนิค EPMA (Electron Probe Micro Analysis).....	39
4.4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบในชิ้นโลหะที่เก็บกลับคืนได้จากแก้วซีอาร์ทึ่และแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะเหมาะสม ด้วยเทคนิค EPMA.....	44
4.4.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทึ่เปรียบเทียบกับองค์ประกอบทาง เคมีในแก้วที่ได้จากแก้วซีอาร์ทึ่และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะเหมาะสม.....	48
4.4.4 การศึกษาแนวโน้มปริมาณโลหะจากการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทึ่และ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	50
รายการอ้างอิง	51
ภาคผนวก.....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	70

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ.2551-2555	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของจอซีอาร์ที.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Single Sided Board.....	9
รูปที่ 2.4 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Single Sided Board	9
รูปที่ 2.5 โครงสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Double Sided Board	10
รูปที่ 2.6 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Double Sided Board	10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Multi Layered Board.....	11
รูปที่ 2.8 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Multi Layered Board	11
รูปที่ 2.9 โครงสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Flexible Board	12
รูปที่ 2.10 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Flexible Board.....	12
รูปที่ 2.11 แผนภาพเอลลิงแฮม (Ellingham Diagrams)	20
รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพเอลลิงแฮมในช่วงของตะกั่วออกไซด์.....	21
รูปที่ 2.13 กระบวนการเก็บกลับคืนโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	24
รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นส่วนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	29
รูปที่ 3.2 การลดขนาดแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	29
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงปริมาณร้อยละในการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ทีที่สภาวะต่างๆ ...	33
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างในแก้วซีอาร์ทีที่สภาวะต่างๆ	35
รูปที่ 4.3 กราฟสัดส่วนความสัมพันธ์ของปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างเทียบกับปริมาณโลหะ ตะกั่ว ที่สามารถเก็บกลับคืนได้.....	36
รูปที่ 4.4 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการเก็บกลับคืน ณ สภาวะต่างๆ	38
รูปที่ 4.5 ลักษณะแก้วและโลหะที่แยกได้	39

รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางชิ้นงานโลหะตะกั่ว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 20 เท่า .	39
รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนโลหะของชิ้นงานตะกั่ว	40
รูปที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนตะกั่วของชิ้นงาน	41
รูปที่ 4.9 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการเก็บกลับคืนที่อุณหภูมิการหลอม 1200 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิการแยกตัวของโลหะที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงในอัตราส่วนต่างๆ.....	42
รูปที่ 4.10 ลักษณะชิ้นงานโลหะที่แยกได้.....	43
รูปที่ 4.11 ลักษณะแก้วที่แยกได้	43
รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางชิ้นงานโลหะ (อัตราส่วนที่ 4 ; แก้วซีอาร์ที 30 กรัม : แผลงวงจระ 30 กรัม) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 18 เท่า	44
รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนที่ 1 ของโลหะในชิ้นงานที่ได้จากการเก็บกลับคืน ในแก้วซีอาร์ทีและแผลงวงจระอิเล็กทรอนิกส์.....	45
รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนที่ 2 ของโลหะในชิ้นงานที่ได้จากการเก็บกลับคืน ในแก้วซีอาร์ทีและแผลงวงจระอิเล็กทรอนิกส์.....	46
รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนตะกั่วของชิ้นงานที่ได้จากการเก็บกลับคืน ในแก้วซีอาร์ทีและแผลงวงจระอิเล็กทรอนิกส์	47
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบปริมาณโลหะออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแก้วจากกระบวนการเก็บกลับคืน ...	49

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสัดส่วนของวัสดุองค์ประกอบในขยะอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ	5
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของจอซีอาร์ที	7
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบโดยทั่วไปในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	13
ตารางที่ 2.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดต่างๆที่เป็นองค์ประกอบหลักในขยะอิเล็กทรอนิกส์ .	14
ตารางที่ 3.1 สภาวะอุณหภูมิในการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วจอซีอาร์ที	28
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนระหว่างแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	30
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทีด้วยเทคนิค XRF	32
ตารางที่ 4.2 น้ำหนักตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้ที่สภาวะต่างๆ.....	33
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทีด้วยเทคนิค XRF ณ สภาวะต่างๆ	34
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงถ่านไม้ด้วยเทคนิค XRF	37
ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานโลหะตะกั่วด้วยเทคนิค EPMA	40
ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานโลหะด้วยเทคนิค EPMA	44
ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในแก้วจากกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะ ด้วย เทคนิค XRF	48
ตารางที่ 4.8 รายละเอียดปริมาณการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ตามอัตราส่วนต่างๆ ณ สภาวะเหมาะสม	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยมีมากถึงปีละ 300,000 - 400,000 ตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) ซึ่งปริมาณดังกล่าวยังไม่นับรวมปริมาณของขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกเก็บไว้ตามบ้านเรือนและสำนักงานต่างๆ และคาดการณ์ว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นต่อไปในอนาคต

เป็นที่ทราบกันดีว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น สายไฟ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ เช่น โทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ มือถือ ฯลฯ ล้วนแต่มีองค์ประกอบหลักเป็นโลหะที่สำคัญทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก ตะกั่ว ทองแดง เงิน ทองคำ เป็นต้น ด้วยเหตุผลนี้ นักวิจัยจึงได้พยายามค้นคว้าและพัฒนาวิธีในการเก็บกลับคืนโลหะดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้หมุนเวียนในอุตสาหกรรมได้อีก ส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไม่จำเป็นต้องพึ่งพาโลหะเหล่านี้จากแหล่งปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะเป็นการช่วยลดพลังงานและค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปกับการนำแร่จากแหล่งแร่ปฐมภูมิมาผลิตเพื่อใช้งาน นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยลดปริมาณของขยะอิเล็กทรอนิกส์ในระบบให้น้อยลงอีกด้วย

จากบทความวิจัยที่ผ่านมา วิธีการเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์มี 2 เทคนิคหลักๆ คือ 1.) กระบวนการทางความร้อน (Pyrometallurgy) โดยการเผาขยะอิเล็กทรอนิกส์ ณ อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อแยกโลหะออกมา ความร้อนยังช่วยกำจัดเศษวัสดุที่ไม่ต้องการทิ้งไปอีกด้วย 2.) กระบวนการทางสารละลายเคมี (Hydrometallurgy) เป็นการแยกองค์ประกอบในขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้สารเคมีละลายแยกโลหะชนิดต่างๆ ให้ออกมาในรูปของสารละลาย วิธีดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สารเคมีอันตรายและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างนาน

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะพัฒนาการใช้กระบวนการทางความร้อนในการเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ โดยขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ จอโทรทัศน์หรือจอซีอาร์ที (Cathode Ray Tube : CRT) และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Boards : PCB) ซึ่งมีอยู่เป็นปริมาณมากในปัจจุบัน ผลสำเร็จจากการศึกษานี้จะทำให้สามารถนำโลหะที่มีอยู่ในขยะอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวกลับมาใช้หมุนเวียนในระบบ นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยลดปัญหาปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น นับเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการหลอมแบบรีดักชันในการเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ที
3. นำสภาวะเหมาะสมที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการเก็บกลับคืนโลหะจากส่วนผสมของแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหลอมแบบรีดักชัน (Reduction Melting Method) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการทางความร้อนในการเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยจะเน้นที่การศึกษาและวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการหลอมแบบรีดักชัน เพื่อเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากจอซีอาร์ทีเป็นอันดับแรก และจะนำสภาวะของการหลอมแบบรีดักชันที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการเก็บกลับคืนโลหะจากส่วนผสมของแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีปริมาณมากในปัจจุบันต่อไป

1.4 คำจำกัดความ

การรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์

การหลอมแบบรีดักชัน

การเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ช่วยลดปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีในระบบ
2. เพิ่มปริมาณในการเก็บกลับคืนโลหะจากแหล่งทุติยภูมิสู่ระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. สามารถใช้เป็นทางเลือกในการเก็บกลับคืนโลหะสู่ระบบอุตสาหกรรม

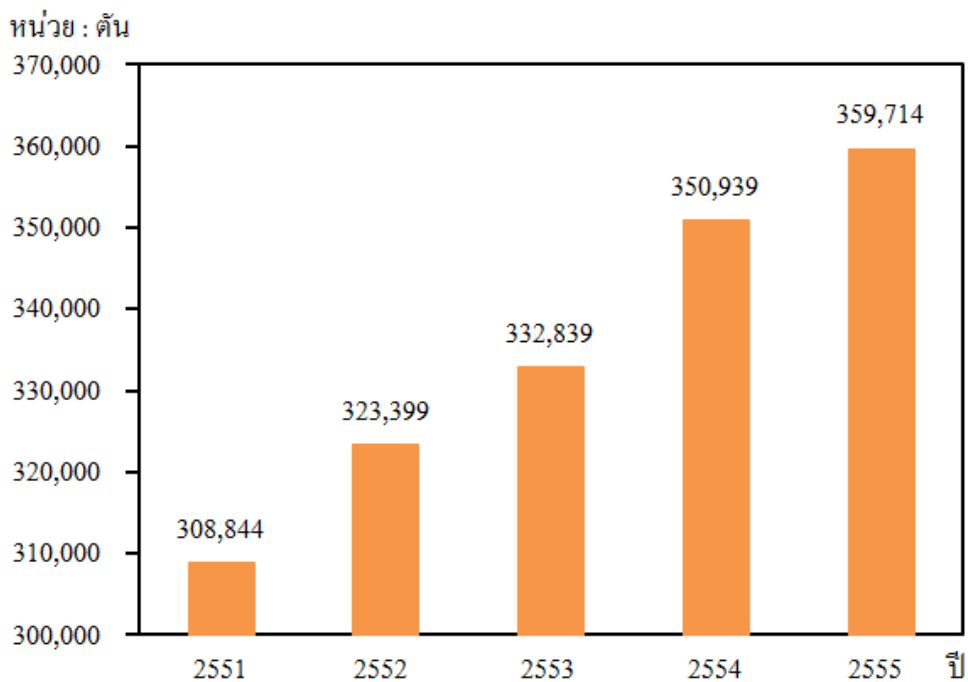
1.6 ลำดับและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงาน	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง								
2. ออกแบบและวางแผนการทดลอง								
3. ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะโดยวิธีการหลอมแบบรีดักชัน (Reduction Melting)								
4. ศึกษาและสังเกตผลที่ได้จากการทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะ								
5. นำสภาวะที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้ในการเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์								
6. วิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะที่สามารถเก็บกลับคืนได้จากวิธีการหลอมแบบรีดักชัน (Reduction Melting)								
6. ศึกษาผลการวิเคราะห์และสรุปผล								

บทที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับขยะอิเล็กทรอนิกส์

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic waste : E-waste) มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า ซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electrical and Electronic Equipment : WEEE) ซึ่งบัญญัติโดยกรมควบคุมมลพิษ ตามคำศัพท์ทางกฎหมายของสหภาพยุโรป โดยทั่วไป ความหมายของขยะอิเล็กทรอนิกส์ คือ ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งาน ซึ่งผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวได้แก่ โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ โทรศัพท์มือถือ แบตเตอรี่ ฯลฯ (สุจิตรา วาสนาดำรงดี และ ปเนต มโนมัยวิบูลย์, 2555) วัสดุเหล่านี้เมื่อเกิดความเสียหายหรือหมดสภาพการใช้งานก็จะถูกทิ้งเป็นขยะและถ้าหากขาดการกำจัดหรือจัดการที่เหมาะสมก็จะเกิดเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก ปริมาณของขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ.2551-2555

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2556)

ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่สั้นลง ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะการดำรงชีวิตของผู้คนในปัจจุบัน เพราะเมื่อมีเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาทุกคนต่างให้ความสนใจและต้องการเป็นเจ้าของจึงทำให้ผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์รุ่นเก่าที่ใช้มาไม่นานถูกทิ้งกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์อย่างรวดเร็ว

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบต่างๆ ในขยะอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด เพื่อประยุกต์นำองค์ประกอบเหล่านั้นกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตและพัฒนาในอุตสาหกรรมต่างๆต่อไป ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เลือกใช้ทำวิจัยในครั้งนี้คือ จอซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสัดส่วนของวัสดุองค์ประกอบในขยะอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ

วัสดุองค์ประกอบ	โทรทัศน์	คอมพิวเตอร์	โทรศัพท์มือถือ
โลหะ เช่น เหล็ก, ทองแดง, ตะกั่ว, ดีบุก, สังกะสี	26%	52%	24%
เซรามิกส์ เช่น แก้ว, วัสดุทนความร้อน	57%	25%	15%
พลาสติก เช่น โพลีคาร์บอเนต (PC), เอบี เอส (ABS)	12%	22%	40%
อื่นๆ เช่น กระดาษ, ไม้	5%	1	21%*

* สัดส่วนดังกล่าวรวมถึงแบตเตอรี่แบบอัดประจุใหม่

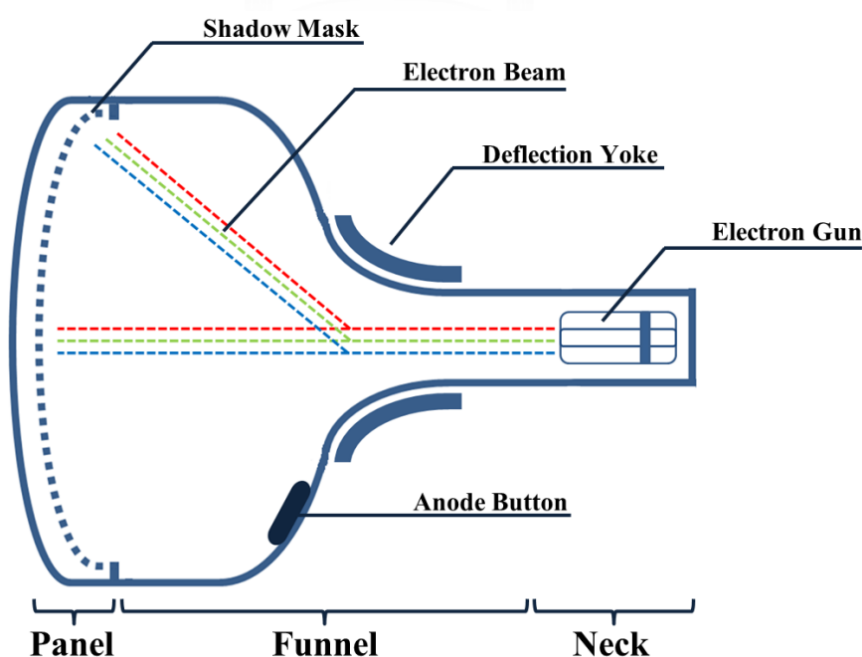
ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2551)

2.2 จอซีอาร์ที หรือ จอโทรทัศน์ (Cathode Ray Tube : CRT)

จอซีอาร์ทีเป็นจอภาพ (Visual Display Unit : VDU) ประเภทหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะการทำงานในรูปแบบการรับสัญญาณภาพแบบแอนะล็อก (Analog / Analogue) ซึ่งเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง แตกต่างจากสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องแบบสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในจอภาพแบบแอลซีดี (Liquid Crystal Display : LCD) (wikipedia, 2014b)

2.2.1 การทำงาน โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไป

การทำงานของจอซีอาร์ทีจะใช้หลอดแก้วแสดงผลขนาดใหญ่ เรียกว่า หลอดรังสีคาโทด (Cathode Ray Tube : CRT) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานหลายชนิด (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) ได้แก่ ปืนยิงอิเล็กตรอน (Electron gun) ทำหน้าที่สร้างลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam) แอโนดบัดตัน (Anode Button) ทำหน้าที่เร่งความเร็วอิเล็กตรอน ขดลวดหักเห (Deflection Yoke) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำเพื่อปรับทิศทางของลำแสงอิเล็กตรอนให้คงที่ และ ซาโดว์มาสก์ (Shadow mask) ซึ่งเป็นแผ่นโลหะที่มีรูขนาดเล็กช่วยทำให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ยิงมานั้นอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องและแม่นยำ เมื่อปืนยิงอิเล็กตรอนยิงลำแสงอิเล็กตรอนออกไปกระทบยังผิวของหน้าจอซึ่งมีสารฟอสฟอรัสอยู่ สารดังกล่าวจะถูกกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนทำให้เกิดการเรืองแสงและเกิดเป็นภาพขึ้น โดยในอดีตจอซีอาร์ทีจะมีปืนยิงอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียว ซึ่งเรียกว่า โมโนโครม (Monochrome) หรือจอขาวดำ แต่ปัจจุบันในจอซีอาร์ทีจะประกอบด้วยปืนยิงอิเล็กตรอน 3 ตัว คือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน หรือที่เรียกว่าจอสีนั่นเอง (ICF Incorporated, May,1999)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของจอซีอาร์ที

จากโครงสร้างและองค์ประกอบของจอซีอาร์ที จะสามารถแบ่งจอซีอาร์ทีได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ หลอดแก้ว (Neck) กรวยแก้ว (Funnel) และจอแก้ว (Panel) ซึ่งแต่ละส่วนมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของจอซีอาร์ที

ออกไซด์	จอสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	ส่วนจอแก้ว(Panel)	ส่วนกรวยแก้ว(Funnel)
Na ₂ O	8.0-8.6	6.3-6.8
K ₂ O	7.0-7.5	7.8-9.7
MgO	0.2-1.3	1-1.8
CaO	0.5-2.5	1.4-3.8
SrO	1.5-8.5	0.15-0.5
BaO	10.0-12.0	1-1.95
Al ₂ O ₃	2.2-3.2	3.0-4.0
ZrO ₂	0.2-1.5	0.08
PbO	0-0.1	14.7-22.7
SiO ₂	60.0-62.0	52.0-59.0
CeO ₂	0.25	-
TiO ₂	0.4	0.05
Sb ₂ O ₃	0.25	0.05
As ₂ O ₃	0.02	0.01
Fe ₂ O ₃	0.07	0.06

ที่มา : Dhir, Limbachiya, and Dyer (2001)

2.2.2 การจัดการจอซีอาร์ทีในปัจจุบัน

เนื่องจากจอซีอาร์ทีมีสารตะกั่วเจือปนอยู่จึงทำให้ต้องมีกระบวนการจัดการเป็นพิเศษ ขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนต่างๆออกจากกันซึ่งจะต้องทำในระบบปิด เพื่อควบคุมอันตรายจากสารตะกั่วที่อยู่ภายใน วิธีการจัดการจอซีอาร์ที เริ่มต้นจากการเปิดฝาครอบด้านหลังของเครื่องโทรทัศน์แล้วแยกลำโพง ขดลวดหักเห แผงวงจรและป็นยิงอิเล็คตรอน เมื่อถอดฝาครอบ (Cover) และโครง (Cabinet) ออกจะเหลือจอซีอาร์ทีที่อยู่ภายใน โดยทั่วไปแล้วในปัจจุบันจะใช้เลเซอร์ตัดรอบขอบของจอซีอาร์ทีตรงบริเวณที่จอแก้วและกรวยประกบกัน เมื่อทั้งสองชิ้นส่วนหลุดแยกจากกันจะพบชาโดว์มาस्कที่ทำจากเหล็กกล้า หลังจากนั้นชิ้นส่วนต่างๆจะถูกนำไปรีไซเคิลให้เหมาะสมตามองค์ประกอบของชิ้นส่วนนั้นๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

และด้วยเหตุที่แก้วจากจอซีอาร์ทีมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นตะกั่วออกไซด์ (PbO) ถึงร้อยละ 20 จึงทำให้เราสนใจที่จะทำการศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากจอซีอาร์ที เนื่องจากตะกั่วเป็นโลหะที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบอุตสาหกรรม

2.3 แผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์ (Printed Circuit Boards : PCB)

แผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์ คือ แผงวงจรที่มีลายทองแดงนำไฟฟ้าใช้สำหรับอุปกรณ์อิเล็คทรอนิกส์เพื่อประกอบเป็นวงจรสำเร็จแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก อีกทั้งยังช่วยให้สามารถจัดวางอุปกรณ์เสริมต่างๆได้อย่างเป็นระเบียบและช่วยลดขนาดของพื้นที่ในการจัดวางอุปกรณ์ได้ (เปรมฤดี กาญจนปิยะ และคณะ, 2554)

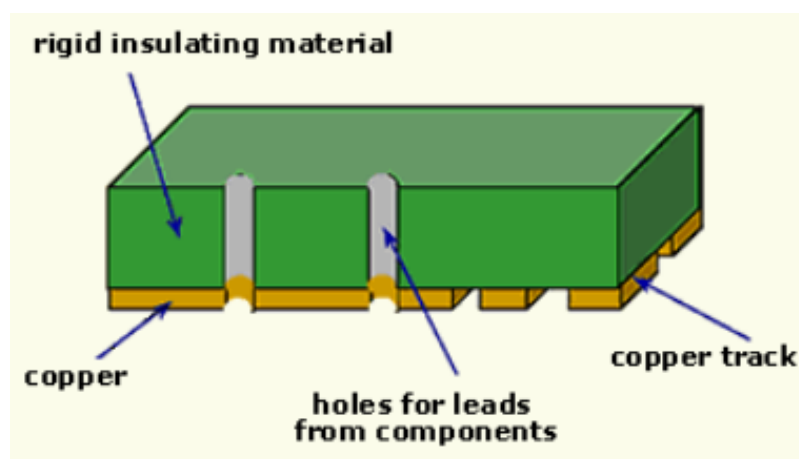
2.3.1 รูปแบบและองค์ประกอบของแผงวงจร

โดยทั่วไปแผงวงจรอิเล็คทรอนิกส์จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ แผ่นรอง (Substrate) และสารตัวนำหรือลายทองแดง แผ่นรองทำจากแผ่นฉนวนบางๆซึ่งยึดรวมกันด้วยสารประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermo-setting) แผ่นรองที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีชนิดต่างๆ ได้แก่ ชนิด FR1 เป็นแผ่นรองชนิดที่มีลักษณะเป็นสีน้ำตาล ทำจากกระดาษยึดรวมกันด้วยฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) ความสามารถในการใช้งานต่ำเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สมบัติความต้านทานไฟฟ้าของฉนวนลดลง นอกจากนั้นแล้วยังไม่ทนอุณหภูมิสูง แผ่นรองชนิด CEM ใช้เซลลูโลสเป็นแกนกลางมีใยแก้วทอเป็นผิวทั้ง 2 ด้าน ยึดกันด้วยอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) ทำให้ทนอุณหภูมิได้สูงขึ้นแต่ความสามารถในการทนต่อความชื้นต่ำ และชนิด FR-4 เป็นแผ่นรองที่ทำจากใยแก้วยึดด้วยอีพอกซีเรซินจึงทนต่ออุณหภูมิสูงและความชื้นจึงสามารถใช้ได้กับงานหลายประเภท (microlinepcb, 2010)

2.3.2 ประเภทของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

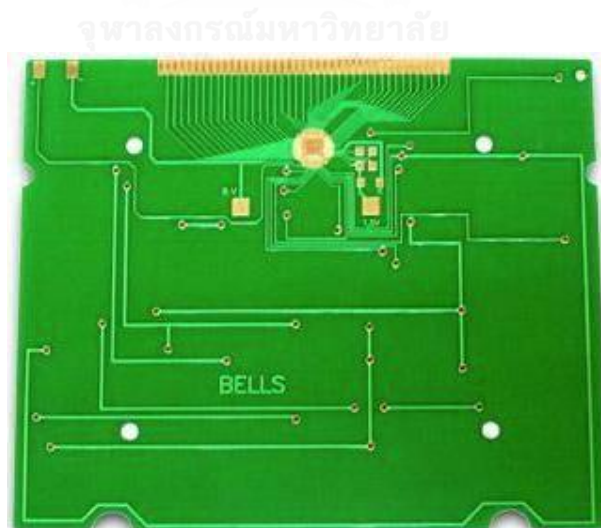
แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทตามลักษณะโครงสร้างและการใช้งาน ได้แก่

2.3.2.1 *Single Sided Board* เป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยแผ่นรองซึ่งวางลายทองแดงเพียงด้านเดียว แผงวงจรชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้งานกับลายวงจรที่มีตัวอุปกรณ์ไม่ซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Single Sided Board

ที่มา : <http://www.ami.ac.uk> (2014)

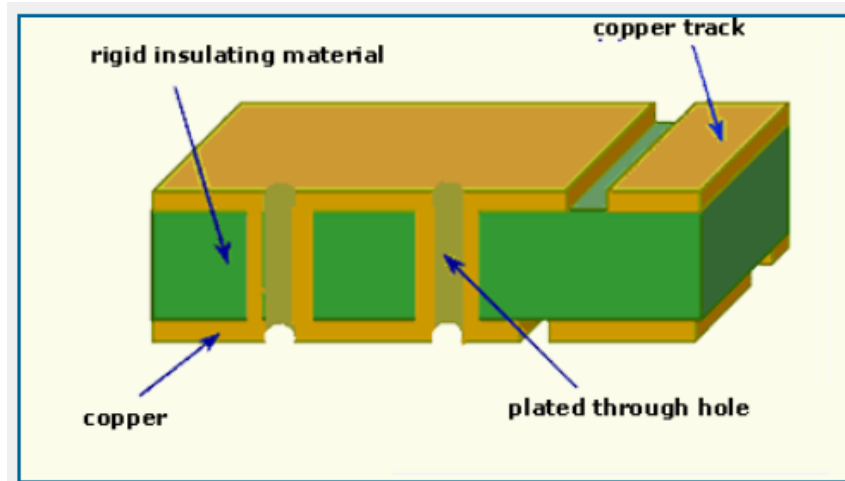


รูปที่ 2.4 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Single Sided Board

ที่มา : <http://www.globalsources.com> (2014)

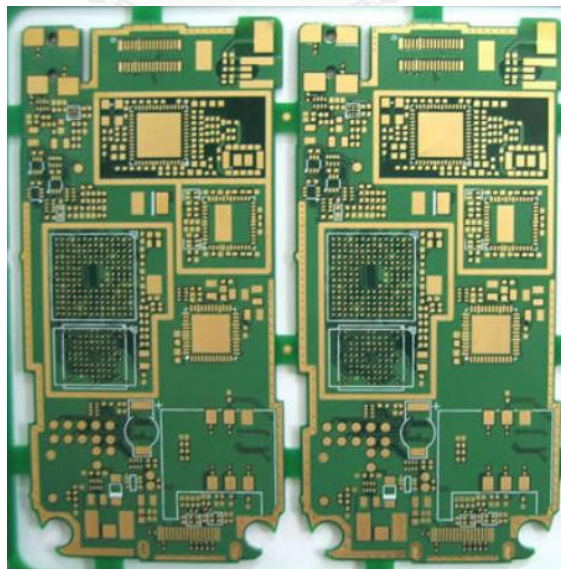
2.3.2.2 Double Sided Board แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบนี้เป็นที่นิยมใช้

โดยทั่วไป เป็นแผงวงจรที่ประกอบด้วยแผ่นรองแต่มีการวางลายตัวนำทองแดงทั้ง 2 ด้าน โดยภายในจะมีรูที่เคลือบผิวด้วยทองแดงเชื่อมต่อกันเพื่อเชื่อมสัญญาณระหว่างด้าน แผงวงจรลักษณะนี้เหมาะสำหรับการออกแบบลายวงจรที่มีความซับซ้อนหรือที่มีความถี่ปานกลางถึงความถี่สูง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Double Sided Board

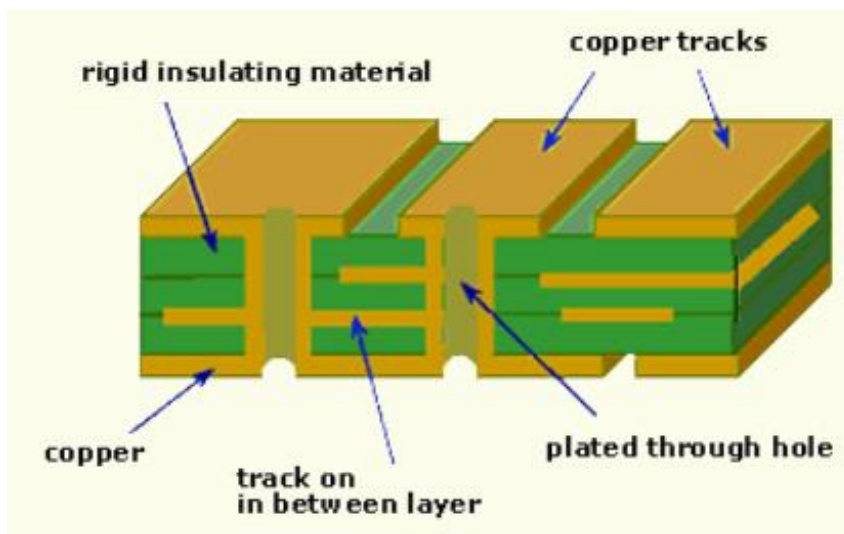
ที่มา : <http://www.ami.ac.uk> (2014)



รูปที่ 2.6 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Double Sided Board

ที่มา : <http://www.trustpcber.com> (2014)

2.3.2.3 *Multi Layered Board* จะเป็นแผงวงอิเล็กทรอนิกส์ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นรองซ้อนกันหลายชั้น เช่น 4 ชั้น 6 ชั้น 8 ชั้น 10 ชั้น หรือสูงสุดถึง 58 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะถูกป้องกันด้วยฉนวนอย่างเหมาะสม แผงวงจรแบบนี้มักถูกใช้งานกับวงจรที่มีความซับซ้อนและมีข้อมูลที่ละเอียดสูงมาก เช่น คอมพิวเตอร์ (PCBuniverse, 2013)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Multi Layered Board

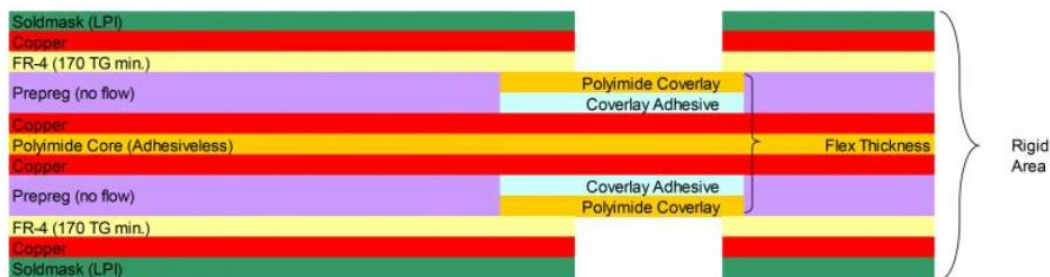
ที่มา : <http://www.ami.ac.uk> (2014)



รูปที่ 2.8 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Multi Layered Board

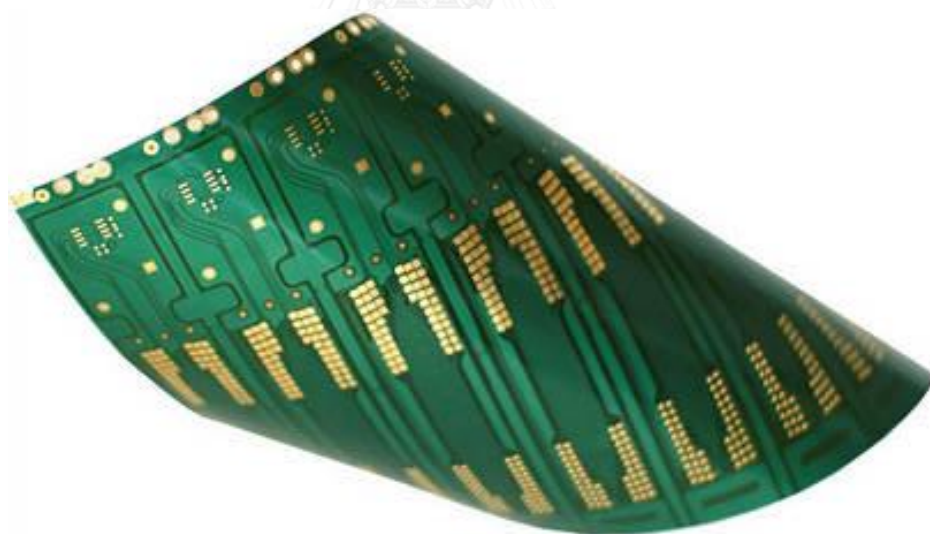
ที่มา : <http://www.prototypepcbboard.com> (2014)

2.3.2.4 *Flexible Board* เป็นแผงวงจรชนิดอ่อน ถูกผลิตขึ้นจากการลามิเนตแผ่นรองและแผ่นโลหะทองแดงซึ่งมีความบางมาก มีรูปแบบทั้งแผ่นชั้นเดียวและแบบ Multi Layered แผงวงจรชนิดนี้มีน้ำหนักเบาและขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถใช้งานในพื้นที่จำกัดหรือใช้งานกับอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหวตลอดเวลา เช่น กล้องถ่ายรูป เครื่องเล่น CD DVD เป็นต้น (wikipedia, 2014a)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Flexible Board

ที่มา : <http://pcbdesign007.icconnect007.net> (2014)



รูปที่ 2.10 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ Flexible Board

ที่มา : <http://www.atotech.com> (2014)

2.3.3 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบโดยทั่วไปในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

องค์ประกอบ		ร้อยละโดยน้ำหนัก
โลหะ (40%)	ทองแดง (Cu)	20
	อะลูมิเนียม (Al)	2
	ตะกั่ว (Pb)	2
	สังกะสี (Zn)	1
	นิกเกิล (Ni)	2
	เหล็ก (Fe)	8
	ดีบุก (Sn)	4
	พลวง (Sb)	0.4
	ทอง (Au)	0.1
	เงิน (Ag)	0.2
	พลาตตินั่ม (Pd)	0.005
เซรามิกส์ (30%)	แก้ว (SiO ₂)	15
	อะลูมินา (Al ₂ O ₃)	6
	อัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ธออกไซด์ (Alkaline Oxide, Alkaline Earth Oxide)	6
	Titanates, Mica etc.	3
พลาสติก (30%)	Epoxies	4.8
	Polypropylene : PP	4.8
	Polyethylene : PE	9.9
	Polyesters	4.8
	Polyvinyl-chloride	2.4
	Polytetra-flouroethane	2.4
	Nylon	0.9

ที่มา : Shuey, Vildal, and Taylor (2004)

2.4 กระบวนการในการเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไป

2.4.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Process)

กระบวนการทางกายภาพเป็นกระบวนการเบื้องต้นของการคัดแยกองค์ประกอบในขยะอิเล็กทรอนิกส์ อาศัยหลักของสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น น้ำหนัก ความหนาแน่น ความแตกต่างของขนาดอนุภาค ฯลฯ ซึ่งสมบัติเหล่านี้มีผลต่อการพิจารณาเลือกวิธีการคัดแยก ยกตัวอย่างเช่น แฉงวงจรีเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีทั้งโลหะและพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลัก มักถูกนำมาผ่านกระบวนการคัดแยกโดยอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะระหว่างโลหะและพลาสติก เนื่องจากโลหะมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่าพลาสติกมาก (ตารางที่ 2.4) การคัดแยกอาจทำได้โดยใช้ตัวกลางที่เป็นอากาศ น้ำ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีร่วมด้วย วิธีที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ การคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงสั่น (Vibration Screen) การคัดแยกโดยอาศัยความถ่วงจำเพาะ อย่างเช่น โต๊ะสั่น (Shaking Table) จิ๊ก (Jig) หรือแม้แต่การคัดแยกด้วยอากาศ เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดต่างๆที่เป็นองค์ประกอบหลักในขยะอิเล็กทรอนิกส์

วัสดุ		ค่าความถ่วงจำเพาะ (g/cm ³)
โลหะ	ทองแดง (Cu)	8.96
	เงิน (Ag)	10.49
	ตะกั่ว (Pb)	11.34
	อะลูมิเนียม (Al)	2.70
	ทอง (Au)	19.30
	แพลทินัม (Pt)	21.45
	เหล็ก (Fe)	7.87
	สังกะสี (Zn)	7.14
	ดีบุก (Sn)	7.26

ที่มา : ขวัญชัย สีเผ่าพันธุ์ (2553)

วัสดุ		ค่าความถ่วงจำเพาะ (g/cm ³)
พลาสติก	Acrylonitrile Butadiene Styrene	1.02
	Polystyrene : PS	0.96-1.04
	Polypropylene : PP	0.85-0.95
	Polyethylene	0.90-0.97
	Polyvinyl chloride	1.10-1.58
	Polyethylene terephthalate	1.29-1.40
	Tetrabromobisphenol A : TBBPA	2.12

ที่มา : ขวัญชัย ลีเผ่าพันธ์ (2553)

2.4.2 กระบวนการทางความร้อน (Pyrometallurgy)

เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนในการเผาและการหลอมขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งกระบวนการทางความร้อนนั้นมีหลายวิธี เช่น การถลุง การเผาไหม้ การเผาแบบไพโรโรซิส เป็นต้น ขั้นตอนของกระบวนการเริ่มต้นจากการป้อนวัตถุดิบที่ผ่านการคัดแยกและลดขนาดแล้วสู่เตาเผาที่มีความร้อนสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส เพราะที่อุณหภูมินี้พลาสติกต่างๆจะเกิดการเผาไหม้และสลายตัวเป็นก๊าซ ส่วนโลหะและโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก ตะกั่ว แก้ว จะแยกตัวออกมากลายเป็นชั้นตะกรัน (Slag) ลอยอยู่บนผิวหน้าของโลหะหลอมเหลว เช่น ทองแดง ทองคำ เงิน ชั้นตะกรันดังกล่าวจะถูกแยกและนำไปหลอมต่อ

ในส่วนของโลหะทองแดงหลอมเหลวที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในขยะอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะถูกแยกโดยการหลอมอีกขั้นตอนโดยเฉพาะ เนื่องจากในทองแดงหลอมเหลวมีตะกั่วเป็นตะกรันเจือปน จึงต้องทำการหลอมด้วยความร้อน เพื่อให้เกิดการแยกตัวของทองแดงกับตะกั่ว โดยชั้นทองแดงหลอมเหลวจะลอยอยู่เหนือชั้นของตะกั่วเนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของทองแดงน้อยกว่าตะกั่ว นั่นเอง เพื่อเพิ่มปริมาณในการเก็บกลับคืนและความบริสุทธิ์ในโลหะชนิดต่างๆที่ต้องการเก็บกลับคืน โลหะเหล่านี้จะถูกนำมาเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้โลหะที่มีความบริสุทธิ์และเหมาะสมกับการใช้งาน (เปรมฤดี กาญจนปิยะ และคณะ, 2554)

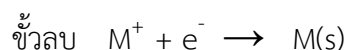
2.4.3 กระบวนการทางสารละลายเคมี (Hydrometallurgy)

หลักสำคัญในการละลายโลหะด้วยสารละลายเคมี คือ การใช้สารละลายที่มีความสามารถในการละลายโลหะออกมาจากวัตถุดิบหรือตัวกลางซึ่งส่งผลทำให้โลหะที่อยู่ในรูปของแข็งถูกชะละลายออกมา วิธีในการเก็บกลับคืนโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายทางเคมีนั้นมีด้วยกันหลายวิธีขึ้นกับชนิดของโลหะที่ต้องการเก็บกลับคืน เช่น การใช้กรดกัดทอง (Aqua Regia) ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างกรดไนตริก (H_2NO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) มีสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรงใช้ในการละลายทองคำ การละลายด้วยไซยาไนด์ (Cyanidation) เป็นสารที่มีสมบัติสามารถสร้างพันธะกับโลหะมีค่า อย่างเช่น ทองคำ แพลทินัม ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรและสามารถนำเข้าสู่กระบวนการต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการละลายทองแดงนั้นนิยมใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และ กรดไนตริก (H_2NO_3) โดยโลหะที่ได้จากการละลายด้วยสารละลายเหล่านี้จะออกมาอยู่ในรูปตะกอนของแข็ง หรือสารละลาย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือความบริสุทธิ์ของโลหะตั้งต้นนั้น หลังจากนั้นโลหะที่ผ่านการละลายจะถูกนำมาทำให้บริสุทธิ์และเพิ่มปริมาณในการเก็บกลับคืนโดยการตกตะกอน (Cementation) (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552)

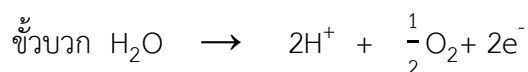
2.4.4 กระบวนการทางไฟฟ้า (Electrometallurgy)

เป็นกระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ของโลหะซึ่งขั้นตอนนี้จะทำหลังจากการแยกโลหะแต่ละชนิดออกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์แล้ว กระบวนการนี้อาศัยการผ่านกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรง (Direct Current : DC) สู่อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งเป็นสารตัวนำ กระแสไฟฟ้าจะทำให้ไอออนในสารละลายแตกตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า (Electrolytic cell) ที่มีแผ่นขั้วบวก (Anode) และแผ่นขั้วลบ (Cathode) วางเรียงสลับกัน กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีสามารถแบ่งวิธีการย่อยได้เป็น 2 วิธีตามลักษณะของโลหะตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552) คือ

2.4.4.1 Electrowinning เป็นวิธีการแยกสกัดโลหะที่อยู่ในรูปสารละลายโดยจะใช้ขั้วบวกเป็นโลหะที่ไม่ละลายในสารละลาย เช่น แผ่นเหล็กกล้า (Stainless steel) ส่วนขั้วลบจะเป็นโลหะชนิดเดียวกับสารละลายที่เราต้องการแยกสกัดโลหะออกมา โดยกระบวนการจะเริ่มจากการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนโลหะในสารละลาย จากนั้นไอออนโลหะจะเคลื่อนที่มาเกาะที่ขั้วลบซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวกัน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้



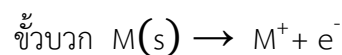
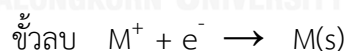
เกิดจากการที่ไอออนบวกของโลหะเกิดการแตกตัวออกจากสารละลายแล้ววิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่แผ่นขั้วลบซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวกัน บริเวณขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ไอออนบวกของโลหะสามารถรับอิเล็กตรอนที่บริเวณนี้ได้และเกิดการเกาะตัวกันของโลหะที่เพิ่มขึ้น



เป็นส่วนที่โลหะจะไม่เกิดการละลายในบริเวณนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการสลายตัวของน้ำกลายเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนไอออน และมีการปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ออกซิเจนไอออนจะเกิดการรวมตัวกันเป็นก๊าซออกซิเจน ส่วนไฮโดรเจนจะรวมกับสารละลายต่อไป

2.4.4.2 *Electrorefining* เป็นวิธีการแยกสกัดโลหะที่มีโลหะตั้งต้นอยู่ในรูปของของแข็งซึ่งมีความบริสุทธิ์ไม่มากนัก กระบวนการเริ่มจากการนำแท่งโลหะตั้งต้นไปไว้ที่ขั้วบวกแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเพื่อให้โลหะที่ขั้วบวกเกิดการละลายลงสู่สารละลาย

หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน ทำให้ไอออนโลหะที่ต้องการเคลื่อนตัวไปเกาะที่ขั้วลบซึ่งทำจากแท่งโลหะนั่นเอง ปฏิกิริยาที่เกิดในเซลล์ไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้



2.4.5 กระบวนการทางชีวภาพ (Biometallurgy)

เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีร่วมกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่รุนแรงแต่ค่อยเป็นค่อยไป การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นระหว่างประจุบนผิวหน้าของจุลินทรีย์กับไอออนของโลหะในสารละลาย โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการทางชีวภาพนั้นมีหลายประเภท เช่น สาหร่าย (Algae) ฟังกาย (Fungi) แบคทีเรีย (Bacteria) ยีสต์ เป็นต้น สารชีวภาพเหล่านี้สามารถสะสมโลหะเข้าไปในโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ (เปรมฤดี กาญจนปิยะ และคณะ, 2554) กระบวนการทางชีวภาพนั้นสามารถจำแนกได้ออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

2.4.5.1 การชะด้วยจุลินทรีย์ (Bioleaching) มีการศึกษาและพบว่า มีแบคทีเรีย

บางชนิดในกลุ่มไทโอบาซิลลัส เฟอร์โรออกซิแดน (Thiobacillus ferrooxidans) ซึ่งมีสมบัติเหมาะสมสำหรับการนำไปชะละลายโลหะ ปฏิกิริยาจะสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยแบคทีเรียดังกล่าวจะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะเพื่อทำให้โลหะที่ละลายได้เมื่อเข้าสู่กระบวนการต่อไปจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้นนั่นเอง (กิตติพันธ์ บายยังชัน, 2551)

2.4.5.2 การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) เป็นการทำให้ปฏิกิริยากันระหว่าง

ไอออนของโลหะกับเซลล์จุลินทรีย์โดยจะเป็นการดูดซับไอออนของโลหะด้วยมวลชีวภาพ จุลินทรีย์ทางชีวภาพส่วนใหญ่ที่นิยมใช้จะเป็นเชื้อกลุ่ม E.coli ซึ่งสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่ายและมีความทนทานสูง วิธีการนี้จะทำโดยการนำเชื้อจุลินทรีย์มาผสมกับสารละลายโลหะแล้วทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะนำไปทำการตกตะกอนโดยใช้แรงเหวี่ยง (Centrifuge) และจะนำตะกอนที่ได้ไปเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ โลหะที่ได้จะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการทำละลายเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของโลหะต่อไป (Won, Mao, Kwak, Sathishkumar, & Yun, 2010)

2.5 การหลอมแบบรีดักชัน (Reduction Melting)

การหลอมแบบรีดักชันเป็นกระบวนการทางความร้อนในการเก็บกลับคืนโลหะอีกวิธีหนึ่ง โดยใช้ความร้อนในการหลอมและเผาวัสดุที่มีสารประกอบโลหะร่วมกับตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) เช่น คาร์บอนที่ได้จากถ่านโค้กหรือถ่านหิน ซึ่งตัวรีดิวซ์ที่เติมเข้าไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารประกอบโลหะ แล้วเกิดการแยกตัวของสิ่งเจือปนออกมาจากเนื้อโลหะ ยกตัวอย่างเช่น การแยกตัวของออกไซด์จากโลหะในรูปแบบของโลหะออกไซด์ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของตัวรีดิวซ์กับออกซิเจนของโลหะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรืออาจจะอยู่ในรูปของกลุ่มสารประกอบที่จับตัวมากับโลหะตอนทำปฏิกิริยากับโลหะในขั้นตอนการละลายทางเคมี โดยตัวรีดิวซ์จะทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนดังกล่าวแล้วแยกตัวออกไป ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของของแข็งหรือสลายตัวกลายเป็นก๊าซ ผลที่ได้จะทำให้โลหะมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น

การหลอมแบบรีดักชันจะมีการเติมฟลักซ์ (Fluxing Agent) ลงไปเพื่อช่วยลดอุณหภูมิและทำให้กระบวนการหลอมเกิดได้ง่ายขึ้น ฟลักซ์ที่นิยมใช้เติมลงไปนั้น ได้แก่ อัลคาไลน์คาร์บอเนต (Alkaline carbonate) อัลคาไลน์ไนเตรต (Alkaline nitrate) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodiumhydroxide : NaOH) หรืออาจจะเป็นบอแรกซ์ (Borax) นั่นก็ขึ้นกับสารประกอบโลหะที่เราต้องการนำมาผ่านกระบวนการนั่นเอง (Inano, 2009)

2.6 แผนภาพเอลลิงแฮม (Ellingham Diagrams)

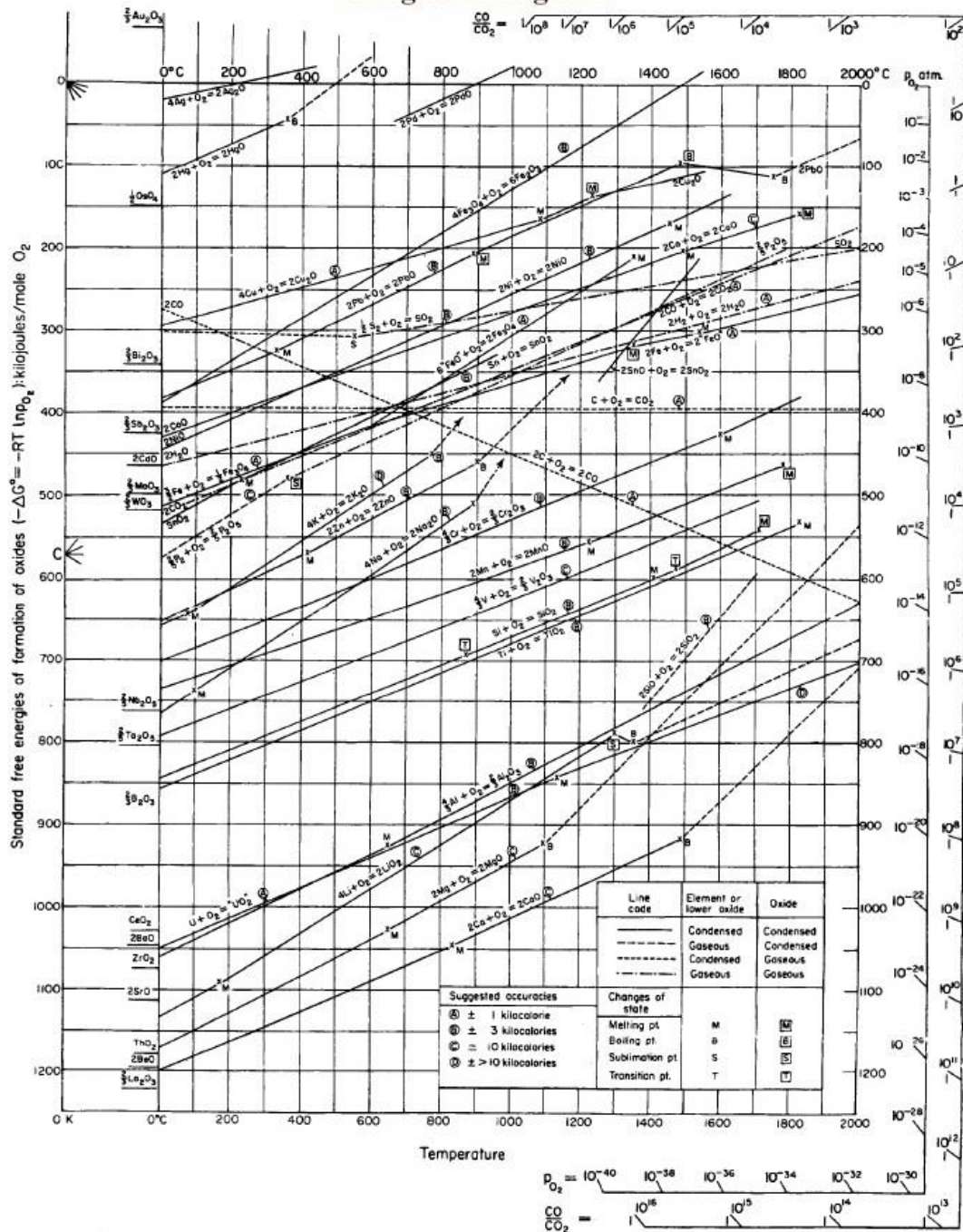
ลักษณะโครงสร้างของแผนภาพเอลลิงแฮมเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy : ΔG) กับอุณหภูมิ โดยมีค่าเอนทัลปี (Enthalpy : ΔH) และค่าเอนโทรปี (Entropy : ΔS) เป็นค่าคงที่พื้นฐาน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานอิสระและอุณหภูมิสามารถอธิบายออกมาในรูปแบบของกราฟเส้นตรง โดยมีค่าเอนทัลปีเท่ากับค่าที่ได้จากจุดตัดของเส้นกราฟบนแกน y และค่าเอนโทรปีเท่ากับความชันของกราฟเส้นตรง ซึ่งความชันของกราฟจะเปลี่ยนเมื่อสารเกิดการเปลี่ยนเฟส เช่น การหลอมตัวหรือกลายเป็นไอ

ค่าพลังงานอิสระในการสร้างพันธะของโลหะออกไซด์ส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นลบ (-) เมื่อเขียนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานอิสระและอุณหภูมิ จึงกำหนดให้ $\Delta G = 0$ อยู่บนยอดของแผนภาพและมีค่าเป็นลบ (-) ลงมาตามลำดับ พร้อมทั้งมีสัญลักษณ์กำกับที่อุณหภูมิซึ่งทั้งโลหะและออกไซด์จะหลอม (สัญลักษณ์ M) และกลายเป็นไอ (สัญลักษณ์ B) ในแผนภาพอีกด้วย

แผนภาพเอลลิงแฮมแสดงลักษณะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโลหะซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในการเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นโลหะออกไซด์ โดยส่วนใหญ่ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการอัดตัวที่แน่นขึ้นของโครงสร้างสารซึ่งมีปริมาตรลดลง หรือเกิดการเปลี่ยนเฟสจากแก๊สไปเป็นของเหลวหรือของแข็ง

ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ของโลหะออกไซด์ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพเอลลิงแฮมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานอิสระกับอุณหภูมิ พบว่า ปฏิกิริยาของโลหะที่อยู่ส่วนบนของแผนภาพ ส่วนใหญ่เป็นโลหะจำพวกมีตระกูล (Noble metals) เช่น เงิน (Silver ; Ag) ทอง (Gold ; Au) และแพลทินัม (Platinum ; Pt) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ง่าย เนื่องจากโลหะจำพวกนี้ไม่เสถียรเมื่ออยู่ในรูปออกไซด์ ส่งผลให้ออกไซด์ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนโลหะออกไซด์ที่อยู่ถัดลงมาทางด้านล่างของแผนภาพ มีความเสถียรสูง ส่งผลให้ออกไซด์เหล่านี้ถูกรีดิวซ์ได้ยาก ต้องใช้พลังงานและอุณหภูมิสูงมากในการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โลหะจำพวกนี้ ได้แก่ อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide ; Al_2O_3) ลิเทียมออกไซด์ (Lithium oxide ; Li_2O) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide ; MgO) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide ; CaO) เป็นต้น (Massachusetts Institute of Technology, 2002)

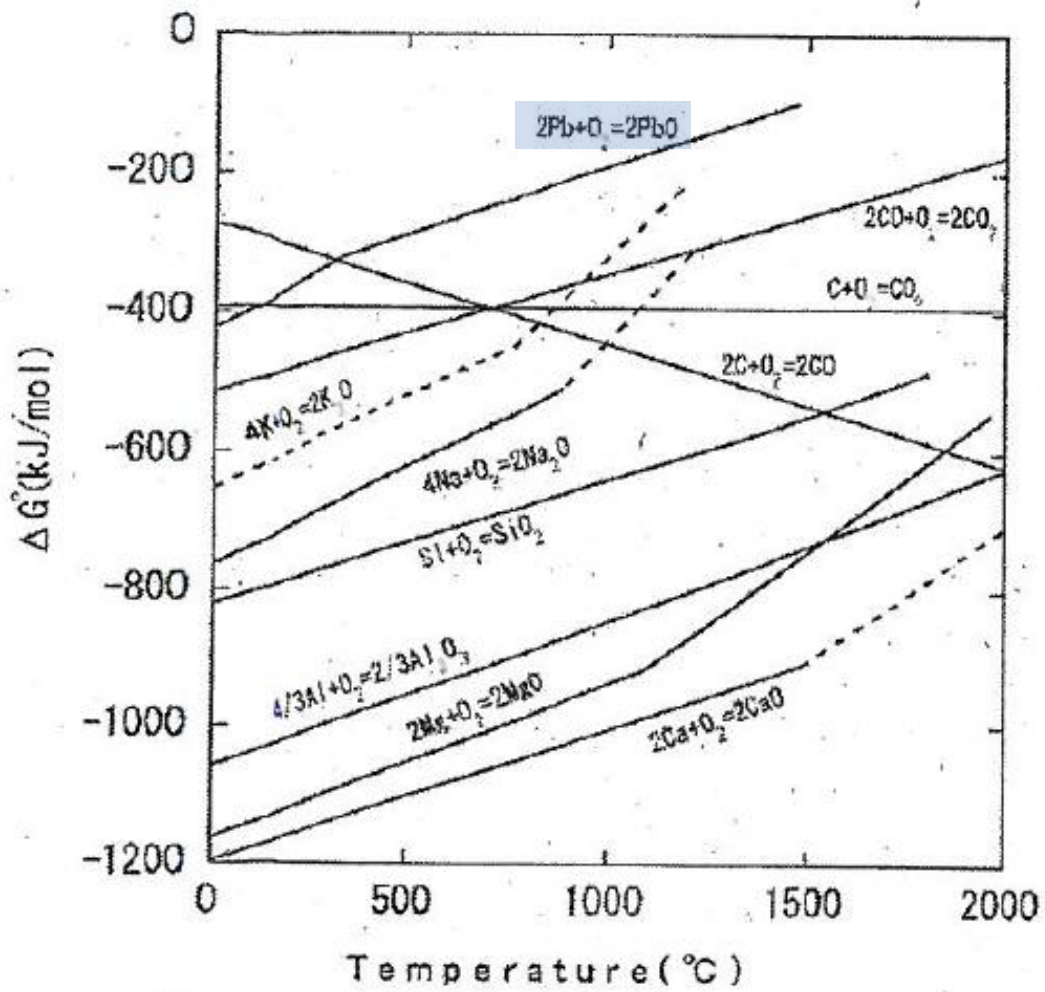
Ellingham Diagrams



รูปที่ 2.11 แผนภาพเอลลิงแฮม (Ellingham Diagrams)

ที่มา : <http://web.mit.edu/education/> (2002)

ดังนั้นแผนภาพเอลลิงแฮมจึงสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่ออธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหลอมแบบปริตักชัน เนื่องจากตะกั่ว (Pb) ซึ่งอยู่ในรูปตะกั่วออกไซด์ (PbO) และเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในจอสีอาร์ที มีเสถียรภาพสูงพอที่จะแยกออกมาให้อยู่ในรูปของโลหะได้



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพเอลลิงแฮมในช่วงของตะกั่วออกไซด์

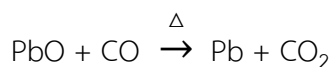
ที่มา : Inano (2009)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

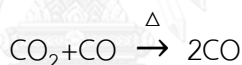
(Inano, 2011) ได้ทำการศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากจอสีอาร์ทีโดยวิธีการหลอมแบบรีดักชัน และทำการเปรียบเทียบผลของอัลคาไลน์ออกไซด์ (Alkaline carbonate) 3 ชนิด คือ ลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium carbonate : Li_2CO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate: Na_2CO_3) และโปแตสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate: K_2CO_3) กับความหนืด (Viscosity) ของแก้วซีอาร์ทีในการหลอมแบบรีดักชัน ผลที่ได้จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การหลอมแบบรีดักชันเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากตะกั่วออกไซด์ได้ และผลของการเติมอัลคาไลน์คาร์บอเนตทั้ง 3 ชนิดในปริมาณเท่ากันแสดงให้เห็นว่า ลิเทียมคาร์บอเนตสามารถลดความหนืดของแก้วได้ดีที่สุด รองลงมาคือโซเดียมคาร์บอเนตและโปแตสเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ อัลคาไลน์คาร์บอเนตเหล่านี้ยังเป็นตัวเพิ่มปริมาณความเป็นเบสในเนื้อแก้วอีกด้วย โดยโปแตสเซียมคาร์บอเนตจะเพิ่มความเป็นเบสในแก้วมากที่สุด รองลงมาคือโซเดียมคาร์บอเนตและลิเทียมคาร์บอเนตตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าลิเทียมคาร์บอเนตเป็นอัลคาไลน์คาร์บอเนตเป็นตัวช่วยหลอม (Fluxing agent) แก้วจากจอสีอาร์ทีที่มีสมบัติดีที่สุด แต่เนื่องจากลิเทียมคาร์บอเนตเป็นสารที่มีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับโซเดียมคาร์บอเนตและโปแตสเซียมคาร์บอเนต งานวิจัยดังกล่าว จึงเสนอแนวคิดในการใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวช่วยหลอม

นอกจากนี้ในงานวิจัยยังทำการศึกษาผลของตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ได้แก่ ผงถ่านที่มีความบริสุทธิ์สูง (Activated Carbon) เพื่อศึกษาผลต่อการหลอมตัวของแก้ว โดยเปรียบเทียบการเติมตัวรีดิวซ์ลงไปในการหลอมแก้วซีอาร์ทีในปริมาณต่างๆ พบว่าปริมาณของตัวรีดิวซ์ที่น้อยเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และโลหะตะกั่วที่ต้องการในการเก็บกลับคืนนั้นมีปริมาณน้อย แต่ถ้าเติมตัวรีดิวซ์ในปริมาณที่มากเกินไปก็จะส่งผลต่อการหลอมตัวของแก้ว คือทำให้แก้วไม่เกิดการหลอมตัวนั่นเอง

(Yonezawa, 2012) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยของ Inano ซึ่งได้ศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากขยะจ่อซีอาร์ที โดยวิธีการหลอมแบบรีดักชัน ซึ่งทำการศึกษาอิทธิพลและปฏิกิริยาของตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และตัวช่วยหลอม (Fluxing agent) ที่เกิดขึ้นในระบบของการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วโดยวิธีการหลอมแบบรีดักชัน พบว่า การเผาไหม้ผงถ่าน (Activated Carbon) ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในระบบ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ตะกั่วออกไซด์ (PbO) ให้เป็นโลหะตะกั่ว โดยคาร์บอนมอนอกไซด์จะรวมตัวกับออกซิเจนจากตะกั่วออกไซด์ กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และสลายตัวเป็นก๊าซ ดังสมการ



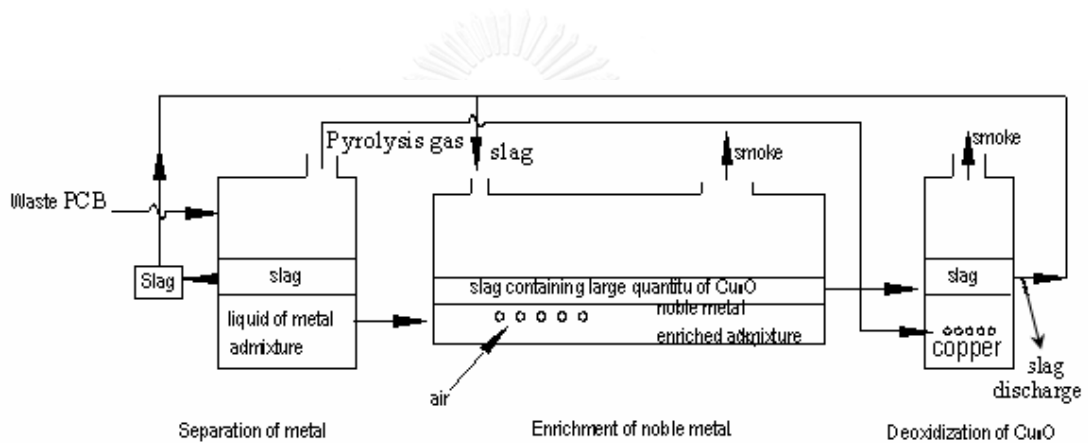
นอกจากนั้นยังพบว่าโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ที่ใช้เป็นตัวช่วยหลอมยังมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกตัวของโลหะตะกั่ว กล่าวคือ โซเดียมคาร์บอเนตจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO₂) ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะถูกรีดิวซ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการ



โดยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปเร่งปฏิกิริยารีดักชันให้เกิดกับตะกั่วออกไซด์ต่อไป

(Zhou, Luo, & Zhai, 2007) ได้ทำการศึกษากระบวนการทางความร้อน (Pyrometallurgy) ในการเก็บกลับคืนโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งกระบวนการทางความร้อนออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนไพโรไลซิส (Pyrolysis), ขั้นตอนการถลุง (Smelting) และขั้นตอนการกำจัดก๊าซเผาไหม้ (Gas cleaning) โดยในขั้นตอนแรก (ขั้นตอนไพโรไลซิส) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการเผาไหม้ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งพบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 12 ต่อปริมาณแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีสมบัติเป็นตัวช่วยหลอม (Fluxing agent) และยังช่วยทำให้เกิดการแยกตัวของชั้นตะกั่วของเสีย (Slag) และโลหะหลอมเหลวด้วย

นอกจากการศึกษาอิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว ในขั้นไพโรไลซิส ยังได้ทำการศึกษาองค์ประกอบในแก๊สที่เกิดขึ้นจากการเผาแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบไปด้วย เบนซีน (Benzene) และโทลูอีน (Toluene) เป็นส่วนใหญ่ และในขั้นตอนต่อมา คือขั้นตอนการถลุงโลหะ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเพิ่มความบริสุทธิ์ให้แก่โลหะที่ต้องการเก็บกลับคืน โดยการนำโลหะหลอมเหลวที่ได้จากขั้นตอนไพโรไลซิส มาทำการถลุงด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดการแยกชั้นของโลหะมีค่า จำพวกเงิน ทอง ออกจากตะกั่ว ในตะกั่วจะประกอบด้วยคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu_2O) เป็นปริมาณมาก คอปเปอร์ออกไซด์นี้จะถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จะอาศัยแก๊สที่ได้จากการเผาในขั้นต้นแรกเข้ามาทำปฏิกิริยาให้เกิดการรีดิวซ์ออกไซด์ออกจากคอปเปอร์ออกไซด์ ทำให้ได้โลหะทองแดงออกมา อาจกล่าวได้ว่าขั้นตอนนี้ช่วยกำจัดแก๊สที่เป็นของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.13 กระบวนการเก็บกลับคืนโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ที่มา : Zhou et al. (2007)

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูล

3.2 สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์



โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate : Na_2CO_3)

สารช่วยหลอม ; Fluxing agent

Ajex Finechem ความบริสุทธิ์ 99.8%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ถ่านไม้ผง (Charcoal powder)

สารรีดิวซ์ ; Reducing agent

จัดจำหน่ายโดย : ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ จำกัด



แก้วจากจอซีอาร์ที (CRT glass)
จาก โทรทัศน์สี Samsung ขนาด 14 นิ้ว



แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Boards : PCB)
แบบ Multi Layered Board ยี่ห้อ : ASUS



เบ้าหลอมอะลูมินา (Alumina crucibles)



เตาไฟฟ้า (Electronic furnace)
- Nabertherm ประเทศเยอรมนี
อุณหภูมิสูงสุดในการทำงาน ที่ 1300 องศาเซลเซียส



หม้อบด (Laboratory Disc mills)
KAWASAKI-SIEB TECHNIK ประเทศญี่ปุ่น

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกตัวของโลหะจากแก้วซีอาร์ที และ ส่วนที่ 2 ประยุกต์ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกตัวของโลหะจากแก้วซีอาร์ที

1. นำแก้วซีอาร์ทีจากจอซีอาร์ทีมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (X-ray Fluorescence) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในแก้ว
2. บดแก้วซีอาร์ทีให้ละเอียด นำมาผสมกับโซเดียมคาร์บอเนตและสารรีดิวซ์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ถ่านไม้ผงในอัตราส่วน 10:4:1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แล้วเผาในเตาไฟฟ้าเพื่อศึกษาการแยกตัวของโลหะที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ดังนี้

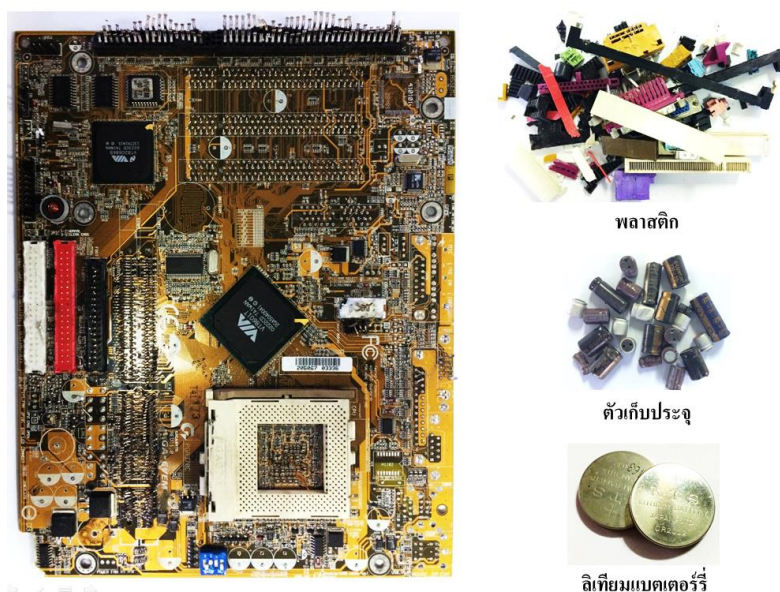
ตารางที่ 3.1 สภาวะอุณหภูมิในการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วจอซีอาร์ที

สภาวะที่	อุณหภูมิในการหลอมตัว Melting Temperature (°C)	เวลา Soaking time (h)	อุณหภูมิในการแยกตัวของโลหะ Precipitation Temperature (°C)	เวลา Soaking time (h)
1	1200	1	-	-
2			500	1
3			500	2
4			600	1
5			600	2
6			700	1
7			700	2

3. สังเกตและบันทึกภาพลักษณะการแยกตัวของโลหะจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
4. นำชิ้นงานจากการเผาวิเคราะห์ โดยส่วนที่เป็นเนื้อแก้วจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (X-ray Fluorescence) เพื่อหาปริมาณตกค้างของตะกั่วออกไซด์และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆซึ่งจะทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสม ส่วนโลหะที่แยกออกมาได้จะถูกวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบด้วยเทคนิค EPMA (Electron Probe Micro Analysis)
5. เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมในการแยกตัวของโลหะแล้ว จะได้นำสภาวะดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการเก็บกลับคืนโลหะร่วมระหว่างจอซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

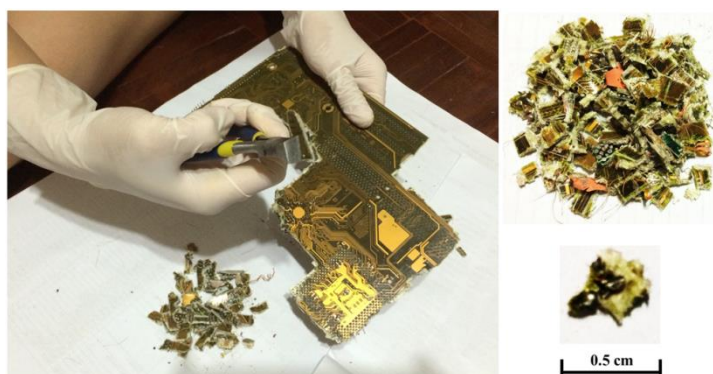
ส่วนที่ 2 ประยุกต์ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะจากส่วนผสมของแก้วซีอาร์ที และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1. เตรียมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยการถอดชิ้นส่วนต่างๆ เช่น พลาสติก ตัวเก็บประจุ (Capacitors) ลิเทียมแบตเตอรี่ ฯลฯ ดังรูป (ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปริมาณของโลหะที่สามารถเก็บกลับคืนได้จากส่วนของแผงวงจรเท่านั้น ไม่รวมส่วนประกอบอื่นๆในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์)



รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นส่วนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2. ทำการลดขนาดแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดประมาณ 0.5x0.5 เซนติเมตร เพื่อให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของแผงวงจรที่ผ่านกระบวนการลดขนาดด้วยเครื่อง Hammer mill ซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรมรีไซเคิล ดังรูป



รูปที่ 3.2 การลดขนาดแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

3. นำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการลดขนาดแล้วผสมกับแก้วจากจอซีอาร์ทีที่บดละเอียดแล้วเติมโซเดียมคาร์บอเนตและถ่านไม้ผงในอัตราส่วนต่อแก้วซีอาร์ทีเป็น 4:1:10 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยอัตราส่วนระหว่างแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แสดงดังตารางที่ 3.2

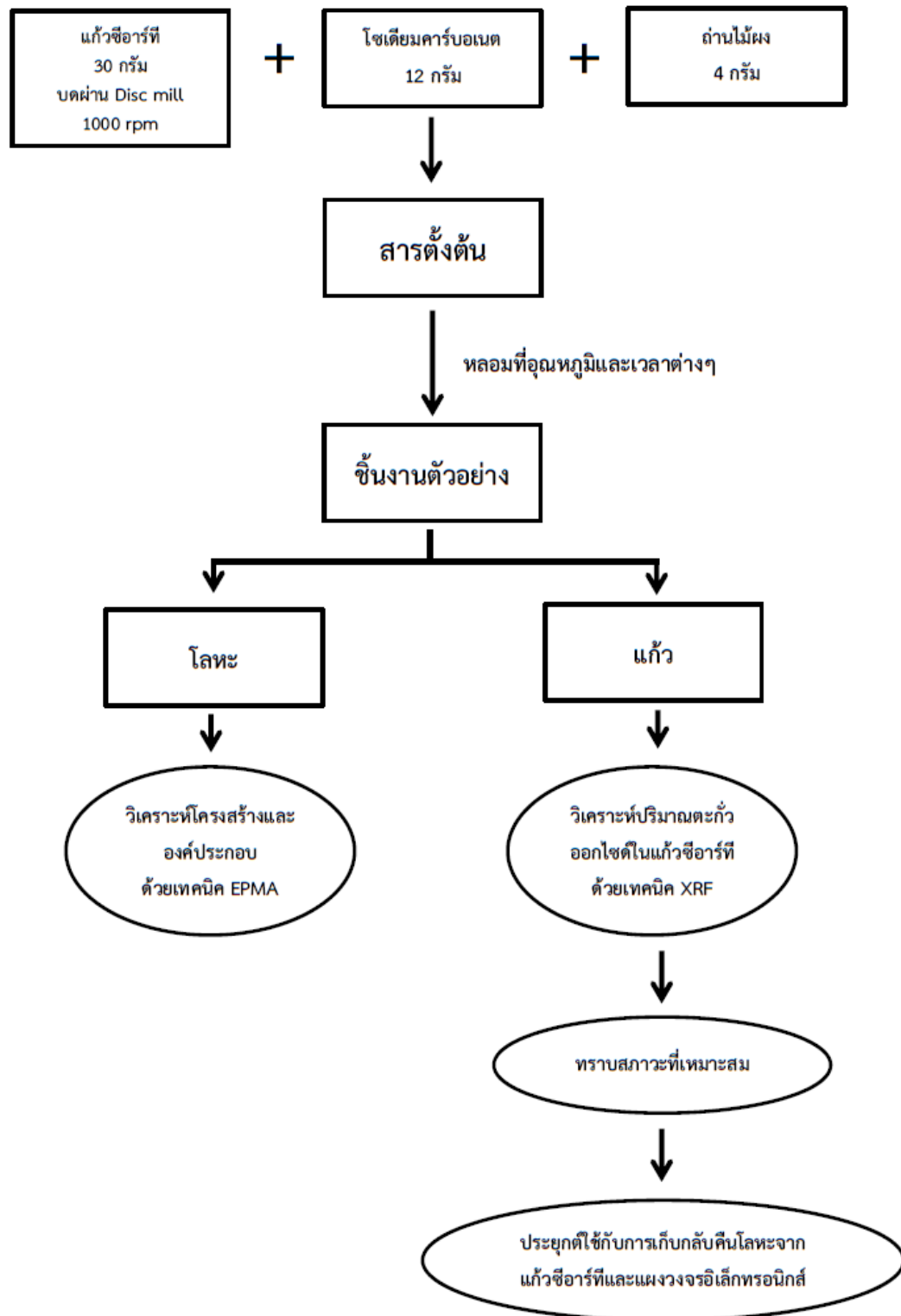
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนระหว่างแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

อัตราส่วนที่	แก้วซีอาร์ที (กรัม)	แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (กรัม)
1	30	10
2	30	15
3	30	20
4	30	30

โดยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผสมในปริมาณแตกต่างกันเพื่อศึกษาแนวโน้มปริมาณในการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

4. นำชิ้นงานที่ได้จากการแยกตัวของโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF (X-ray Fluorescence) และ EPMA (Electron Probe Micro Analysis)

3.4 ผังสรุปขั้นตอนการทดลอง



บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วซีอาร์ทึจากจอแก้วซีอาร์ทึ

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทึด้วยเทคนิค XRF

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
SiO ₂	46.50
PbO	27.32
K ₂ O	8.53
Na ₂ O	6.02
CaO	4.38
Al ₂ O ₃	4.31
MgO	1.57
SrO	0.51
BaO	0.29
Sb ₂ O ₃	0.28
ZrO ₂	0.11

จากการนำแก้วซีอาร์ทึไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีก่อนการเริ่มกระบวนการในการเก็บกลับคืนด้วยเทคนิค XRF พบว่า ในแก้วซีอาร์ทึที่มีปริมาณของตะกั่วออกไซด์ผสมอยู่ร้อยละ 27.32 ซึ่งเป็นองค์ประกอบอันดับ 2 รองจากซิลิกา และเมื่อนำปริมาณดังกล่าว มาเทียบในอัตราส่วนของ Pb : O (82:16) แล้วคำนวณเทียบกับปริมาณตะกั่วออกไซด์จากแก้วซีอาร์ทึ จะพบว่ามีตะกั่วอยู่ประมาณร้อยละ 22.40 ซึ่งมีปริมาณมากพอที่จะสามารถนำมาเป็นแหล่งทรัพยากรเพื่อการเก็บกลับคืนตะกั่วได้

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ที

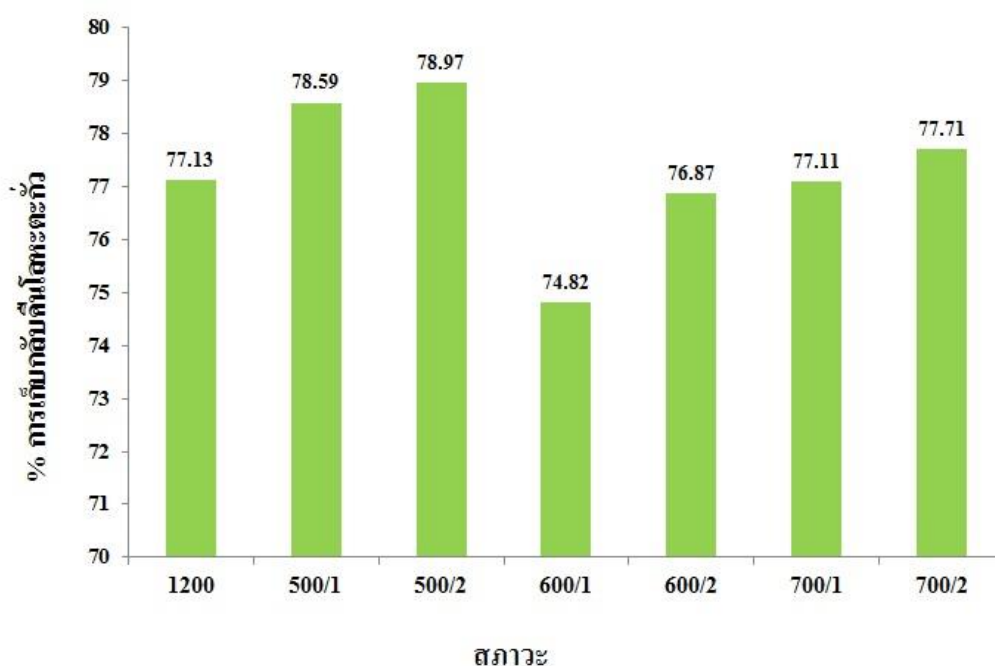
4.2.1 ผลการศึกษาปริมาณโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้จากแก้วซีอาร์ที ณ สภาวะต่างๆ

จากการนำแก้วซีอาร์ทีมาทำการหลอมที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เกิดการแยกตัวของโลหะที่อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง นำโลหะตะกั่วที่แยกตัวออกมาที่แต่ละสภาวะไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาร้อยละการเก็บกลับคืน ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโลหะตะกั่วที่เก็บกลับคืนได้ที่สภาวะต่างๆ

สภาวะ	No treatment	500/1	500/2	600/1	600/2	700/1	700/2
น้ำหนัก (กรัม)	5.285	5.385	5.411	5.127	5.267	5.284	5.325
ร้อยละการเก็บกลับคืน	77.13	78.59	78.97	74.82	76.87	77.11	77.71

* หมายถึง : 500/1,500/2,... หมายถึง อุณหภูมิในการแยกตัว/เวลาในการแยกตัวของโลหะ (°C/h)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงปริมาณร้อยละในการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ทีที่สภาวะต่างๆ

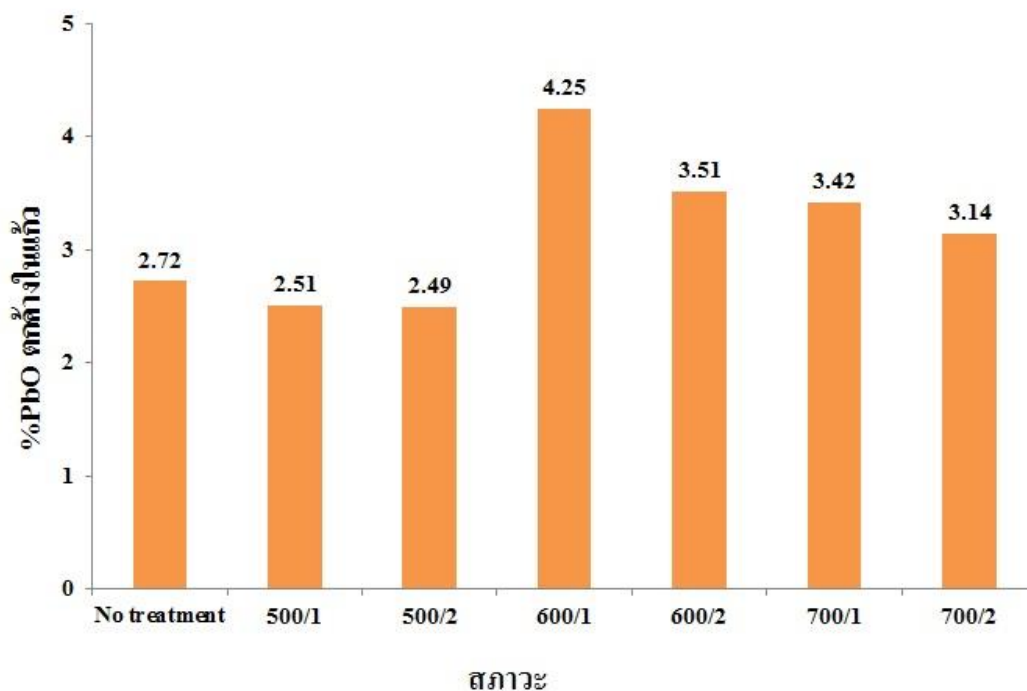
จากตารางที่ 4.2 แสดงน้ำหนักของโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้จากแก้วซีอาร์ทีในสภาวะต่างๆ จะเห็นว่าปริมาณที่สามารถเก็บกลับคืนได้นั้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยสภาวะที่เหมาะสมและสามารถทำการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วได้ปริมาณมากที่สุด คือ ณ อุณหภูมิการหลอมที่ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง มีอุณหภูมิในการแยกตัวของโลหะที่ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการแยกตัว 2 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณของโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้คือ 5.4 กรัม คิดเป็นปริมาณในการเก็บกลับคืนร้อยละ 78.97 ของปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่มีอยู่ในแก้วซีอาร์ที (ดังแสดงในรูปที่ 4.1) ซึ่งนับได้ว่าเป็นปริมาณที่สูงมากในการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่ว

4.2.2 ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทีที่สภาวะต่างๆ

จากการนำแก้วซีอาร์ทีหลังผ่านกระบวนการหลอมแบบรีดักชันที่สภาวะต่างๆมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบตั้งต้น ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.2

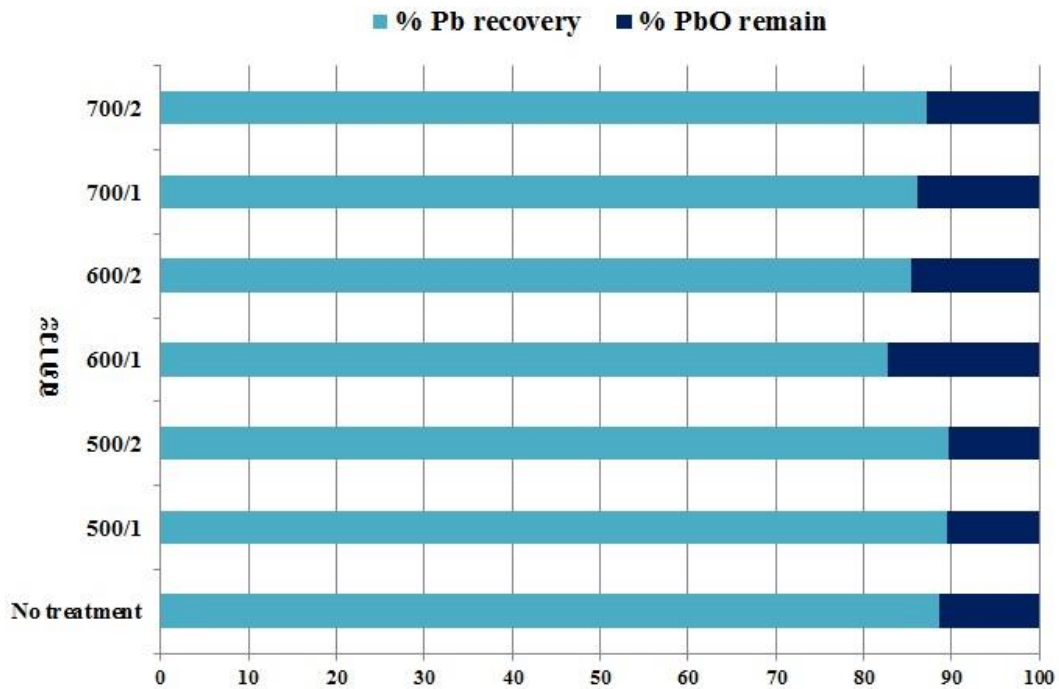
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทีด้วยเทคนิค XRF ณ สภาวะต่างๆ

ออกไซด์	แก้วซีอาร์ทีตั้งต้น	สภาวะ						
		No treatment	500/1	500/2	600/1	600/2	700/1	700/2
SiO ₂	46.50	48.00	47.90	48.00	46.60	47.10	47.40	47.40
PbO	27.30	2.72	2.51	2.49	4.25	3.51	3.42	3.14
K ₂ O	8.53	8.18	8.10	8.30	8.34	8.31	8.15	8.21
Na ₂ O	6.02	27.50	27.70	27.20	26.90	27.20	27.30	27.50
CaO	4.38	4.88	4.87	5.05	4.90	4.95	4.87	4.92
Al ₂ O ₃	4.31	5.65	5.78	5.76	5.91	5.78	5.76	5.82
MgO	1.57	1.59	1.61	1.60	1.55	1.56	1.56	1.58
SrO	0.51	0.46	0.47	0.49	0.49	0.48	0.48	0.47
BaO	0.28	0.50	0.49	0.51	0.48	0.49	0.48	0.49
ZrO ₂	0.11	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.13
Sb ₂ O ₃	0.28	-	-	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	-	0.20	0.24	0.24	0.20	0.20	0.20	0.20



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างในแก้วซีอาร์ทีที่สภาวะต่างๆ

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณของตะกั่วออกไซด์ที่ตกค้างอยู่ในแก้วซีอาร์ทีหลังผ่านกระบวนการหลอมแบบปรัดักชันนั้นมีจำนวนลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับปริมาณของตะกั่วออกไซด์ที่อยู่ในแก้วซีอาร์ทีตั้งต้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างในแก้วที่สภาวะต่างๆดังแสดงในกราฟที่ 4.2 พบว่า ณ อุณหภูมิการหลอมที่ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง มีอุณหภูมิในการแยกตัวของโลหะที่ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการแยกตัว 2 ชั่วโมง จะมีปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างน้อยที่สุด คือคงเหลืออยู่ที่ร้อยละ 2.49 จากองค์ประกอบทั้งหมด และ ณ อุณหภูมิการหลอมที่ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง มีอุณหภูมิในการแยกตัวของโลหะที่ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการแยกตัว 1 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่มีปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างสูงที่สุด เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิ ทรานซิชั่นของแก้ว (Glass Transition temperature) ซึ่งเป็นช่วงที่แก้วจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างในช่วงอุณหภูมินี้แก้วจะมีความหนืด (viscosity) สูง ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของโลหะออกจากเนื้อแก้วนั้นเป็นไปได้ยาก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการแยกตัวให้สูงขึ้น จะพบว่าปริมาณของตะกั่วออกไซด์ที่ตกค้างอยู่ในแก้วจะค่อยๆลดต่ำลงอีกครั้ง เนื่องจากความหนืดของแก้วนั้นลดลงและอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยารีดักชันระหว่างตัวรีดิวซ์กับออกไซด์ของตะกั่วสามารถเกิดขึ้นได้อีกครั้ง จึงทำให้สามารถแยกโลหะตะกั่วได้ดีขึ้น (ดูรูปที่ 4.3 ประกอบ)



รูปที่ 4.3 กราฟสัดส่วนความสัมพันธ์ของปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างเทียบกับปริมาณโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้

นอกจากผลวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับตะกั่วออกไซด์แล้ว เมื่อสังเกตองค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทที่จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงองค์ประกอบก่อนและหลังผ่านกระบวนการเปรียบเทียบ พบว่า องค์ประกอบของแก้วซีอาร์ทก่อนการหลอมแบบรีดักชันนั้นจะมีพลวงออกไซด์ (Sb_2O_3) เป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 0.28 ขององค์ประกอบทั้งหมด แต่เมื่อผ่านกระบวนการหลอมแล้ว พบว่าในแก้วซีอาร์ทที่ไม่มีพลวงออกไซด์หลงเหลืออยู่ ซึ่งคาดการณ์ว่าพลวงออกไซด์ จะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เช่นเดียวกับตะกั่วออกไซด์ จึงทำให้ออกไซด์ของพลวงออกไซด์ถูกรีดิวซ์ทำให้เกิดพลวงร่วมกับตะกั่ว (ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ตัวชิ้นงานโลหะต่อไป) นอกจากนี้ยังพบว่า แก้วซีอาร์ทที่ผ่านกระบวนการหลอมแล้วมีองค์ประกอบชนิดอื่นที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ หลังผ่านกระบวนการในการเก็บกลับคืน ได้มีปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เพิ่มขึ้นในองค์ประกอบแก้วจากร้อยละ 6 เป็นร้อยละ 27 เป็นผลมาจากฟลักซ์ที่เติมลงไปเพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการหลอม และพบว่ามีปริมาณของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยพบอยู่ในปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 0.2 ซึ่งเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นคาดว่ามาจากผงถ่านไม้ซึ่งถูกใช้เป็นสารรีดิวซ์ในงานวิจัยนี้ โดยองค์ประกอบทางเคมีของผงถ่านไม้ได้แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงถ่านไม้ด้วยเทคนิค XRF

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	11.00
SiO ₂	5.58
K ₂ O	2.73
Fe ₂ O ₃	1.44
SO ₃	0.64
Al ₂ O ₃	0.54
Cl	0.41
P ₂ O ₅	0.38
SrO	0.33
MgO	0.31
BaO	0.25
TiO ₂	0.19
MnO	0.14

จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของผงถ่านไม้ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน และมีองค์ประกอบอื่นๆดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยพบว่า มีเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) เป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 1.43 ของผงถ่านไม้ และเมื่อถูกนำไปใช้เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับแก๊วซีอาร์ทีจึงทำให้องค์ประกอบของแก๊วซีอาร์ทีหลังผ่านกระบวนการหลอมปรากฏองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ขึ้นนั่นเอง

4.3 ผลการศึกษาชิ้นงานโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้

4.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของชิ้นงานโลหะตะกั่วที่สามารถเก็บกลับคืนได้จากแก้วซีอาร์ที



No treatment



500/1



500/2



600/1



600/2

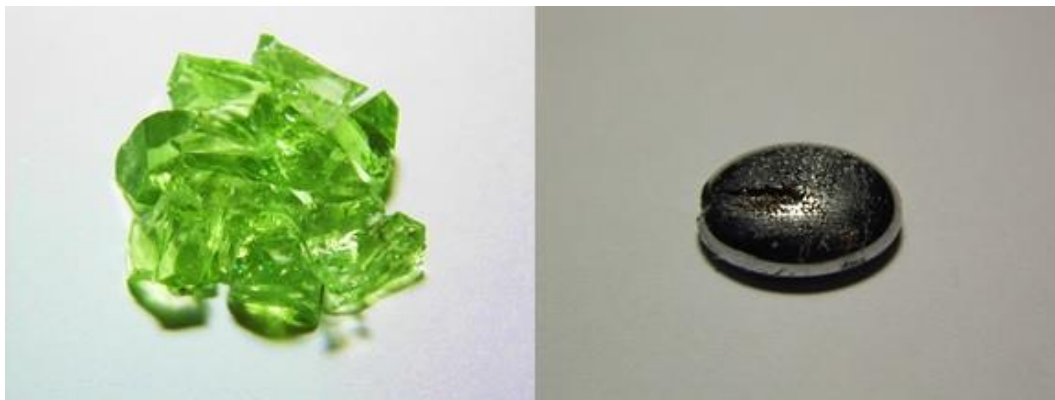


700/1



700/2

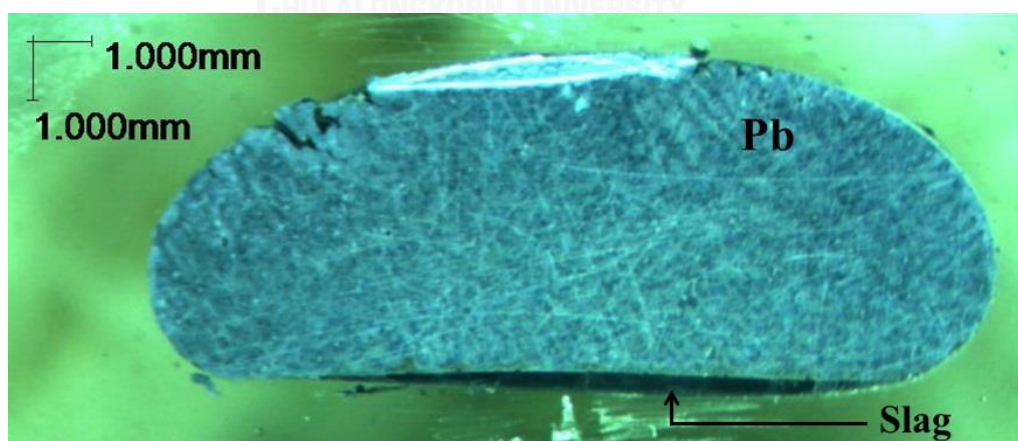
รูปที่ 4.4 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการเก็บกลับคืน ณ สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.5 ลักษณะแก้วและโลหะที่แยกได้

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงลักษณะชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ทที่ พบว่าในทุกสภาวะโลหะตะกั่วแยกเฟสออกจากแก้วได้อย่างชัดเจน โดยออกซิเจนจากตะกั่วออกไซด์จะถูกรีดิวซ์และตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) จะรวมตัวกันเป็นก้อนโลหะตะกั่ว ทำให้สามารถแยกเฟสของโลหะตะกั่วออกจากเฟสของแก้วได้โดยง่ายดังรูปที่ 4.5 โดยแก้วที่แยกได้จะมีสีเขียวซึ่งเป็นผลจากเหล็กออกไซด์ (Ferrous oxide) จากผงถ่านไม้โลหะตะกั่วที่แยกได้อยู่รวมตัวเป็นก้อนมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) และไม่มีแก้วแทรกอยู่ระหว่างโลหะ

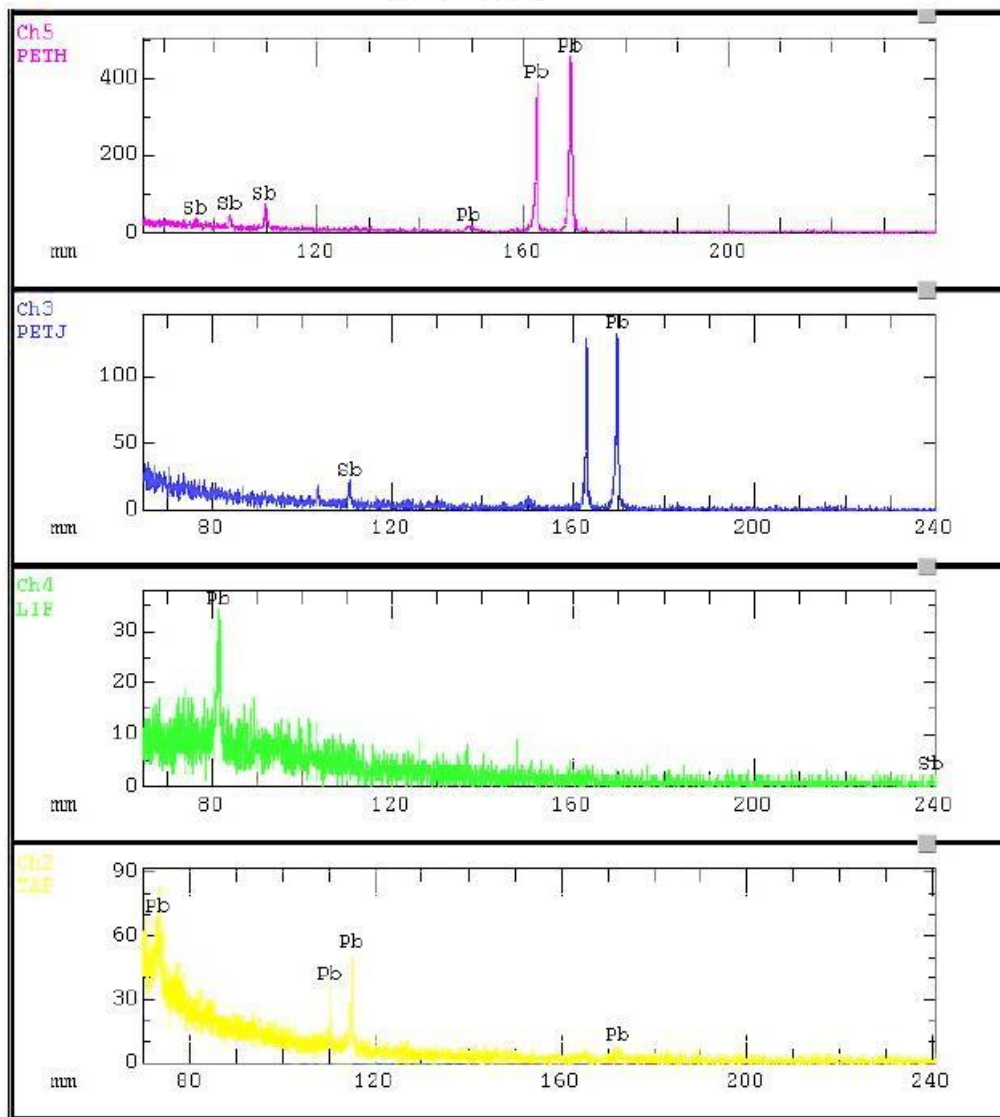
4.3.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบในชิ้นงานโลหะตะกั่วด้วยเทคนิค EPMA (Electron Probe Micro Analysis)



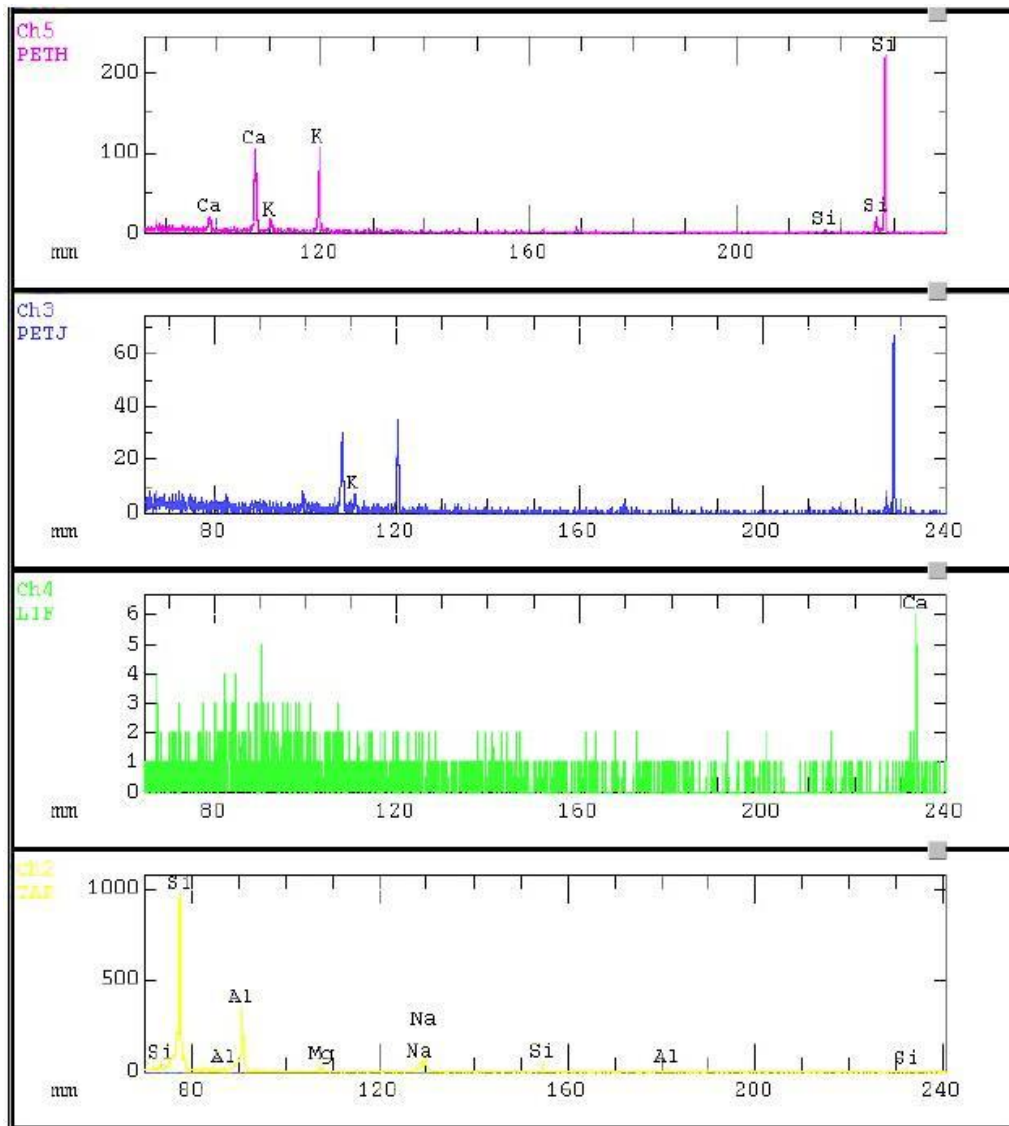
รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางชิ้นงานโลหะตะกั่ว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 20 เท่า

ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานโลหะตะกั่วด้วยเทคนิค EPMA

ส่วน	จุดที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (%โดยอะตอม)						
		Pb	Sb	Na	Mg	Al	K	Ca
โลหะ	1	95.42	4.58					
	2	100	-					
	3	98.17	1.83					
	ค่าเฉลี่ย	97.86	2.14					
ตะกรัน	1			Na	Mg	Al	K	Ca
				27.98	5.10	36.29	16.31	14.35



รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนโลหะของชิ้นงานตะกั่ว



รูปที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนตะกรันของชิ้นงาน

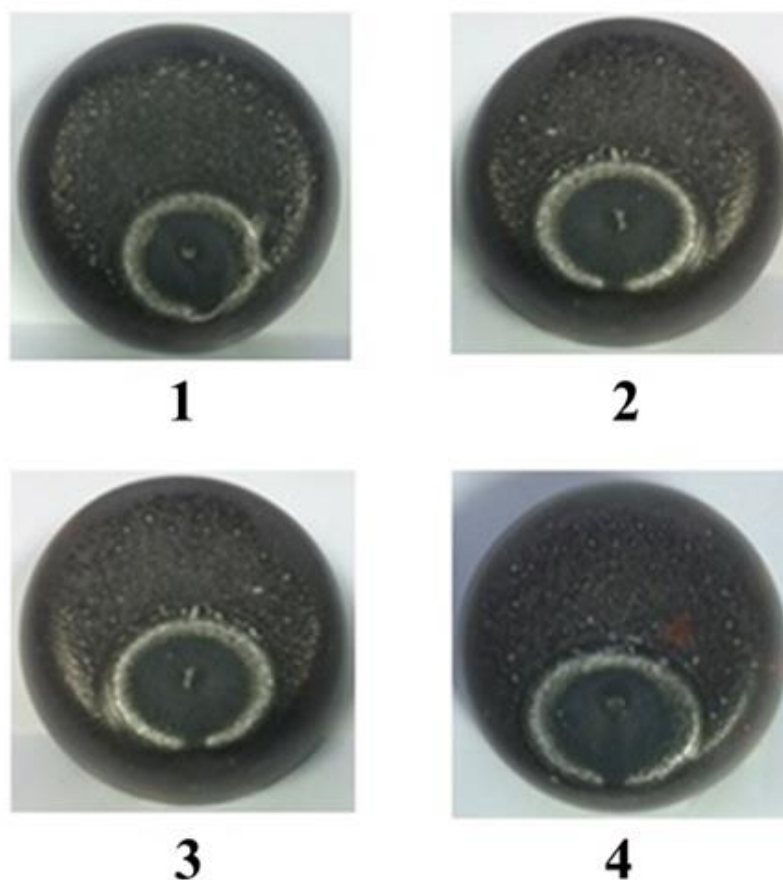
รูปที่ 4.6 แสดงภาพตัดขวางชิ้นโลหะตะกั่วด้วยกำลังขยาย 20 เท่าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) เพื่อให้สามารถครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานโลหะได้ทั้งชิ้น เนื่องจากชิ้นงานโลหะมีขนาดใหญ่เกินกว่าจะถ่ายภาพให้ครอบคลุมด้วยเทคนิค EPMA เมื่อสังเกตชิ้นงานจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA แสดงในตารางที่ 4.5 และผลการยืนยันองค์ประกอบด้วยกราฟซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า ในชิ้นงานโลหะจะประกอบไปด้วยโลหะตะกั่ว (Pb) ร้อยละ 97.86 และ พลวง (Sb) ร้อยละ 2.14 แสดงให้เห็นว่าโลหะตะกั่วที่ได้จากการเก็บกลับคืนด้วยวิธีการหลอมแบบรีดักชันมีความบริสุทธิ์สูงและสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งตะกั่วทุติยภูมิได้

โดยปริมาณพลวงที่พบเจือปนอยู่เล็กน้อย สามารถใช้อธิบายถึงปริมาณพลวงออกไซด์ที่หายไปจากองค์ประกอบในแก้วซีอาร์ทึ่หลังผ่านกระบวนการเก็บกลับคืน(ใช้อธิบายปริมาณพลวงออกไซด์ในตารางที่ 4.3) แสดงว่าพลวงออกไซด์ถูกรีดิวซ์ออกมาจากแก้วซีอาร์ทึ่ร่วมกับตะกั่วออกไซด์นั่นเอง

นอกจากนี้ชิ้นงานโลหะยังมีการเจือปนของตะกั่ว(Slag) ซึ่งมีปริมาณอยู่บริเวณขอบของชิ้นโลหะ องค์ประกอบของตะกั่วที่เราตรวจสอบได้ คือ โซเดียม(Na), แมกนีเซียม(Mg), อลูมิเนียม(Al), โพแทสเซียม(K) และแคลเซียม(Ca) ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานทั่วไปในแก้ว

4.4 ผลการศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทึ่และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะเหมาะสม

4.4.1 ลักษณะทั่วไปของชิ้นงานที่สามารถเก็บกลับคืนได้จากแก้วซีอาร์ทึ่และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.9 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการเก็บกลับคืนที่อุณหภูมิการหลอม 1200 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิการแยกตัวของโลหะที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงในอัตราส่วนต่างๆ



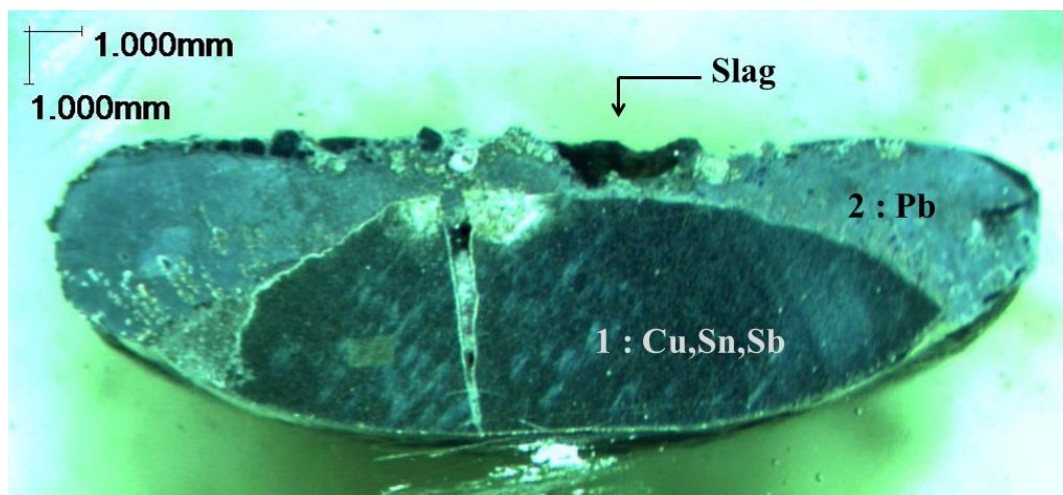
รูปที่ 4.10 ลักษณะชิ้นงานโลหะที่แยกได้



รูปที่ 4.11 ลักษณะแก้วที่แยกได้

จากรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงลักษณะชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ที และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่อุณหภูมิการหลอม 1200 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิการแยกตัวของโลหะที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง พบว่าโลหะแยกเฟสที่ชัดเจนออกจากเนื้อแก้ว เช่นเดียวกับการแยกตัวของโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ที และเมื่อสังเกตแก้วและโลหะที่แยกได้ด้วยตาเปล่าพบว่า ชิ้นงานโลหะแบ่งเฟสออกเป็นส่วน ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นผลจากการตกผลึกแยกตัวของโลหะที่มีความหนาแน่นต่างกัน โดยโลหะที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว จะตกลงไปอยู่ส่วนล่างก่อน หลังจากนั้นโลหะที่มีความหนาแน่นรองลงมาจะตกตาม เช่น ทองแดง เหล็ก ซึ่งเป็นโลหะประกอบในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนแก้วที่แยกได้พบว่ามีสีน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 4.11

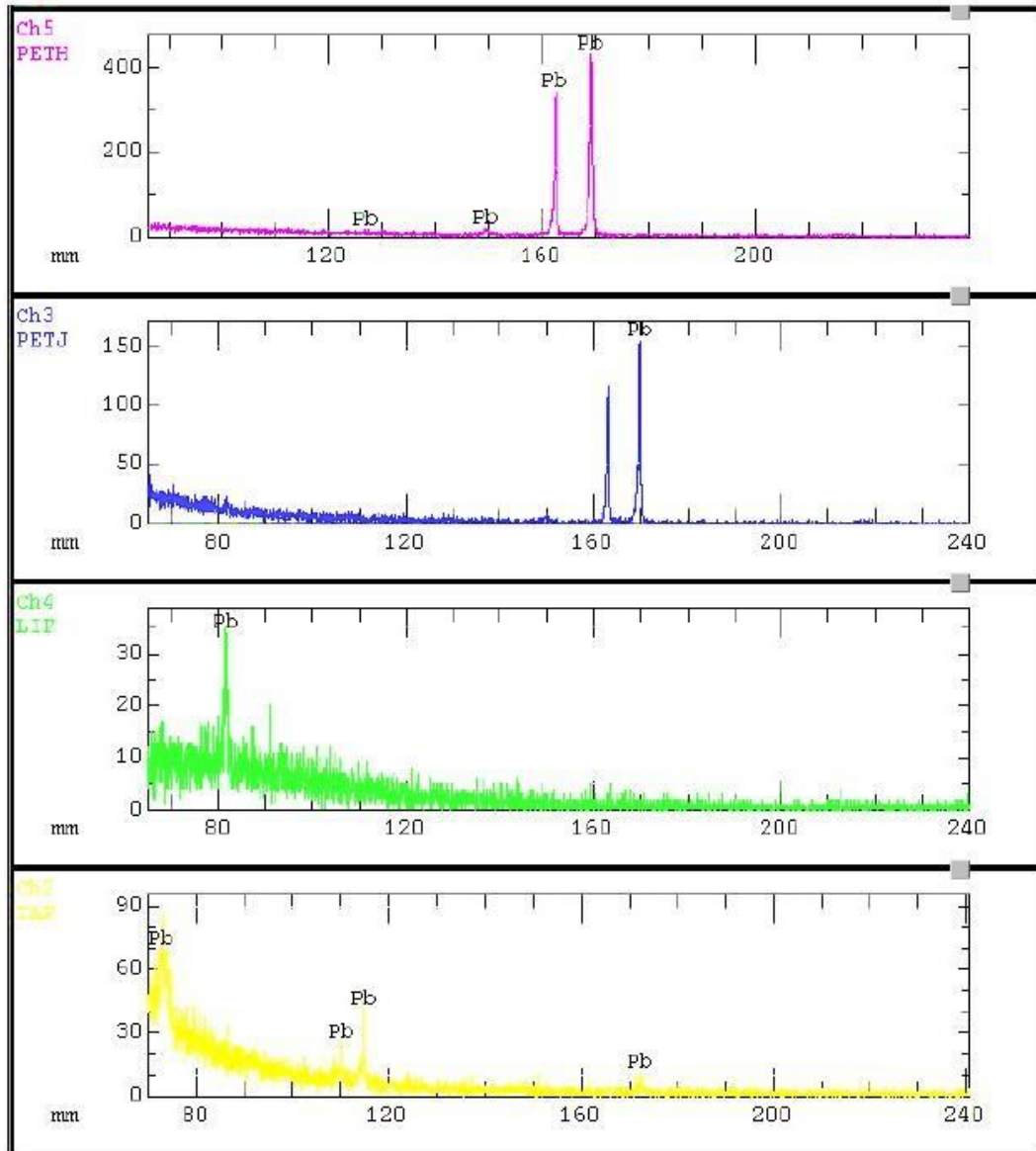
4.4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบในชิ้นโลหะที่เก็บกลับคืนได้จากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะเหมาะสม ด้วยเทคนิค EPMA



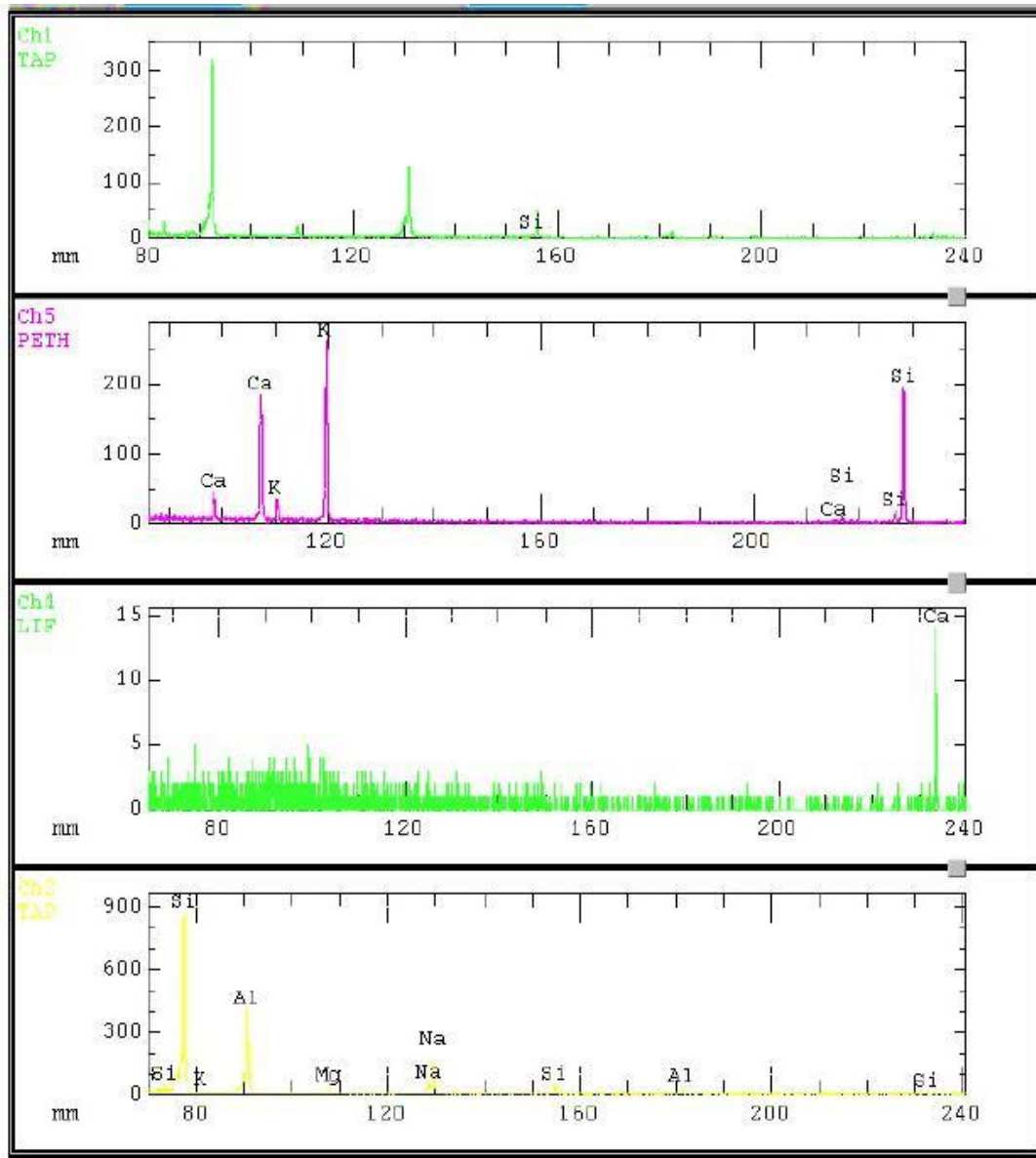
รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางชิ้นงานโลหะ (อัตราส่วนที่ 4 ; แก้วซีอาร์ที 30 กรัม : แผงวงจร 30 กรัม)
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 18 เท่า

ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานโลหะด้วยเทคนิค EPMA

ส่วน	จุดที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (%โดยอะตอม)				
		Cu	Sn	Sb	Ni	
โลหะ (1)	1	71.29	25.22	3.49	-	
	2	68.46	23.76	3.99	3.77	
	3	65.33	31.28	3.39	-	
	ค่าเฉลี่ย	68.36	26.75	3.62	1.26	
โลหะ (2)	1	Pb		Sb		
		100		-		
	2	99.70		0.30		
	3	100		-		
	ค่าเฉลี่ย	99.90		0.10		
ตะกั่ว	1	Na	Mg	Al	K	Ca
		23.67	3.90	28.38	26.62	17.43



รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนที่ 2 ของโลหะในชิ้นงานที่ได้จากการเก็บกลับคืน
ในแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ในส่วนตะกรันของชิ้นงานที่ได้จากการเก็บกลับคืน
ในแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 พร้อมกราฟยืนยันองค์ประกอบที่พบในชิ้นงานซึ่งแสดงในรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ใช้อธิบายองค์ประกอบในส่วนต่างๆของชิ้นงานรูปที่ 4.12 คือในส่วนที่ 1 ของโลหะประกอบด้วยทองแดงเป็นหลักร้อยละ 68.36 รองลงมาเป็นดีบุก ร้อยละ 26.75 ตามมาด้วยพลวงและนิกเกิล โลหะดังกล่าวเป็นองค์ประกอบในการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในส่วนที่ 2 ของโลหะ มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งได้จากการรีดิวซ์ตะกั่วออกไซด์จากแก้วซีอาร์ที

และเมื่อสังเกตภาพตัดขวางของชิ้นงาน จะพบว่าลักษณะการตกผลึกของตะกั่วอยู่บริเวณขอบและรอบๆของกลุ่มโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แสดงให้เห็นว่าตะกั่วเกิดการตกผลึกก่อนด้วยความหนาแน่นที่มากกว่า และเนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดอย่างต่อเนื่องทำให้ตะกั่วบางส่วนเกิดการตกผลึกรอบโลหะที่แยกได้จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังพบตะกรันจากการหลอมโลหะในปริมาณเล็กน้อยบริเวณผิวของชิ้นงานเช่นเดียวกับชิ้นโลหะตะกั่วที่ได้จากกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีอีกด้วย

4.4.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ทีเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีในแก้วที่ได้จากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะเหมาะสม

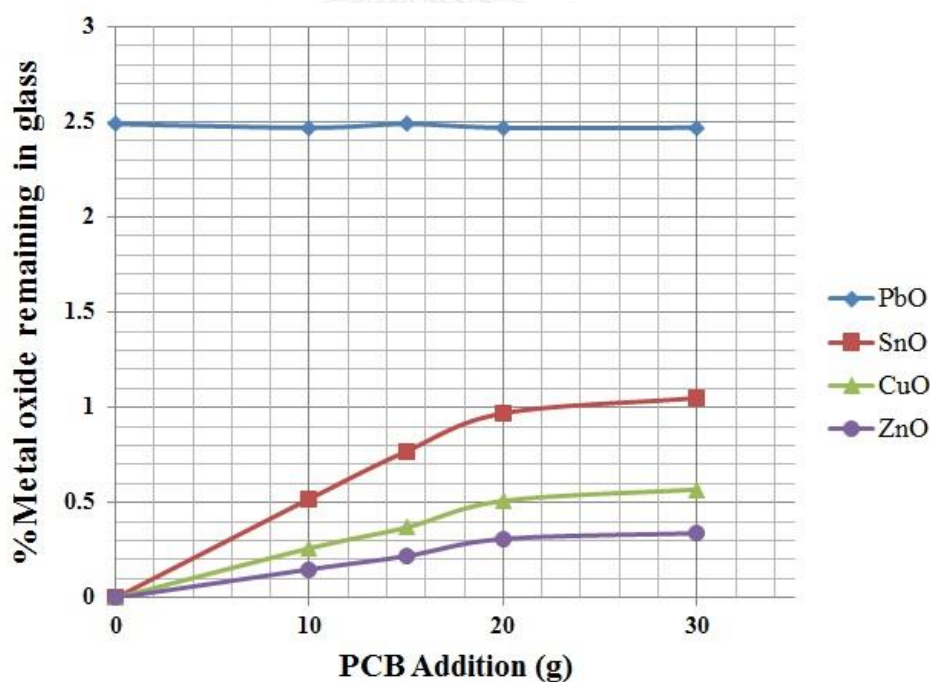
ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในแก้วจากกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะด้วยเทคนิค XRF

ออกไซด์	แก้วซีอาร์ที ณ สภาวะ เหมาะสม	อัตราส่วนที่			
		1	2	3	4
SiO ₂	48	48.2	47.32	47.73	47.76
Na ₂ O	27.2	27.2	28.2	27.01	27.15
K ₂ O	8.3	7.74	7.64	7.69	7.67
Al ₂ O ₃	5.76	5.64	5.09	5.36	5.23
CaO	5.05	5.12	5.11	5.14	5.07
PbO	2.49	2.47	2.49	2.47	2.47
MgO	1.6	1.51	1.55	1.5	1.5
BaO	0.51	0.54	0.59	0.6	0.56
SnO	-	0.52	0.77	0.97	1.05
SrO	0.49	0.39	0.45	0.49	0.42
CuO	-	0.26	0.37	0.51	0.57
Fe ₂ O ₃	0.24	0.26	0.2	0.22	0.21
ZnO	-	0.15	0.22	0.31	0.34
ZrO ₂	0.13	-	-	-	-

* หมายเหตุ : อัตราส่วนที่ 1,2,3,4 มีแก้วซีอาร์ทีคั่งที่ 30 กรัม และมีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 10,15,20 และ 30 กรัม ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.7 แสดงองค์ประกอบทางเคมีในแก้วหลังผ่านกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะ จากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีในแก้วซีอาร์ที ณ สภาวะเหมาะสม เพื่อสังเกตปริมาณของตะกั่วออกไซด์ ซึ่งพบว่าปริมาณตะกั่วออกไซด์ตกค้างในแก้ว จากกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่แตกต่างจากปริมาณ ตะกั่วออกไซด์ตกค้างในแก้วจากการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่ว ซึ่งยืนยันว่าโลหะตะกั่วจากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ไม่ถูกหลอมกลับเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งในเนื้อแก้ว

หากพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆพบว่าในแก้วมีองค์ประกอบของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO), ดีบุกออกไซด์ (SnO), และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เพิ่มขึ้นในองค์ประกอบของแก้ว ซึ่งโลหะดังกล่าว เป็นองค์ประกอบในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยการเกิดปริมาณองค์ประกอบเหล่านี้ตกค้างอาจ เนื่องมาจากอุณหภูมิในการหลอมแก้วซีอาร์ทีร่วมกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ โลหะดังกล่าวจึงทำให้โลหะเหล่านี้ไม่สามารถถูกหลอมออกมารวมตัวเป็นก้อนโลหะได้ทั้งหมด และเมื่อ เปรียบเทียบอัตราส่วนของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์(1, 2, 3, 4) จะสังเกตว่าปริมาณตกค้างของโลหะ ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แต่มี แนวโน้มคงที่เมื่อปริมาณของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง แต่ปริมาณของโลหะออกไซด์ที่ เกิดขึ้นดังกล่าวถือเป็นเพียงปริมาณเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณโดยรวมของแก้ว



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบปริมาณโลหะออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแก้วจากกระบวนการเก็บกลับคืน

4.4.4 การศึกษาแนวโน้มปริมาณโลหะจากการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ผลการศึกษาปริมาณการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีอัตราส่วนระหว่างแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ 1,2,3 และ 4 โดยแต่ละอัตราส่วนมีปริมาณแก้วซีอาร์ทีที่คงที่และปริมาณแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลงไปในการบวนการ ปริมาณของโลหะที่สามารถเก็บกลับคืนได้จะมีเพิ่มขึ้น และจากผลการเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ทีปริมาณ 30 กรัม สามารถเก็บกลับคืนโลหะตะกั่วได้ในปริมาณ 5.4 กรัม (อ้างอิงจากการทดลองส่วนที่ 1) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 18 ของน้ำหนักแก้วซีอาร์ที หรือคิดเป็นร้อยละ 78.97 ของปริมาณโลหะตะกั่วที่มีอยู่ในแก้วซีอาร์ที จึงทำให้สามารถจำแนกรายละเอียดของปริมาณโลหะที่สามารถเก็บกลับคืนได้ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.17 ตารางที่ 4.8 รายละเอียดปริมาณการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตามอัตราส่วนต่างๆ ณ สภาวะเหมาะสม

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดปริมาณการเก็บกลับคืนโลหะจากแก้วซีอาร์ทีและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตามอัตราส่วนต่างๆ ณ สภาวะเหมาะสม

อัตราส่วนที่	ปริมาณ (กรัม)		น้ำหนักโลหะจากการเก็บกลับคืน (กรัม)	ปริมาณ (กรัม)		ร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะในแผงวงจร
	แก้วซีอาร์ที	แผงวงจร		โลหะตะกั่วจากแก้วซีอาร์ที	โลหะจากแผงวงจร	
1	30	10	6.74	5.4	1.34	13.4
2		15	8.12		2.72	18.13
3		20	9.23		3.83	19.15
4		30	11.2		5.8	19.33
					ค่าเฉลี่ย	17.5

และจากข้อมูลปริมาณโลหะที่สามารถเก็บกลับคืนได้ในตารางที่ 4.8 ทำให้ทราบถึงปริมาณโลหะที่มีอยู่ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเก็บกลับคืนในครั้งนี้ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณร้อยละ 17 ของปริมาณแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีปริมาณมากพอเนื่องจากปริมาณโลหะที่เก็บกลับคืนได้ดังกล่าวยังไม่นับรวมกับโลหะที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นส่วนต่างๆของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นแหล่งที่มีความเหมาะสมเพียงพอที่จะใช้เป็นแหล่งในการเก็บกลับคืนเพื่อนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ต่อไป

รายการอ้างอิง

- Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., & Dyer, T. D. (2001, 19-20 March). *Utilisation of EOL CRT-Glass as a Glaze Raw Material*. Paper presented at the Proceedings of the International Symposium Organised by the Concrete Technology, University of Dundee, Scotland, United Kingdom.
- ICF Incorporated. (May,1999). Cathode Ray Tube Glass to Glass Recycling. Retrieved from U.S.Environmental Protection Agency website:
[http://yosemite1.epa.gov/ee/epa/ria.nsf/vwAN/S99-23.pdf/\\$file/S99-23.pdf](http://yosemite1.epa.gov/ee/epa/ria.nsf/vwAN/S99-23.pdf/$file/S99-23.pdf)
- Inano, H. (2009). *Pb Recovery from the Waste CRT Glass by Reduction Melting Method* [CD-ROM]. Sapporo, Hokkaido, Japan: Hokkaido Industrial Research Institute.
- Inano, H. (2011). *Effect of Alkali Metal Oxide on Pb Recovery from the Waste CRT Glass by Reduction Melting Method* Paper presented at the Proceedings of EcoDesign 2011: 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Sapporo, Hokkaido, Japan.
- Massachusetts Institute of Technology. (2002). Ellingham Diagrams.
http://web.mit.edu/2.813/www/readings/Ellingham_diagrams.pdf
- microlinepcb. (2010). printed circuit boards. January, 2014, from
<http://microlinepcb.com/>
- PCBuniverse. (2013). types of printed circuit boards. January,2014, from
www.pcbuniverse.com
- Shuey, S. A., Vildal, E. E., & Taylor, P. R. (2004, 23-25 February). *A Review of Pyrometallurgical Treatment of Electronic Scrap*. Paper presented at the SME Annual Meeting, Denver, Colorado, USA.
- wikipedia. (2014a). flexible electronics. May, 2014, from
http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_electronics
- wikipedia. (2014b). visual display unit. May,2014, from
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%88%E0%B8%AD%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E>
- Won, S. W., Mao, J., Kwak, I.-S., Sathishkumar, M., & Yun, Y.-S. (2010). Platinum recovery from ICP wastewater by a combined method of biosorption and incineration. *Bioresource Technology*, 101(4), 1135-1140.
- Yonezawa, T. O. S. (2012). Energy-efficient modification of reduction-melting for lead recovery from cathode ray tube funnel glass. *Waste Management*, 33, 6.

- Zhou, G., Luo, Z., & Zhai, X. (2007, 5-7 September). *Experimental Study on Metal Recycling from Waste PCB*. Paper presented at the Proceeding of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, India.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2551). คู่มือการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (pp. 204). 5/80 หมู่ 1 เขตบางบอน กรุงเทพฯ 10150: บริษัทไทยเอฟเฟคท์สตูดิโอ.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2553). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาหลักเกณฑ์ วิธีการ เงื่อนไข และ อัตราการจัดเก็บค่าธรรมเนียมการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (pp. 410).
- กรมควบคุมมลพิษ. (2556). ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย. มกราคม, 2557, from www.greenworld.or.th
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2552). เทคโนโลยีการแยกสกัดโลหะมีค่าและโลหะพื้นฐานจากขยะอิเล็กทรอนิกส์. Retrieved from กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ website: www.dpim.go.th/service/download?articleid=3498&F=6472
- กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน. (2551). บทที่ 5 ทองคำโลหะกับการพัฒนาประเทศ (pp. 9). กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. Retrieved from www.dpim.go.th/service/download?articleid=3269&F=4830.
- ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์. (2553). บทที่ 9 การเก็บกลับคืนทรัพยากรและนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรม การเก็บกลับคืนทรัพยากรและนำกลับมาใช้ใหม่ (pp. 506): สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เปรมฤดี กาญจนปิยะ และคณะ. (2554). เทคโนโลยีการจัดการซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (Ed.) (pp. 148).
- สุจิตรา วาสนาดำรงดี และ ปเนต มโนมัยวิบูลย์. (2555). การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ (E-waste). Retrieved from ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย website: http://www.hsm.chula.ac.th/research/paper/e-waste_management/e-waste_management1.pdf



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

XRF

X-ray Fluorescence

เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่าง จะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออกจากอะตอมในรูปแบบโฟโตอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างชั้นในวงอิเล็กตรอนนั้น และเกิดความไม่เสถียรขึ้นในอะตอม จึงให้อิเล็กตรอนวงที่อยู่ถัดออกมาด้านนอกเกิดการคายพลังงานแล้วปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray) ออกมา หรือที่เรียกกันว่า X-ray Fluorescence นั่นเอง โดยปกติเครื่อง XRF จะทำการวัดค่า λ ของธาตุที่ต้องการซึ่งหลักในการวัดค่า λ มีด้วยกัน 2 วิธี ดังนี้

1. **Sequential** จะมีชุด rotating optical assembly หรือที่เรียกว่า Goniometer ซึ่งทำให้สามารถวัดค่า λ ของธาตุต่างๆโดยการวัดที่ละธาตุเรียงกัน ตัว analysis crystal จะหมุนไป, θ จะเพิ่มขึ้น ขณะที่ detector จะหมุน 2θ เพื่อรับกับ diffraction beam ทำให้เกิด peak ซึ่งถูก detect ได้ที่ค่า λ ต่างๆ ตาม Bragg's Law ; $n\lambda = 2d\sin\theta$

2. **Simultaneous** ธาตุแต่ละธาตุจะถูกวัดในเวลาเดียวกันโดยการใช้ Preassembly fired channel ที่จัดเรียงไว้รอบๆสารตัวอย่าง แต่ละชุดนั้นจะเป็น self-contained spectrometer โดยมี analysis crystal และ detector ปรับเพื่อรับค่า λ จากธาตุเฉพาะที่ต้องการ

ประโยชน์ทั่วไปของ XRF

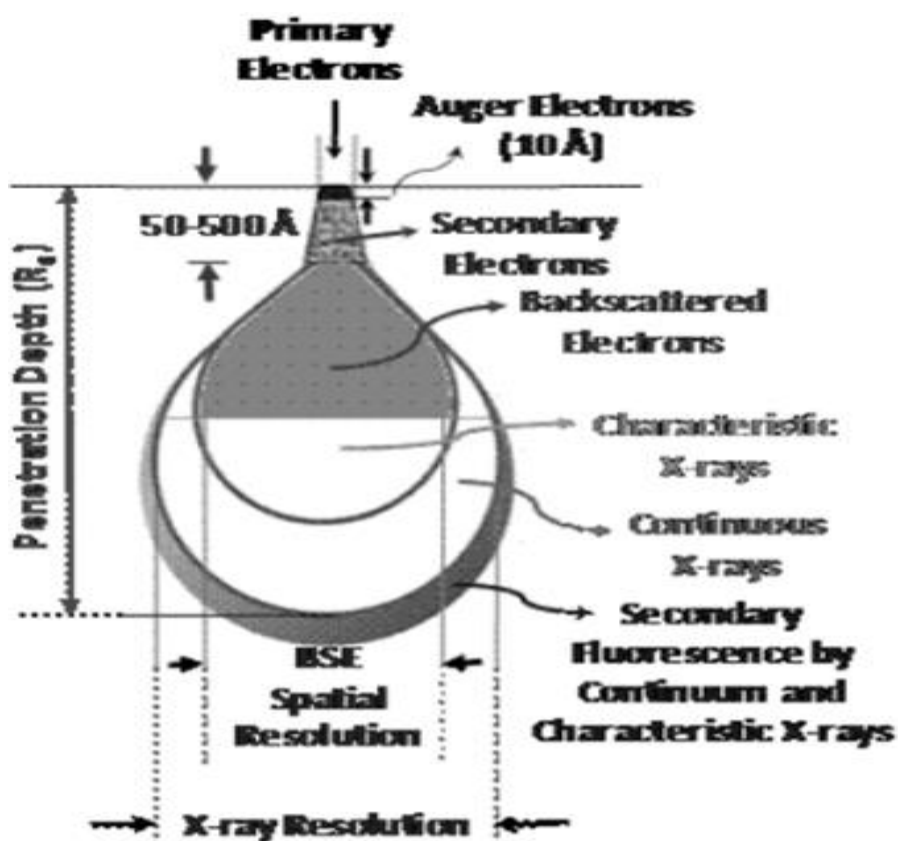
1. ใช้หาค่าประกอบทางเคมีของสารทั้งในรูปของแข็งและของเหลว
2. ใช้หาความหนาและองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง
3. XRF เป็นเทคนิคที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว และไม่ทำลายตัวอย่าง
4. ใช้ปริมาณสารตัวอย่างในการวิเคราะห์น้อย

ข้อจำกัด

เมื่อนำธาตุเบา (Disperse element) มาวิเคราะห์จะเกิดปัญหาในการ detect เพราะจะเกิดการ absorption ในสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการ Fluorescence radiation

EPMA ELECTRON PROBE MICRO ANALYSIS

หลักการของเทคนิค EPMA จะเป็นการยิงลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปกระทบยังสารตัวอย่าง และทำให้เกิดสัญญาณต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยภาพ Penetration Tear Drop

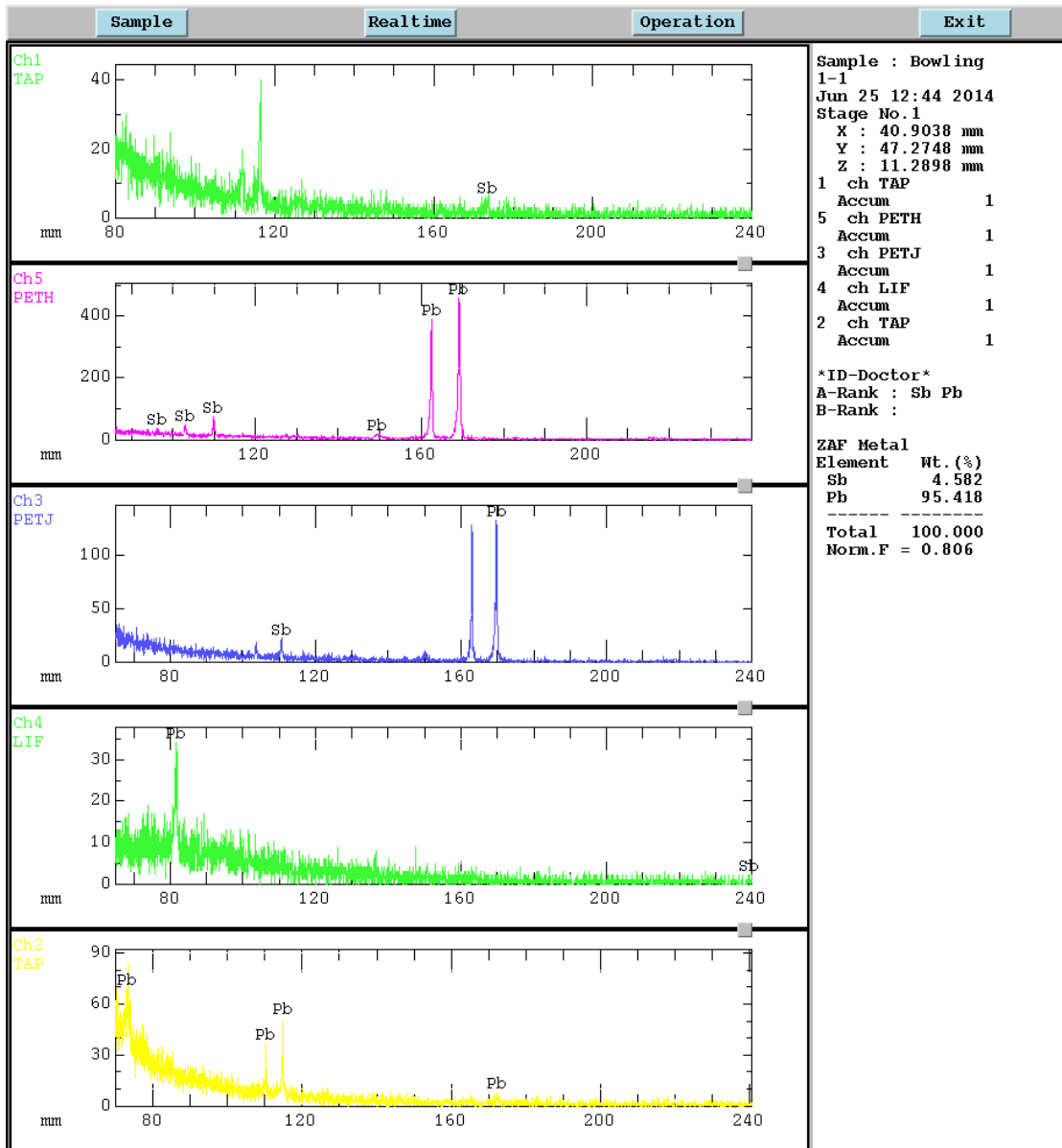


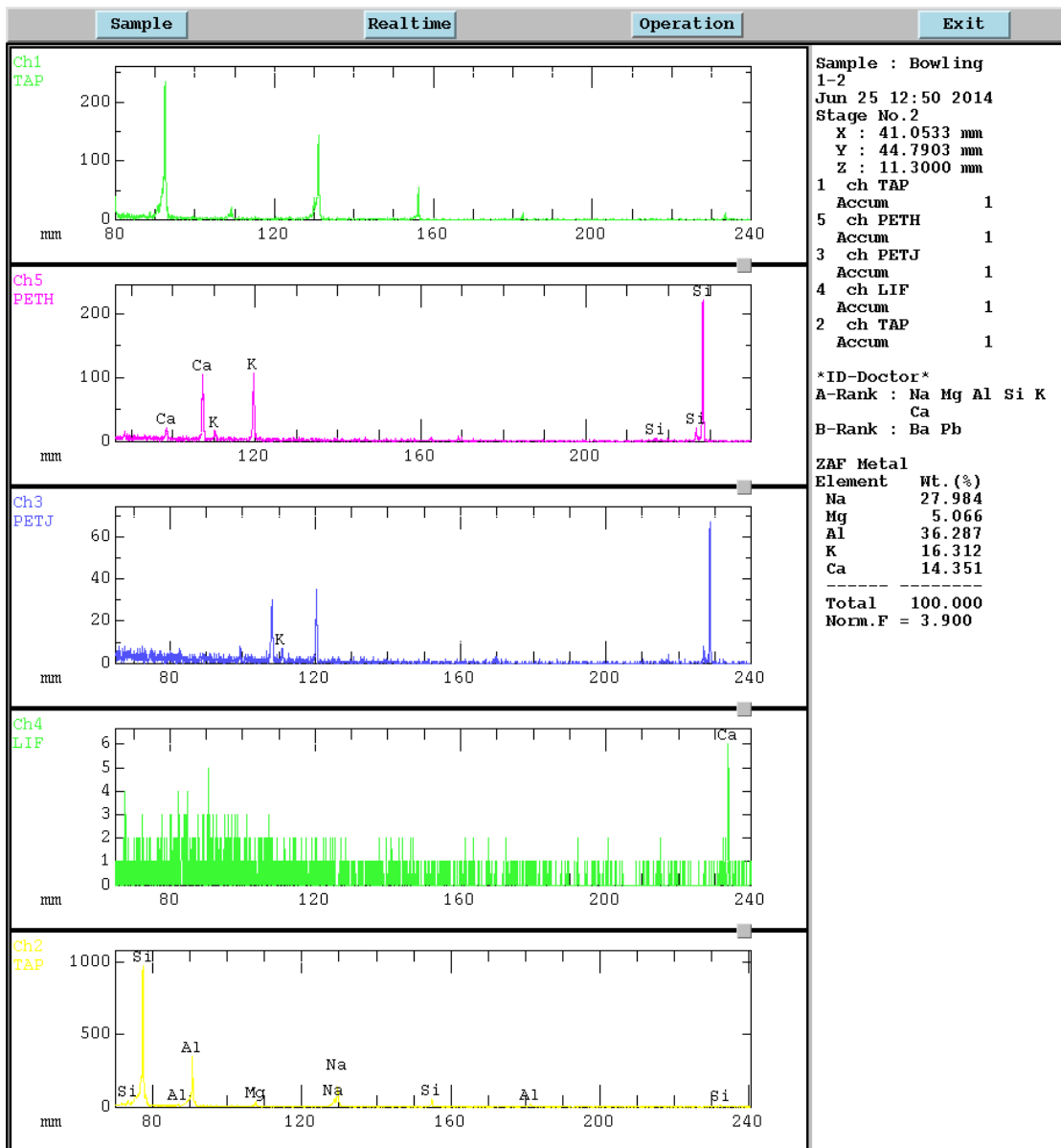
โดยเทคนิค EPMA สามารถใช้ตรวจสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบในสารตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพ (Qualitative) และ เชิงปริมาณ (Quantitative)

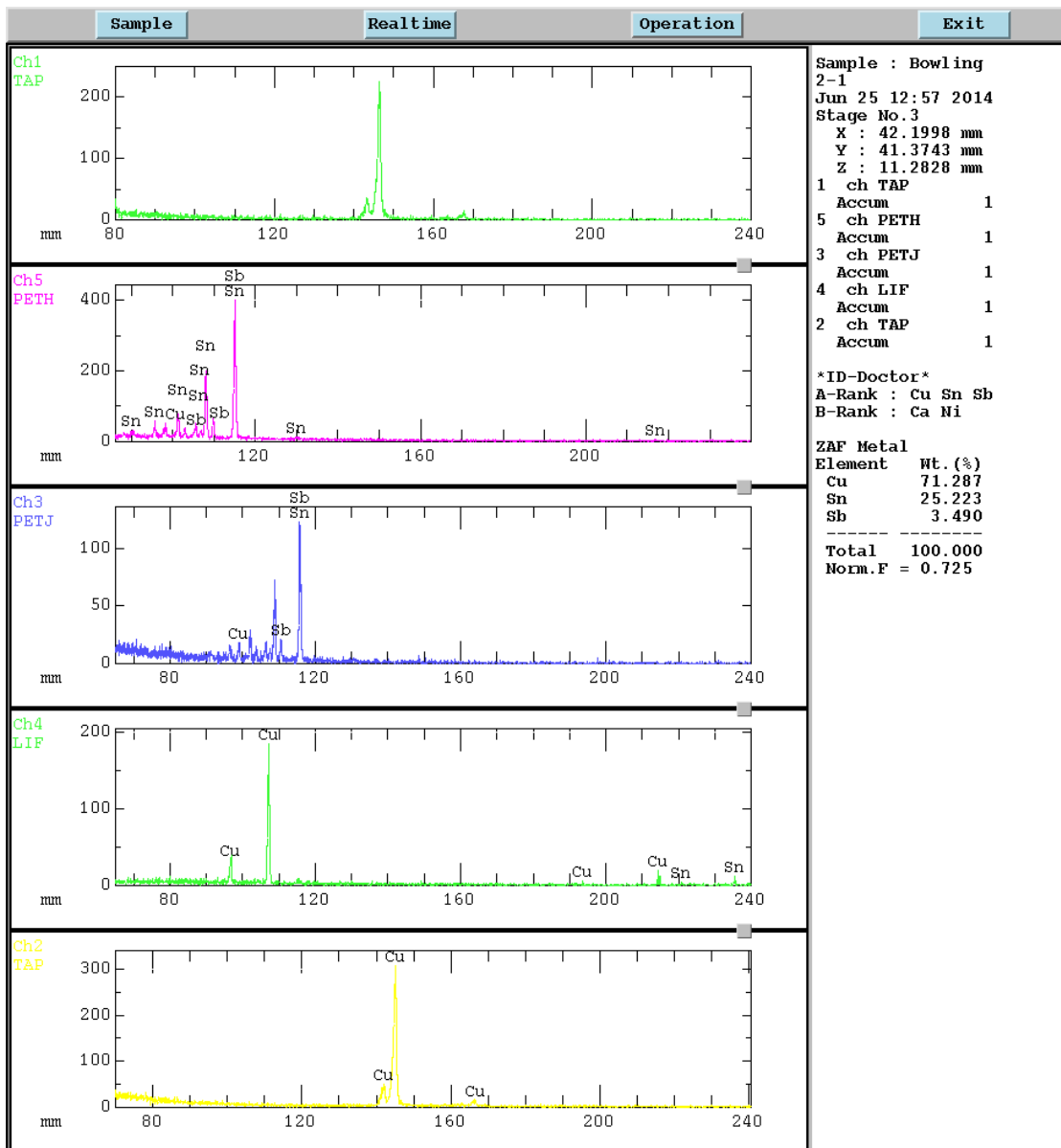
การเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA

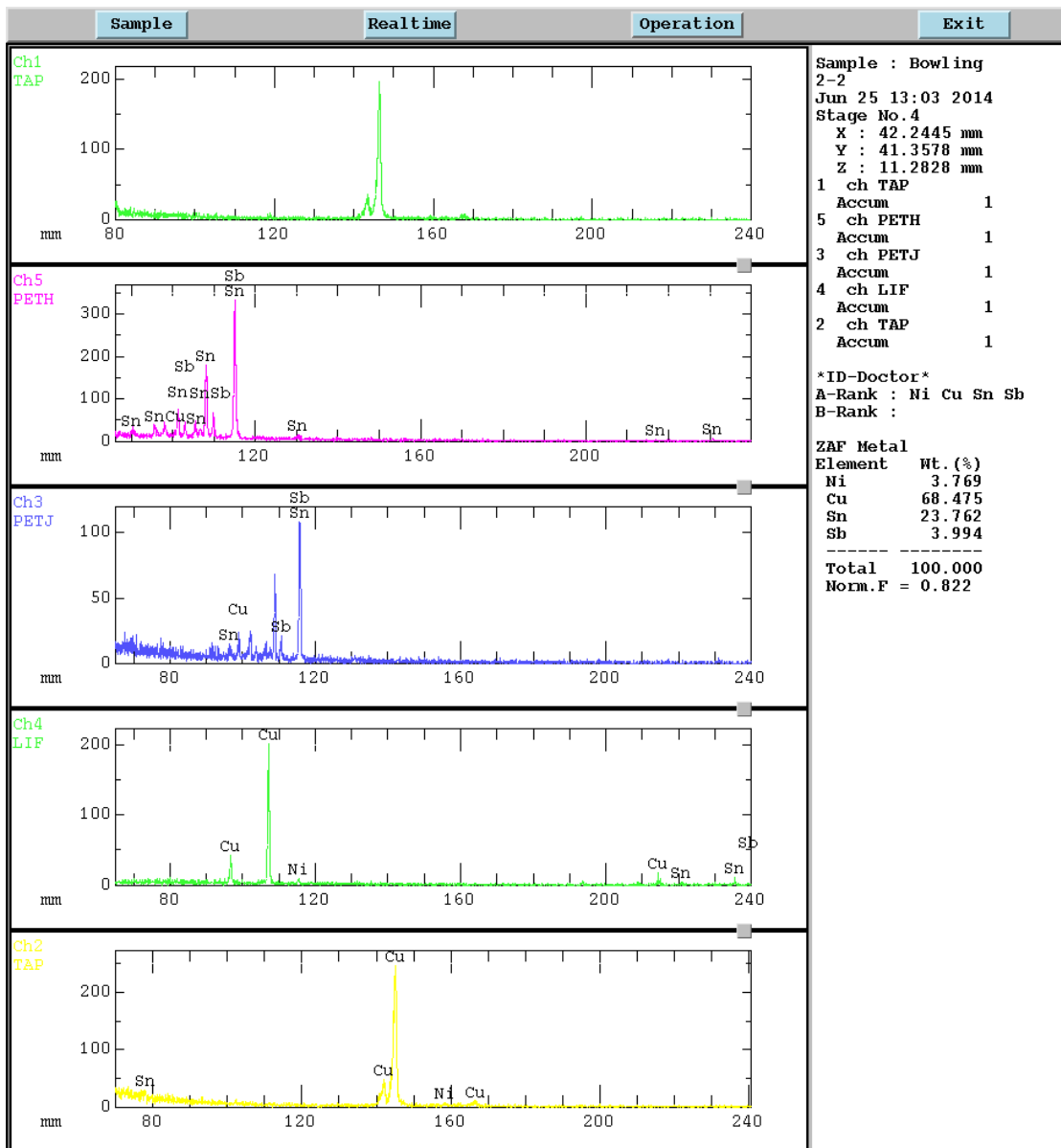
1. ถ้าสารตัวอย่างมีสมบัติไม่นำไฟฟ้า เช่น เซรามิกส์ พอลิเมอร์ จะต้องทำการเคลือบผิวหน้าตัวอย่าง (Coating) ด้วยทองคำ
2. ถ้าสารตัวอย่างมีสมบัตินำไฟฟ้า เช่น โลหะ จะต้องทำการเคลือบผิวหน้าตัวอย่างด้วยคาร์บอน

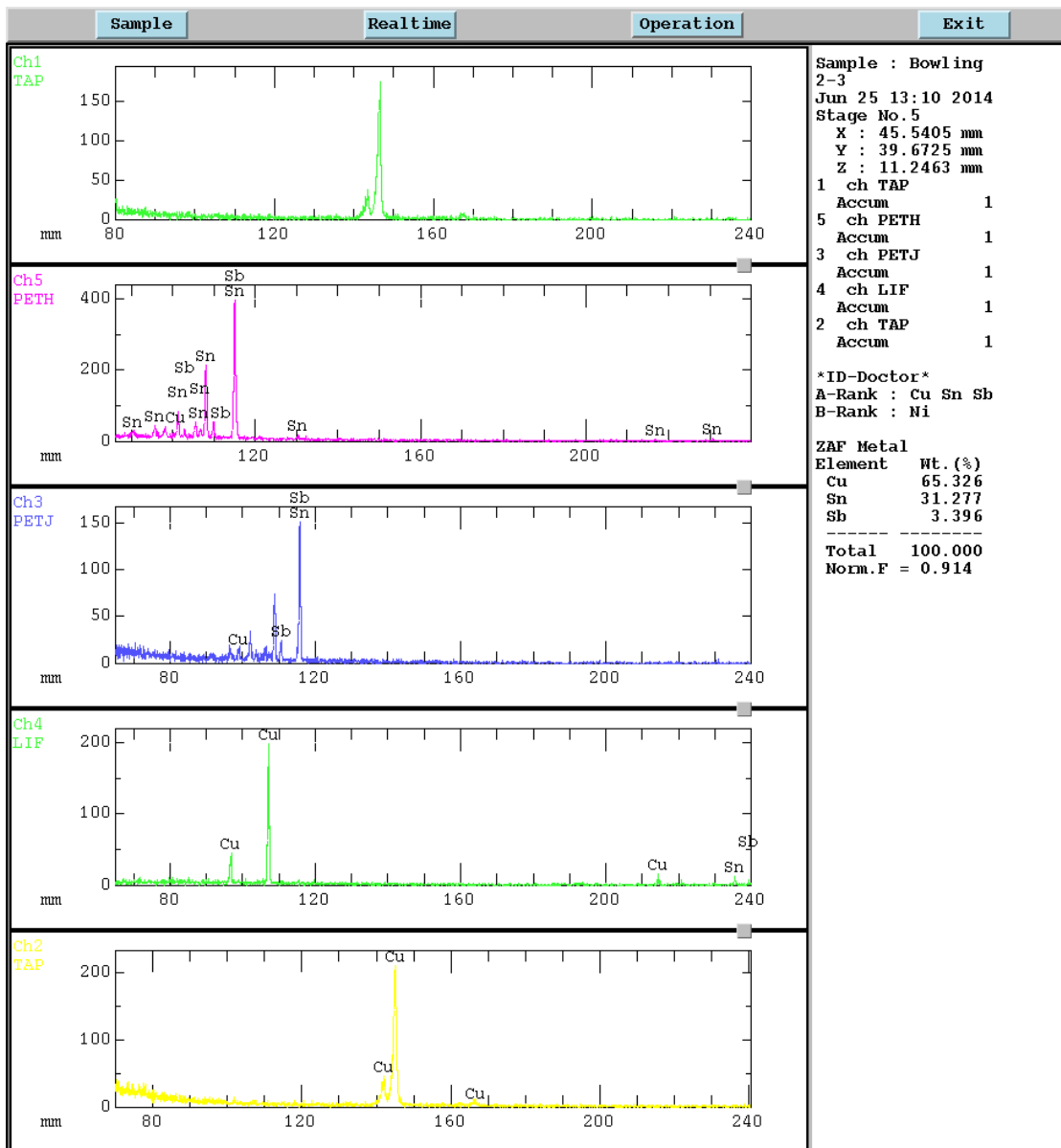
ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA (ส่วนเพิ่มเติม)

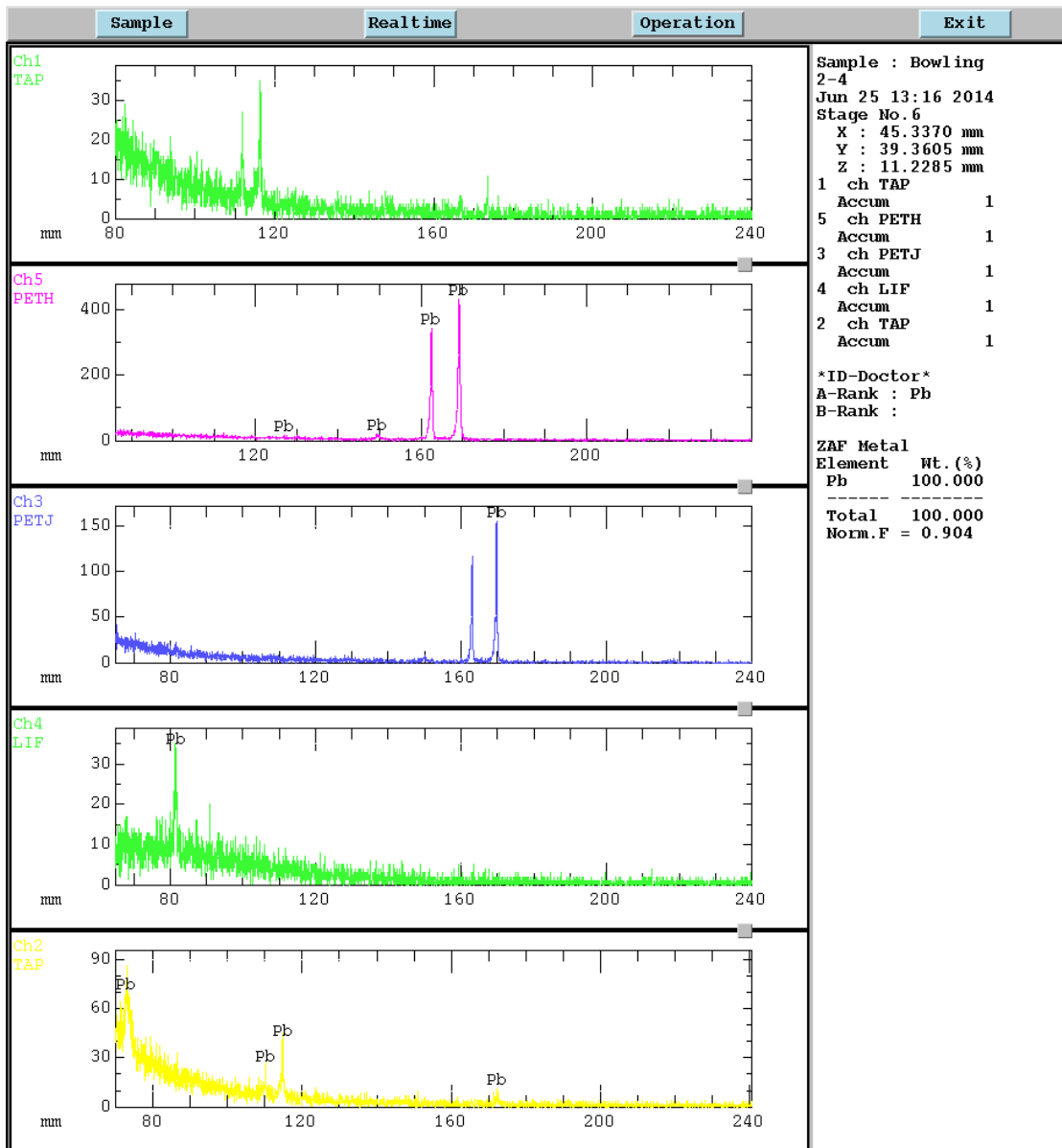


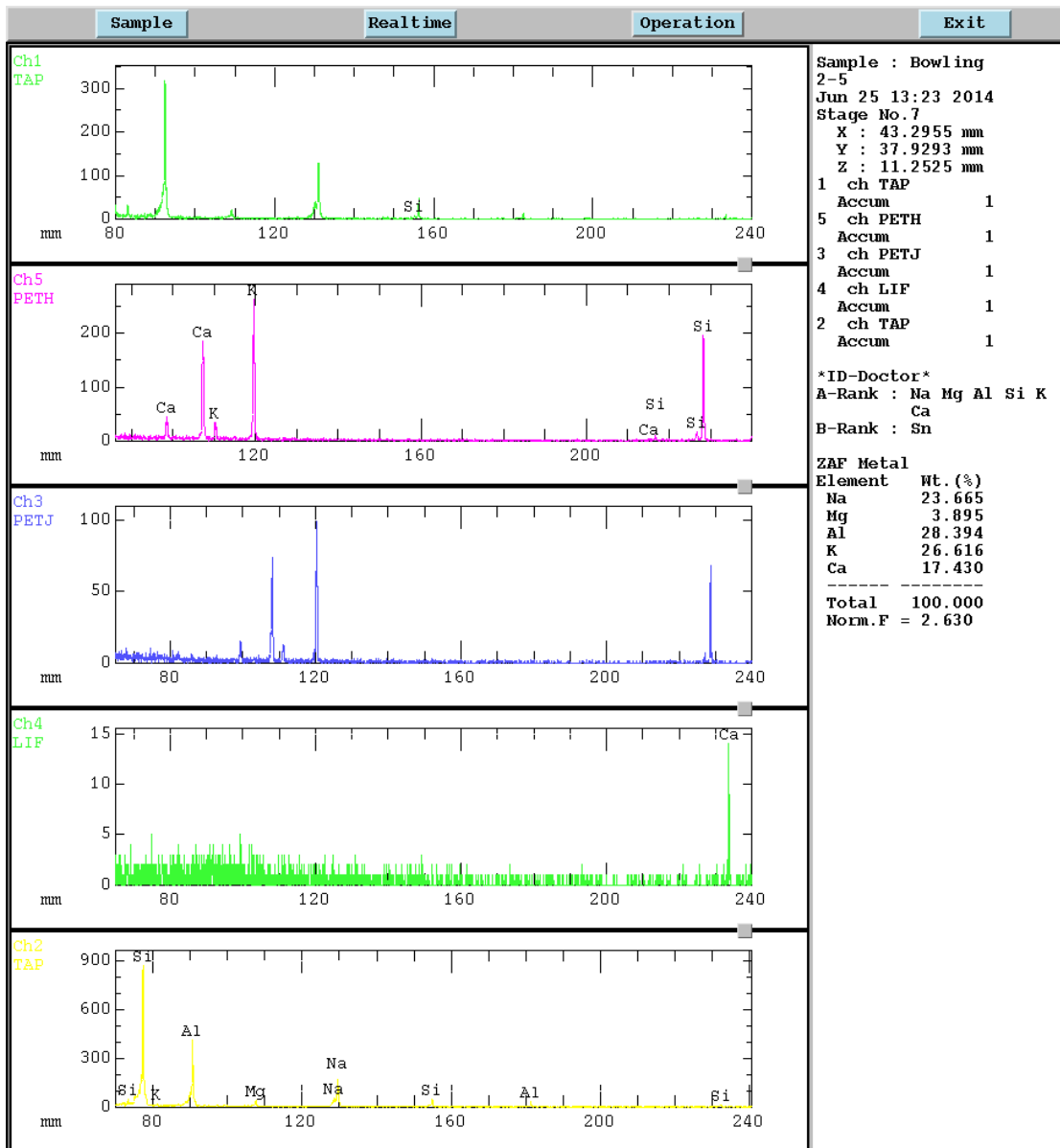








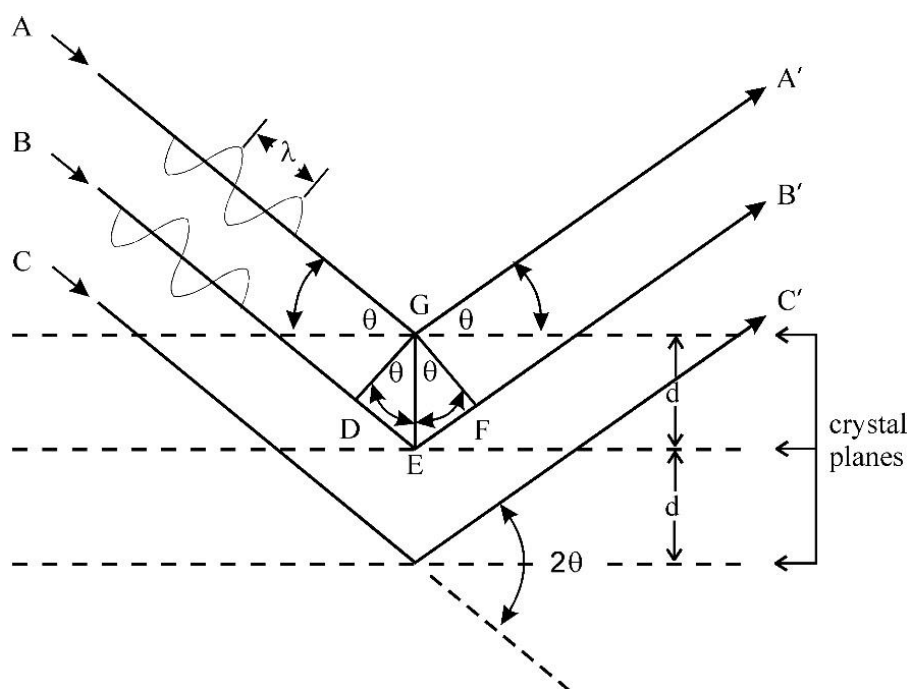




XRD

X-ray Diffraction

หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะอาศัยหลักการของ Bragg's Law ในการคำนวณการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่วิ่งผ่านชั้นผลึก โดยจะมองว่าผลึกนั้นจะประกอบด้วยชั้นอะตอมเป็นชั้นเล็กๆ และเมื่อฉายรังสีเอ็กซ์สู่ผลึก จะทำให้เกิดการสะท้อนที่ผิวของอะตอมแต่ละชั้น ดังรูป

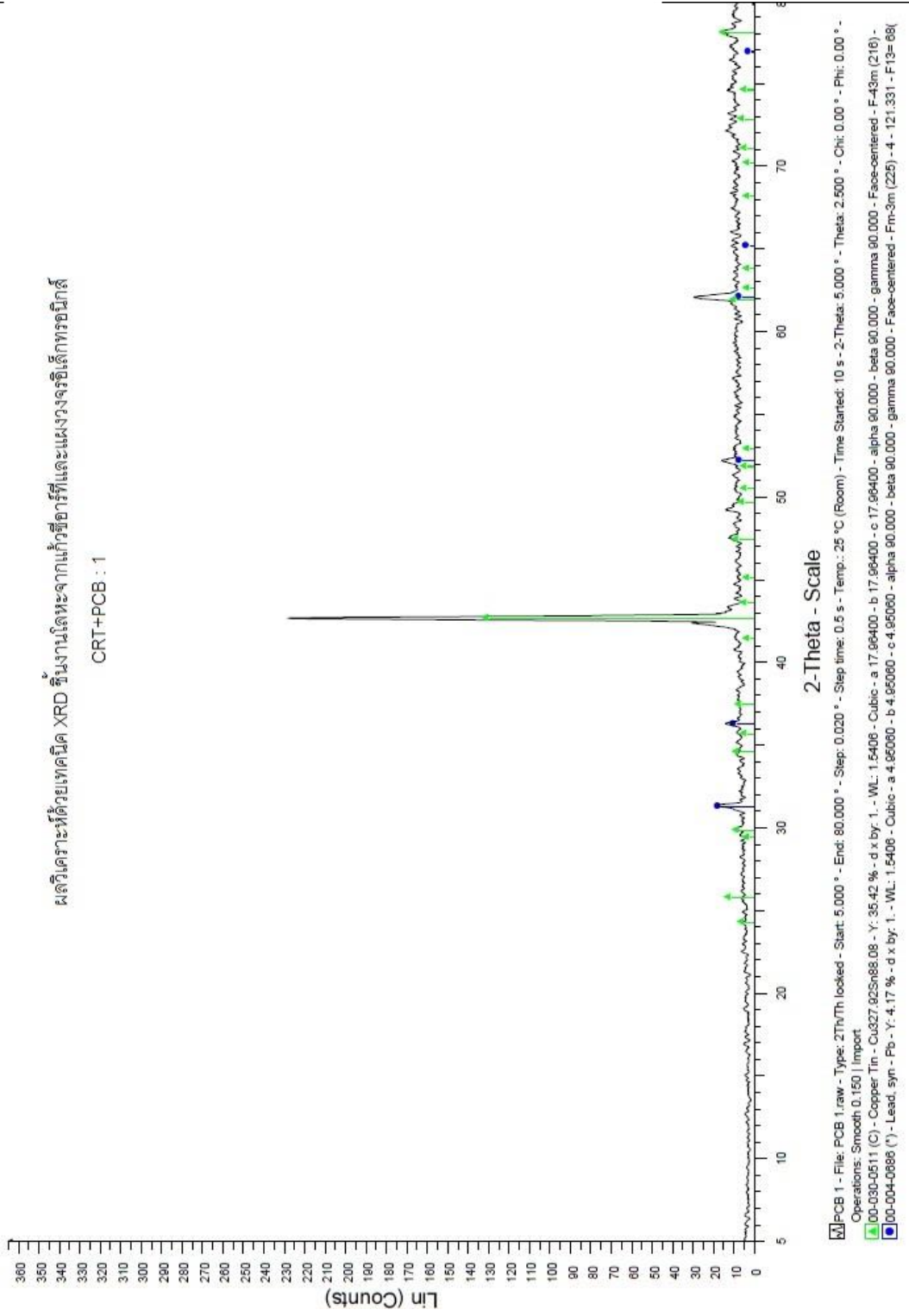


โดยการแทรกสอดแบบเสริมกันจากรังสีสะท้อนทั้งสองเกิดขึ้นได้เฉพาะมุม θ บางมุม ที่มีความแตกต่างระหว่างระยะทางคลื่น ($n\lambda$; $n = 1,2,3,\dots$)

$$\text{Bragg's Law; } n\lambda = 2d\sin\theta$$

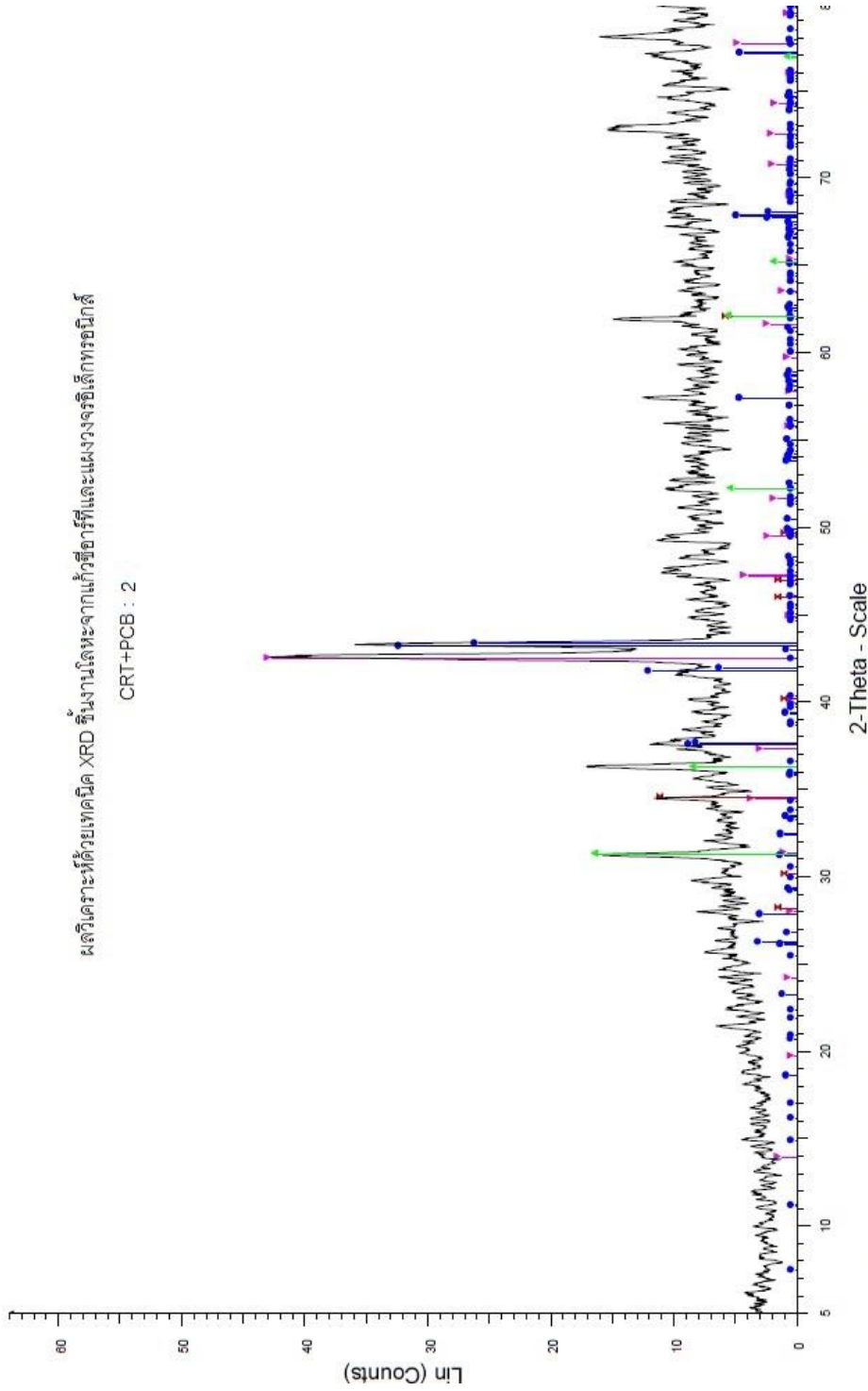
ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์จะสามารถจำแนกสารตัวอย่างออกมาตามโครงสร้างผลึกที่พบ ผลวิเคราะห์ที่ได้จะเป็นในเชิงคุณภาพ (Qualitative)

ข้อจำกัด ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD คือ ไม่สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างเพื่อหาปริมาณได้ นอกจากนั้นแล้ว สารตัวอย่างจะต้องมีสมบัติเป็นผลึก(Crystal) เพราะเครื่อง XRD ไม่สามารถวิเคราะห์สารองค์ประกอบในรูป amorphous ได้

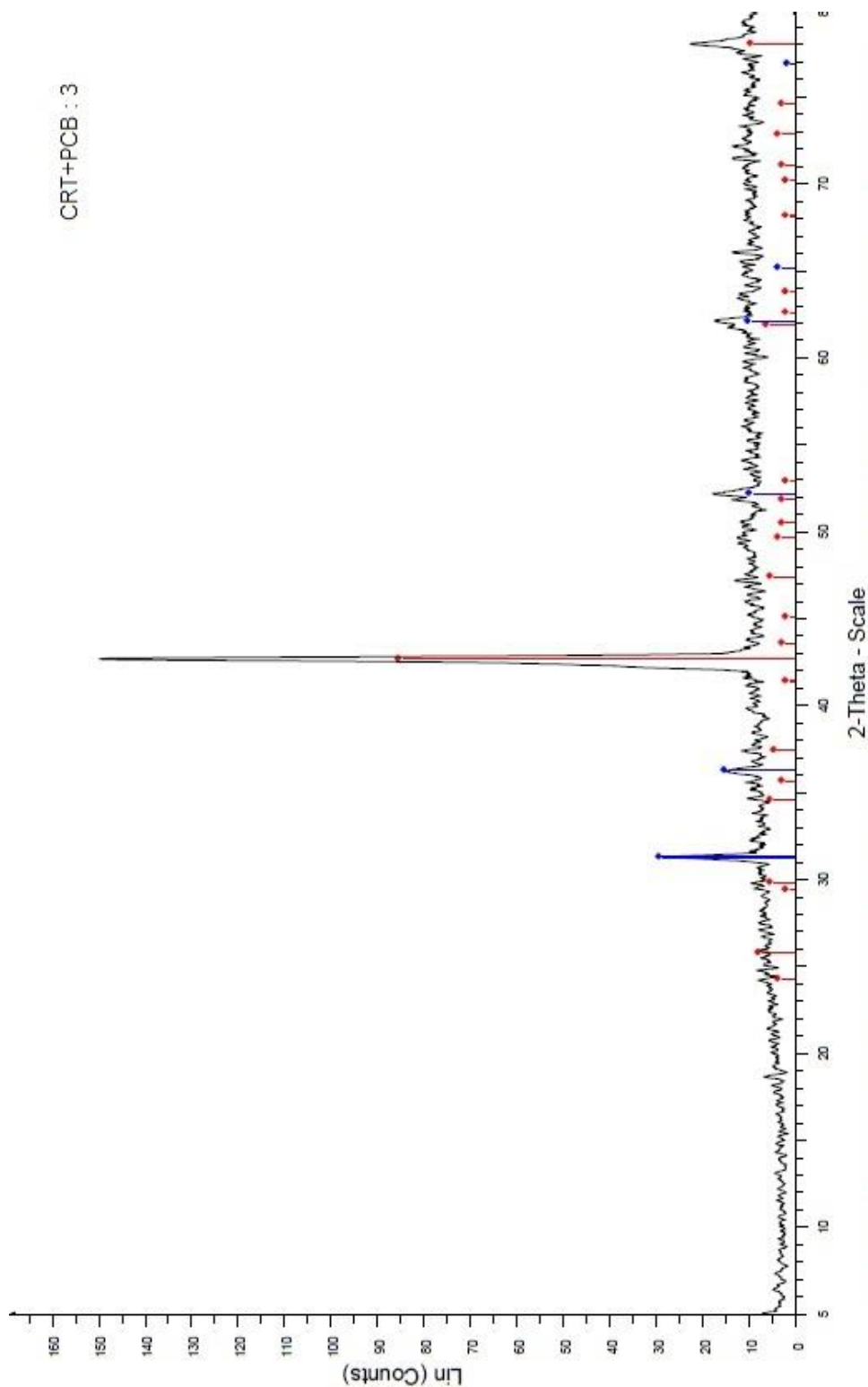


ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งนำมาแปลผลหาค่าระดัและแรงแงวงจรีเล็กทพรอซิมิกส์

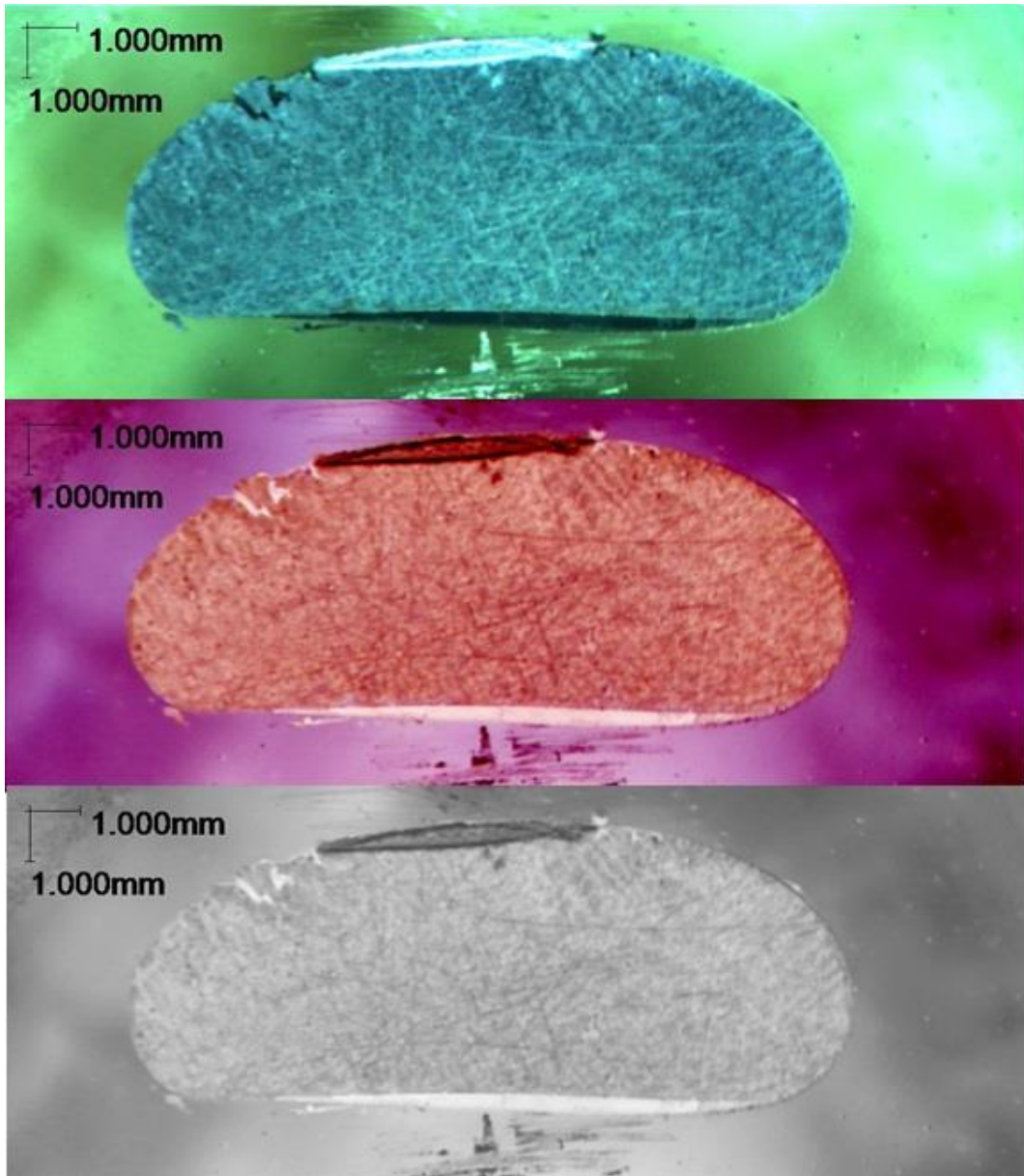
CRT+PCB : 2



CRT+PCB : 3

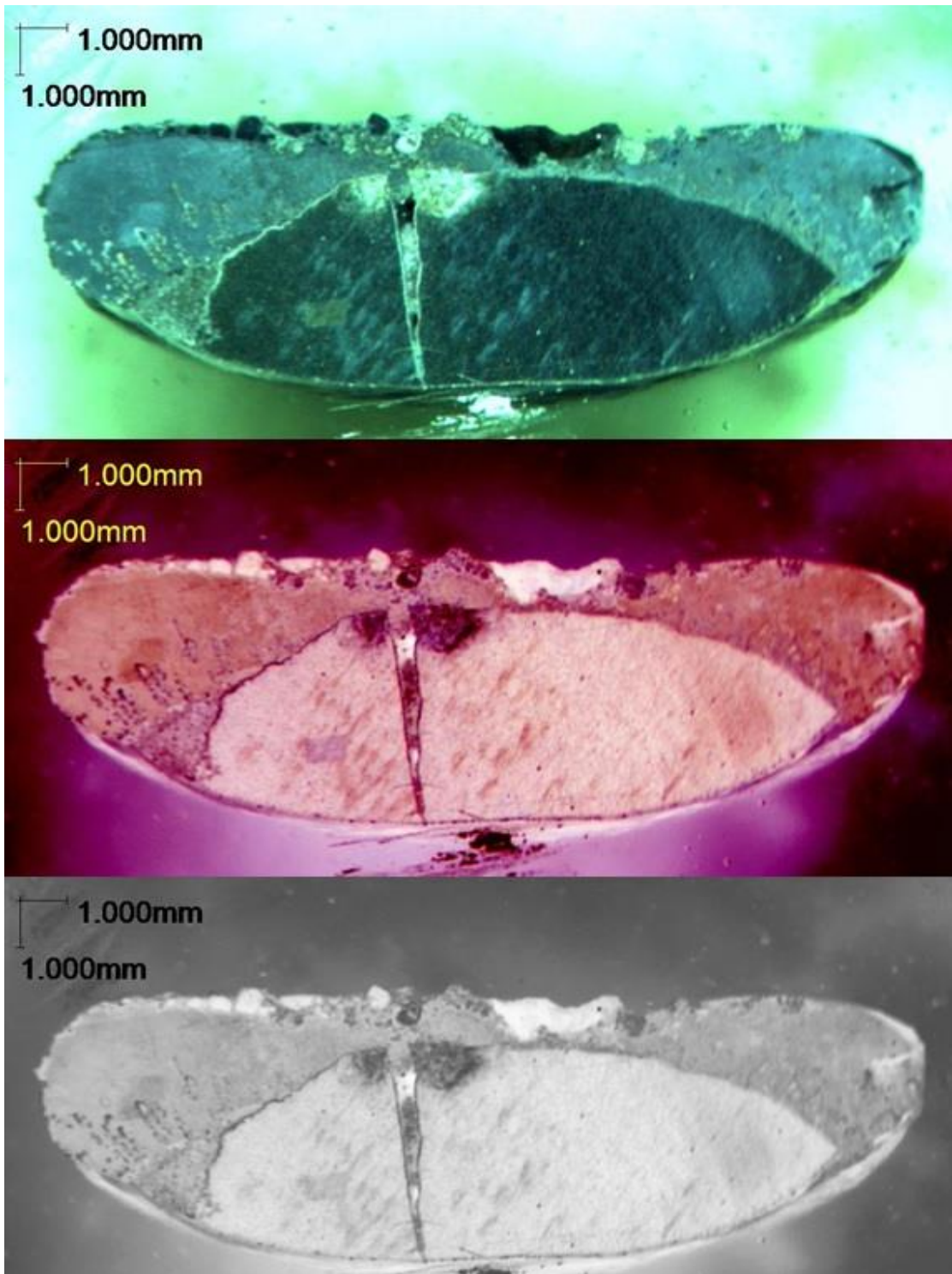


ภาพถ่ายชิ้นงาน ด้วย Optical Microscope (เพิ่มเติม)



ชิ้นงานโลหะตะกั่ว

ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 20 เท่า
ในลักษณะภาพต่างๆ เพื่อแยกเฟสที่เกิดขึ้นให้ชัดเจน



ชิ้นงานโลหะตะกั่ว

ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 18 เท่า
 ในลักษณะภาพต่างๆ เพื่อแยกเฟสที่เกิดขึ้นให้ชัดเจน

รายละเอียดเครื่องมือ (เพิ่มเติม)

หม้อบด (Laboratory Disc Mills)

Laboratory Disc Mills

KAWASAKI-SIEB TECHNIK

Type T-100 Order no. N-1364

Capacity : 100 cc.

Date December 1986

Frequency : 1,000 rpm

Amplitude : 11-13 mm.

Vibration motor : 0.75 kW

Kawasaki Kobe, JAPAN

Heavy Industries. LTD



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรไพฑูรย์ เหล่าสมบัติทวี เกิดเมื่อวันเสาร์ที่ 11 มิถุนายน พ.ศ.2531 ปัจจุบันอาศัยอยู่ บ้านเลขที่ 44/10 ถนนโนนไฮ-เมืองเก่า ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ

การศึกษา ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนมารีย์อุปถัมภ์ ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสตรีชัยภูมิและได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550

ปัจจุบันได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

