การกระจายตัวของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิจากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์

นายอภิสิทธิ์ น้ำประสานไทย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3871-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DISTRIBUTION OF PRECIOUS METALS IN SECONDARY SLAG FROM GOLD REFINING

Mr.Apisit Numprasanthai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mining Engineering
Department of Mining and Petroleum Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2003
ISBN 974-17-3817-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกระจายตัวของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิจากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์

โดย นายอภิสิทธิ์ น้ำประสานไทย

สาขาวิชา วิศวกรรมเหมืองแร่

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

………………………………………….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล ภู่วิจิตร)

…………………………………………... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์)

……………………………………………กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรธนะเดช)

……………………………………………กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุนทร พุ่มจันทร์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อภิสิทธิ์ น้ำประสานไทย : การกระจายตัวของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิจากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์. (DISTRIBUTION OF PRECIOUS METALS IN SECONDARY SLAG FROM GOLD REFINING) อ.ที่ปรึกษา:รศ.ดร.ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์, 82 หน้า. ISBN 974-17-3871-4

กระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์โดยใช้ก๊าซคลอรีนเป็นตัวแยกสกัดเป็นกรรมวิธีที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวจะก่อให้เกิดตะกรันออกมา ที่เรียกว่า ตะกรันปฐมภูมิ (Primary Slag) ซึ่งจะมีปริมาณโลหะมีค่า ทองคำ หลงเหลืออยู่ 5-10% ซึ่งสามารถนำไปแยกสกัดโดยการเผาถลุงอีกครั้ง โดยการเผาถลุงดังกล่าวจะก่อให้เกิดตะกรันออกมาอีกครั้ง เรียกว่า ตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) ซึ่งจะมีโลหะมีค่าทองคำหลงเหลืออยู่อีก 1-2%

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายตัว ลักษณะและองค์ประกอบของโลหะมีค่าทองคำ เงิน และสารประกอบอื่นในตะกรันทุติยภูมิ ที่ได้จากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ โดยดำเนินการศึกษาวิจัยปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าด้วยเครื่องเอกซ์ เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของโลหะมีค่าโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องเอกซ์ เรย์ ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (XRD) และเครื่องเอนเนอร์ยีดิสเพอร์สิฟ เอกซ์ เรย์ (EDX) โดยผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยดังกล่าว สามารถนำมาวิเคราะห์และสรุปผลโดยเสนอแนะกระบวนการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าได้ โดยใช้โต๊ะสั่น (Shaking Table) ซึ่งสามารถเก็บกลับคืนโลหะมีค่า ทองคำได้ 94.18% และเก็บกลับคืนโลหะเงินได้ 94.89%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม	ลายมือชื่อนิสิต...
สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา......................................
ปีการศึกษา 2003	

4470644121: MAJOR MINING ENGINEERING

KEY WORD: SECONDARY SLAG / GOLD REFINING / GOLD RECOVERY / XRF / XRD

APISIT NUMPRASANTHAI : DISTRIBUTION OF PRECIOUS METALS IN SECONDARY SLAG FROM GOLD REFINING. THESIS ADVISOR ASSOC.PROF.QUANCHAI LEEPOWPANTH,Ph.D, 82 pp. ISBN 974-17-3871-4

A procedure of gold refining via a chloride re-leach method is crucial and widely utilized. Fundamentally, a waste product, so-called primary slag, from the method still approximately contains 5-10 percents of gold. Nevertheless, after smelting method, Secondary Slag is left with the remaining gold around 1-2 percents.

In this research, physical and chemical characteristics, distribution of precious metals in secondary slag from gold refining process are examined. The study aims to develop recovery of precious metals, specifically gold and silver, in more efficient and effective way. X-Ray Fluorescent (XRF) is used in order to study distribution of precious metals. In addition, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffractometer (XRD) and Energy Dispersive X-Ray (EDX) are also used in order to analyze a microstructure and composition of the metals. According to the results of analysis the precious metals recovery process through using shaking table is proposed. The shaking table process can recover 94.18 percents of gold and 94.89 percents of silver from the secondary slag.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Mining and Petroleum Engineering	Student's signature……………………………
Field of study Mining Engineering	Advisor's signature…………………………..
Academic year 2003	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ผู้ทำการวิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำปรึกษาในการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภู่วิจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรธนะเดช อาจารย์ ดร.สุนทร พุ่มจันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์อุทิศ ทองกลึง ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ และขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ทุกท่านที่ให้ แนวคิด และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ตามเป้าหมายที่กำหนด

ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณ บริษัท GrestestGold & Refinery จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านตัวอย่างตะกรันทุติยภูมิ และขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยีสำหรับการวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการวิเคราะห์ตัวอย่างงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านห้องปฏิบัติการโลหวิทยา

ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่สาว ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านเป็นอย่างดีมาโดยตลอด โดยเฉพาะด้านการศึกษาจนสามารถสำเร็จได้สมดังเจตนารมณ์ และท้ายที่สุดนี้ผู้ทำการวิจัยขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ และพร้อมให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย...ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...จ
กิตติกรรมประกาศ...ฉ
สารบัญ...ช
สารบัญตาราง...ฌ
สารบัญรูป..ญ
บทที่
1 บทนำ...1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย...1
1.2 วัตถุประสงค์...2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย..2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ...3
2. ปริทรรศน์วรรณกรรม..4
2.1 คุณสมบัติทั่วไปของธาตุทองคำ เงิน ทองแดง...6
2.2 พฤติกรรมของโลหะทองคำผสม..6
2.3 การเกิดผลึกของโลหะผสมในสภาวะไม่สมดุล..14
2.4 ความเป็นมาของกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์...16
2.5 กระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์...18
2.5.1 กระบวนการแยกสกัดทองคำโดยใช้ก๊าซคลอรีน...19
2.5.2 กระบวนการแยกสกัดทองคำโดยใช้ไฟฟ้า..20
2.5.3 กระบวนการแยกสกัดทองคำโดยใช้วิธีทางเคมี..22
2.6 กระบวนการเกิดของตะกรันทุติยภูมิ...26
3. ระเบียบวิธีการวิจัย...28
3.1 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย...28
3.2 วิธีการดำเนินการทดลองและขั้นตอนการทดลองโดยละเอียด...................................28
3.2.1 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่า..29

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.2 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะ รูปร่าง ขนาด โครงสร้างจุลภาค........................29
3.2.3 ขั้นตอนการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทุติยภูมิ........................30
3.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ประเมินผลเสนอแนะแนวทางการเก็บกลับคืน........................30
4. รายงานผลการทดลอง........................30
4.1 การศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าและธาตุอื่นในตะกรันทุติยภูมิ........................31
4.2 การศึกษาสารประกอบในตะกรันทุติยภูมิโดยใช้ XRD........................33
4.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตะกรันทุติยภูมิ........................34
4.3.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์........................34
4.3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ SEM........................37
4.3.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ EDX........................39
4.3.7 การศึกษาการกระจายตัวโดยใช้เทคนิค X-Ray Image Mapping........................45
4.4 ศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆ........................46
4.5 ศึกษาโลหะมีค่าที่แยกตัวเป็นอิสระจากมลทินที่ขนาดอนุภาคต่างๆ........................48
4.6 ศึกษาอัตราการละลายตัวในน้ำของตะกรันทุติยภูมิ........................51
4.7 แนวทางและวิธีการที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าจากตะกรันทุติยภูมิ........................54
4.7.1 การศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะมีค่าขั้นต้นโดยใช้โต๊ะสั่น........................55
4.8 สรุปกระบวนการขั้นต้นในการเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ........................57
4.8.1 แสดงแผนผังกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ........................58
5. สรุปผลการวิจัย........................59
6. วิจารณ์การทดลองและข้อเสนอแนะ........................61
6.1 วิจารณ์การทดลอง........................61
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย........................62
รายการอ้างอิง........................63
ภาคผนวก........................64
ภาคผนวก ก.เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย........................65
ภาคผนวก ข.ผลวิเคราะห์โลหะมีค่า........................79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์........................82

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 สมบัติต่างๆของธาตุทองคำ เงิน ทองแดง..……...................6
4.1 แสดงผลการตรวจสอบปริมาณธาตุในตะกรันทุติยภูมิ...32
4.2 แสดงปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆ..............…...................47
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการละลายของตะกรันทุติยภูมิ.....…...........53
4.4 แสดงความสามารถในการละลายของ Borax และ NaCl ในน้ำ..................................…...53
4.4 แสดงมวลสมดุลของโลหะทองคำจากการเก็บกลับคืนโดยใช้โต๊ะสั่น...........……............55
4.5 แสดงมวลสมดุลของโลหะเงินจากการเก็บกลับคืนโดยใช้โต๊ะสั่น....................................56

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 แสดงแผนภูมิเฟส 2 ธาตุ ของระบบทอง-เงิน...8

2.2 แผนภูมิสมดุล 2 ธาตุ ในระบบทอง-ทองแดง...9

2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมทองและทองแดงในโครงสร้างผลึก...10

2.4 แผนภูมิสมดุล 2 ธาตุ ในระบบ เงิน-ทองแดง...11

2.5 แผนภูมิสมดุล 3 ธาตุในระบบ ทอง-เงิน-ทองแดง ในรูป 3 มิติ...12

2.6 แสดงแผนภูมิสมดุลเฟสของระบบ Au-Cu-Ag ที่ส่วนผสม 18 14 และ 10 กะรัต...13

2.7 แสดงการแข็งตัวใต้สภาวะไม่สมดุล...14

2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้นที่ภายใต้การแข็งตัวที่สภาวะไม่สมดุล...14

2.9 ผลของเวลาในกระบวนการ Miller Chlorination ในการแยกสกัดโลหะ...19

2.10 กระบวนการแยกสกัดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า...21

2.11 ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการแยกสกัดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า...22

2.12 แสดง Reduction Potential และ pH Diagram ของระบบ $Au - H_2O - Cl^-$...23

2.13 กระบวนการแยกสกัดโดยใช้กรดไนตริก...25

4.1 แสดงผลวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของตะกรันทุติยภูมิ...33

4.2 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า...35

4.3 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า...36

4.4 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า...36

4.5 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่า...36

4.6 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 40 เท่า (SEM)...38

4.7 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่า (SEM)...38

4.8 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า (SEM)...38

4.9 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 4000 เท่า (SEM)...39

4.10 แสดงบริเวณที่ตรวจสอบด้วย EDX...40

4.11 แสดงปริมาณธาตุที่พบในบริเวณที่ตรวจสอบ (EDX)...40

4.12 แสดงบริเวณที่ตรวจสอบด้วย EDX...41

4.13 แสดงปริมาณธาตุที่พบในบริเวณที่ตรวจสอบ (EDX)...41

4.14 แสดงบริเวณที่ตรวจสอบด้วย EDX...42

4.15 แสดงปริมาณธาตุที่พบในบริเวณที่ตรวจสอบ (EDX)...42

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.16 แสดงพื้นที่เฟสที่มี ทองแดง เงิน และเหล็กมาก..43
4.17 แสดงภาพรวมของกระจายตัวของทองคำ เงิน เหล็ก และ ทองแดง........................45
4.18 แสดงการกระจายตัวของทองคำ..45
4.19 แสดงการกระจายตัวของเงิน..45
4.20 แสดงการกระจายตัวของทองแดง..45
4.21 แสดงการกระจายตัวของเหล็ก...45
4.22 แสดงการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆ.................................47
4.23 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -400# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า........................49
4.24 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -325#+400# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า...................49
4.25 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -270#+325# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า...................49
4.26 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -200#+270# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า...................50
4.27 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -100#+200# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า...................50
4.28 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -70#+100# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า....................50
4.29 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -20#+70# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า.....................51
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการละลายของตะกรันทุติยภูมิ........................52

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ทองคำเป็นโลหะมีค่าที่มนุษย์รู้จัก และนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายพันปีแล้ว โดยทองคำเป็นโลหะมีค่าที่มีคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญ 4 ประการ ที่ช่วยให้ทองคำโดดเด่นและเป็นที่ต้องการเป็นอย่างมากในการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ คุณสมบัติดังกล่าวได้แก่

1. ความงดงามเป็นมันวาว
2. ความหายาก
3. ความคงทน
4. การนำไปใช้ประโยชน์

การมีสีสันสวยงามสะดุดตากว่าโลหะชนิดอื่นๆถือเป็นคุณสมบัติประการแรกของทองคำที่ทำให้ทองคำเป็นโลหะที่โดดเด่นกว่าโลหะอื่นๆ ส่วนคุณสมบัติในข้อที่ 2 คือ ความหายาก แม้ว่าจะพบเห็นทองคำได้ทั่วไป แต่กว่าที่จะได้ทองคำมา 1 ออนซ์นั้น จะต้องถลุงก้อนแร่ที่มีทองคำอยู่เป็นจำนวนหลายตัน ดังนั้นด้วยค่าใช้จ่ายที่สูงประกอบกับความยากในการได้มา จึงส่งผลให้ทองคำกลายเป็นโลหะมีค่าและเป็นที่ต้องการโดยทั่วไป คุณสมบัติในข้อที่ 3 คือ ความคงทน ซึ่งทองคำเป็นโลหะมีค่าที่มีความคงทน มีเสถียรภาพสูง ไม่ขึ้นสนิม ไม่หมองและไม่ผุกร่อน ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้ทองคำถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้านโดยเฉพาะเกี่ยวกับด้านเครื่องประดับ ทองคำมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายและสีสันสวยงาม จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้ทำเป็นเครื่องประดับและนอกจากนี้ที่สำคัญ ทองคำยังถูกใช้เป็นกองทุนสำรองระหว่างประเทศ

จากคุณสมบัติพื้นฐานทั้ง 4 ประการ ทำให้ทองคำเป็นโลหะที่มีความต้องการอย่างมากในอดีตจนถึงปัจุบัน และมีความต้องการมากขึ้นเรื่อยๆในอนาคตข้างหน้า ในขณะที่ทองคำเป็นทรัพยากรที่หายากและมีค่ามาก

ดังนั้น การนำทองคำที่มีอยู่กลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมอย่างยิ่งในสภาวะปัจจุบัน โดยกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ (Gold Refining Process) ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถแยกสกัดทองคำเก่าเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

กระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ (Gold Refining Process) โดยทั่วไปนิยมใช้เทคนิคการแยกสกัดด้วยก๊าซคลอรีน (Miller Chlorination Process) ซึ่งกระบวนการแยกสกัดดังกล่าว จะให้ตะกรันออกมาเรียกว่า ตะกรันปฐมภูมิ (Primary Slag) ซึ่งจะมีโลหะมีค่าทองคำหลงเหลืออยู่ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักและเมื่อนำไปเผาถลุงอีกครั้งเพื่อแยกโลหะมีค่าออกมาจะให้

ตะกรันออกมาอีกครั้งเรียกว่า ตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) ซึ่งยังมีโลหะมีค่าทองคำและเงินหลงเหลืออยู่อีก โดยทองคำหลงเหลืออยู่อีกประมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์ เงินหลงเหลืออยู่อีกประมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์ หากสามารถพัฒนาขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกสกัดหรือการเก็บกลับคืนโลหะมีค่าที่หลงเหลือในตะกรันทุติยภูมิดังกล่าวให้ได้มากที่สุด ก็จะเป็นการบริโภคหรือใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่ามากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการกระจายตัวของโลหะมีค่า ทองคำและเงิน ในตะกรันทุติยภูมิ
2. เพื่อศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของโลหะมีค่า ทองคำ เงินและสารประกอบอื่นในตะกรันทุติยภูมิ
3. เพื่อศึกษาและเสนอแนะแนวทางการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่า ทองคำและเงิน ในตะกรันทุติยภูมิ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ชักตัวอย่างตะกรันทุติยภูมิที่ได้จากกระบวนการ Miller Chlorination จากกระบวนการในภาคอุตสาหกรรม (บริษัท Greatest Gold & Refinery จำกัด)
2. วิเคราะห์โลหะมีค่าประเภท ทองคำและเงิน ในตะกรันทุติยภูมิ
3. ศึกษาวิเคราะห์ปริมาณการกระจายตัวโดยใช้เครื่อง X – Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
4. ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เครื่อง Energy Dispersive X-Ray (EDX) และเครื่อง X – Ray Diffractometer (XRD)
5. เสนอแนะแนวทางที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนโลหะมีค่า ทองคำและเงิน โดยพิจารณาจากการกระจายตัวและองค์ประกอบต่างๆที่ได้จากการศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงลักษณะการกระจายตัวของโลหะมีค่า ทองคำและเงิน ในตะกรันที่ทุติยภูมิ เพื่อเสนอแนะขั้นตอนและวิธีที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. เข้าใจถึงลักษณะ โครงสร้างและองค์ประกอบของโลหะมีค่า ทองคำ เงินและสารประกอบอื่นในตะกรันทุติยภูมิ เพื่อเสนอแนะขั้นตอนและวิธีที่เหมาะสม ในการเก็บกลับคืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. เพื่อให้ทราบถึงขั้นตอนและวิธีที่เหมาะสมซึ่งเป็นแนวทางที่จะสามารถพัฒนาวิธีการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่า ทองคำและเงิน ในตะกรันทุติยภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

ทองคำ (Gold) เป็นโลหะมีค่าที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์หลายพันปีแล้ว ทองคำเป็นโลหะที่มีเสถียรภาพสูง มีสีสันสวยงามสะดุดตากว่าโลหะชนิดอื่นๆ มีความแข็งต่ำแต่มีความหนืดสูง สามารถนำมาใช้ขึ้นรูปได้ง่าย เป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าที่ดี จึงมีการนำทองคำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน โดยเฉพาะเกี่ยวกับด้านเครื่องประดับ และทางด้านโลหวิทยา ใช้โลหะชนิดอื่นมาผสมทำเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และโลหะเจือต่างๆ ทางด้านเศรษฐกิจการคลัง ทองคำยังถูกใช้เป็นเป็นกองทุนสำรองระหว่างประเทศ ทองคำเป็นหลักทรัพย์ทางเศรษฐกิจที่สำคัญในฐานะทุนสำรองระหว่างประเทศมีความเกี่ยวข้องกับฐานะและเสถียรภาพทางการเงินของทุกประเทศ โดยยังถูกนำมาใช้ในการชำระหนี้ระหว่างประเทศได้ด้วย โดยเฉพาะทองคำแท่งบริสุทธิ์ถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนุนหลังในการพิมพ์ธนบัตรของประเทศ อย่างการพิมพ์ธนบัตรของประเทศไทยได้วางกฎเกณฑ์เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือในสกุลเงินบาทของประเทศไทย คือ พระราชบัญญัติเงินตรา พ.ศ. 2501 กำหนดให้มีสิ่งมีค่าหนุนหลังการพิมพ์ธนบัตรที่เรียกว่า ทุนสำรองเงินตรา ซึ่งระบุว่าต้องมีสิ่งมีค่าหนุนหลังธนบัตรที่พิมพ์ออกมาเต็มที่ 100% เต็ม กล่าวคือ ทุกบาทของธนบัตรที่พิมพ์ออกมาจะต้องมีสิ่งมีค่าหนุนหลังอยู่ 1 บาทเต็มๆ เช่นกัน ยกเว้นเงินเหรียญไม่ต้องหนุนหลังเพราะมูลค่าโลหะของเหรียญเป็นสิ่งมีค่าหนุนหลังตัวมันเองอยู่แล้ว รวมทั้งความต้องการทองคำในเชิงพาณิชย์หรือในลักษณะเป็นสินค้านั้น ส่วนใหญ่หรือประมาณร้อยละ 60 ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องประดับ ในขณะเดียวกันทองคำก็ได้เข้าไปมีอิทธิพลในแวดวงการลงทุนและการเก็งกำไร เนื่องจากทองคำเป็นสินค้าที่มีค่าประเภท หนึ่งซึ่งนักลงทุนและนักเก็งกำไรทั่วไปนิยมซื้อเก็บไว้เป็นสมบัติ เพื่อสะสมทรัพย์และนำออกขายเอากำไรในภายหลังเมื่อราคาทองคำเพิ่มสูงขึ้น

ทองคำมีบทบาทต่อระบบการเงินโลกมาตั้งแต่สมัยก่อนสงครามโลกครั้งแรกจวบจนปลายสงครามโลกครั้งที่ 2 ในปี พ.ศ.2487 ที่ประชุมของประเทศมหาอำนาจ ณ Bretton Woods ในสหรัฐอเมริกา ได้รับรองทองคำให้มีบทบาทสำคัญในระบบการเงินโลก โดยราคาทองคำช่วงนั้นถูกกำหนดให้มีราคาทางการคงที่เปรียบเทียบกับเงินดอลล่าร์สหรัฐ ณ ระดับ 35 ดอลล่าร์สหรัฐ ต่อออนซ์ และได้ให้ธนาคารกลางสหรัฐฯ รับแลกทองคำกับเงินดอลล่าร์สหรัฐ อย่างไม่จำกัดด้วย อย่างไรก็ตามราคาทองคำในตลาดโลกก็ยังสามารถเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้แม้จะมีราคาทองคำทางการกำหนดไว้คงที่ก็ตาม จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2504 ราคาทองคำได้สูงขึ้นอย่างมากทำให้สหรัฐและประเทศอุตสาหกรรมอื่นๆ ทำการจัดตั้ง GOLD POOL ขึ้นโดยรวบรวมทองคำจากประเทศสมาชิกในจำนวนหนึ่งแล้วนำออกขายในตลาดเพื่อหยุดยั้งการเพิ่มขึ้นของราคาทองคำไม่ให้เกินระดับทางการที่ 35 ดอลล่าร์สหรัฐ ต่อ ออนซ์ ซึ่งความพยายามในครั้งนี้ประสบความล้มเหลว ดังนั้นในปี

ดังนั้นในปีพ.ศ. 2511 จึงได้มีการตั้งระบบ TWO-TIER ขึ้น โดยยอมรับว่ามีราคาทองคำ 2 อัตรา คือ ราคาทางการและราคาตลาด แต่ราคาตลาดนั้นให้เป็นไปตามอุปทานและอุปสงค์ของตลาดซึ่งมีราคาสูงกว่าราคาทางการ และในปี พ.ศ. 2514 สหรัฐได้ประกาศยกเลิกการยอมรับการแลกทองคำในราคาทางการกับดอลล่าร์สหรัฐ ซึ่งชี้ให้เห็นการที่พยายามลดบทบาทของทองคำต่อระบบการเงินโลก เพราะทองคำนั้นได้สร้างปัญหาให้กับระบบการเงินระหว่างประเทศ ส่งผลให้ราคาทองคำทางการที่ถูกกำหนดตายตัวเมื่อเทียบกับดอลล่าร์สหรัฐถูกยกเลิกไปด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าทองคำได้สิ้นสุดบทบาททางการในระบบการเงินของโลก แต่กระนั้นก็ตามในทางปฏิบัติทองก็ยังมีบทบาทควบคู่ไปกับตลาดการเงินของโลกอยู่ดีจนถึงปัจจุบัน

จากที่ผ่านมาในปี 2002 ตลาดทองคำมีการผันผวนทั้งในทางด้านบวกและด้านลบ ในด้านบวก ตลาดทองคำมีความมั่นคงและทองคำมีราคาเพิ่มมากขึ้น โดยราคาทองคำมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีการเพิ่มขึ้นจากระดับปกติตั้งแต่ในปี 1997 จนในถึงในระดับปัจจุบัน และนักเศรษฐศาสตร์หลายคนก็เชื่อว่าจะสามารถรักษาระดับนี้ไปได้อีกเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ซึ่งจะเป็นการช่วยพยุงอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำที่ประสบปัญหามาตลอดในช่วงระยะเวลาหลายๆปีที่ผ่านมา

เงิน (SILVER) มนุษย์เริ่มรู้จักเงินหลังทองแดงและทองคำ พบเห็นจากซากตะกรันในบริเวณแถบเอเชียไมเนอร์และในบริเวณหมู่เกาะในทะเลอีเจียนเป็นหลักฐานว่ามนุษย์ได้ถลุงแร่ตะกั่วที่มีเงินปนอยู่มากว่า 4,000 ปีแล้ว โดยเฉพาะเครื่องประดับเงินของชาวอียิปต์เป็นหลักฐานที่สำคัญที่แสดงว่ามนุษย์รู้จักใช้เงินเป็นเครื่องประดับมานานแล้ว สมัยจักรวรรดิโรมันใช้เงินเป็นหลักในระบบเงินตราจนต่อมากลายเป็นคำที่ใช้เรียกวัตถุสมมุติทั่วไปที่ใช้แลกเปลี่ยนสิ่งของหรือสินค้า เช่น ธนบัตรหรือเหรียญสตางค์ว่า “เงิน”

สินแร่เงินเท่าที่พบมีประมาณกว่า 50 ชนิด แต่ที่มีความสำคัญทางโลหวิทยามีอยู่น้อยชนิด เช่น เงินธรรมชาติซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงเกิดเป็นเกล็ดเล็กๆ เงินเป็นโลหะที่มีค่ารองจากทองคำ โลหะเงินเป็นโลหะในกลุ่มโลหะมีสกุล (Noble Metal) มีสีขาววาว เงินเป็นสื่อไฟฟ้าได้ดีกว่าโลหะทั้งหมด สามารถใช้เป็นมาตรฐานในการวัดค่าความนำไฟฟ้า สะท้อนแสงได้ดี ไม่เกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง และต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดอินทรีย์ได้ดี โดยเฉพาะ กรดอะซิติก ได้ดีจึงอาศัยประโยชน์ทำเป็นเครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมกรดดังกล่าว รวมทั้งทนต่อการกัดกร่อนของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อถูกควันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำให้ผิวเงินคล้ำและดำได้

โลหะเงินเกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ ของผลผลิตโลกถูกนำไปใช้ผลิตสินค้าต่างๆมากมายหลายประเภท เช่น ฟิล์มภาพยนตร์ อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กรอนิกส์ ภาชนะเครื่องใช้ เหรียญกษาปณ์ เหรียญตรา เครื่องประดับ อุปกรณ์ทางการแพทย์และทันตกรรม รถยนต์ ตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ แบตเตอรี่ เคมีภัณฑ์ เป็นต้น

2.1 คุณสมบัติทั่วไปของธาตุทองคำ เงิน ทองแดง

คุณสมบัติทั่วไปของธาตุทองคำ ทองแดง เงิน ซึ่งเป็นธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักของโลหะผสมระบบ ทอง-ทองแดง-เงิน แสดงดังในตารางที่ 2.1

ทอง(GOLD) มาจากภาษากรีกว่า Aurum ใช้สัญญาลักษณ์ในตารางธาตุ Au

ทองแดง(COPPER) มาจากภาษากรีกว่า Cuprous ใช้สัญญาลักษณ์ในตารางธาตุ Cu

เงิน(SILVER) มาจากภาษากรีกว่า Argentineใช้สัญญาลักษณ์ในตารางธาตุ Ag

	ทอง(Au)	ทองแดง(Cu)	เงิน(Ag)
เลขอะตอม	79	29	47
น้ำหนักอะตอม	196.8665	63.546	107.8682
โครงสร้างผลึก	FCC	FCC	FCC
สี	เหลือง	แดง	ขาว
ความถ่วงจำเพาะ	19.32	8.96	10.5
ความหนาแน่นที่20°C (Kg/m^2)	19,320	8,960	10,500
จุดหลอมเหลว($^{\circ}$C)	1,064	1,083	960
จุดเดือด($^{\circ}$C)	2,920	2,600	2,195

ตารางที่2.1 สมบัติต่างๆของธาตุทอง ทองแดง เงิน

2.2 พฤติกรรมของโลหะทองคำผสม

ที่สถานะของแข็ง ทองคำ เงินและทองแดง จะมีโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมในผลึกแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมอยู่ตรงการทุกด้านของลูกบาศก์และทุกมุมของลูกบาศก์ (Face Centered Cubic: FCC) โดยจะมีการเชื่อมต่อของแต่ละโครงสร้างผลึกในทั้งสามทิศทาง ซึ่งจะมีการใช้อะตอมร่วมกันที่มุมและกึ่งกลางของลูกบาศก์ที่อยู่ติดกัน เซลหนึ่งหน่วย (Unit Cell) ของโลหะกลุ่มนี้จะมีจำนวนอะตอมคือ 4 อะตอม

แม้ว่าโลหะทั้งสามชนิดมีระบบโครงสร้างผลึกที่เหมือนกันคือ Face Centered Cubic: FCC แต่ก็จะมีความแตกต่างที่สำคัญที่สามารถทำให้แบ่งแยกออกจากกันได้

โครงสร้างอะตอม

ทอง มี 79 โปรตอน 118 นิวตรอน ภายในนิวเคลียสและ 79 อิเล็กตรอนอยู่ล้อมรอบ

เงิน มี 47 โปรตอน 60 หรือ 62 นิวตรอน ภายในนิวเคลียสและ 47 อิเล็กตรอนอยู่ล้อมรอบ

ทองแดงมี 29 โปรตอน 34หรือ36 นิวตรอนภายในนิวเคลียสและ29อิเล็กตรอนอยู่ล้อมรอบ

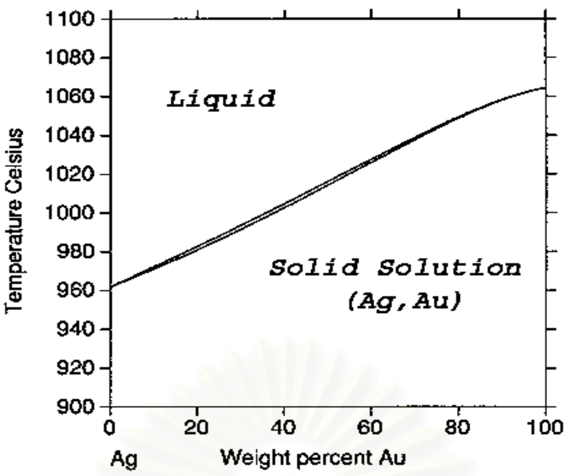
จากข้องมูลข้างต้นจะเห็นว่าอะตอมของเงินและทองแดงสามารถที่จะมีนิวตรอนได้ 2 ระดับ แต่โลหะทั้ง 2 ตัวนี้ จะมีความเสถียรที่จะไม่ปล่อยพลังงานออกมา (Non-radioactive Isotope) 2 ค่า ทองจะมีค่าของความเถียรเพียงค่าเดียว

ขนาดของอะตอมที่เป็นทรงกลม โดยเฉพาะจะมีค่าของรัศมีทรงกลมที่แตกต่างกันในแต่ละชนิดของโลหะ ซึ่งมีผลทำให้ขนาดของผลึกมีขนาดต่างๆกัน โดยความยาวด้านของโครงสร้างจะมีค่าเฉพาะของโลหะที่เรียกว่า Lattice Parameter

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมีและทางกลต่างๆ สามารถที่จะอธิบายได้จากโครงสร้างผลึกและ Lattice Parameter ตัวอย่างเช่น เงิน ซึ่งจะมีสีขาวและสามารถที่จะเข้าได้กับโลหะหลายๆชนิด รวมทั้งทองและทองแดง มีความเหนียวและสามรถขึ้นรูปได้ก็ผลเนื่องมาจากระบบโครงสร้างผลึกที่เป็น Face Centered Cubic

เมื่อมีการผสมกันของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปกลายเป็นโลหะผสมจะมีผลทำให้ประเภทหรือขนาดโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างเช่น เกิดการแทนที่ซึ่งกันและกันของอะตอมในโครงสร้างผลึกจากอะตอมของโลหะอีกชนิดหนึ่งที่ผสมอยู่ การแทนที่ของอะตอมดังกล่าวจะมีผลทำให้ขนาดโครงสร้างเดิมเปลี่ยนแปลงไปโดย Lattice Parameter อาจจะมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลง จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของขนาดอะตอมของแต่ละชนิด การผสมกันในลักษณะดังกล่าวจะเรียกว่าสารละลายของแข็งแบบแทนที่ (Substitutional Solid Solution) ที่จะเกิดระหว่างโลหะทองกับเงินและสารละลายที่เกิดจากการผสมของโลหะผสมระหว่างทองกับเงินนี้จะมีคุณสมบัติที่เรียกว่า สารละลายของแข็งแบบละลายได้ทุกส่วนผสมอย่างสมบูรณ์ (Complete Solid Solution) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นตลอดช่วงอุณหภูมิ จนถึงจุดหลอมเหลวของโลหะผสมทุกส่วนผสมปริมาณ ดังภาพที่ 2.1 และปรากฏการณ์นี้ยังเห็นได้ในโลหะผสมระหว่างทองกับทองแดง ซึ่งจะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 410 $^{\circ}$C

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

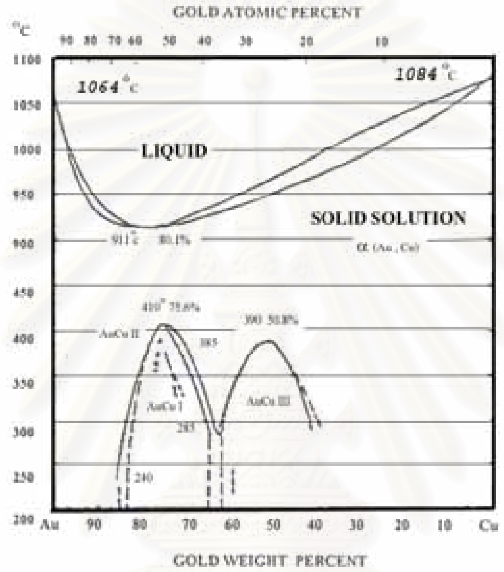


ภาพที่ 2.1 แสดงแผนภูมิเฟส 2 ธาตุ (Binary Phase Diagram) ของระบบทอง-เงิน (Au-Ag) [15]

พฤติกรรมต่างๆของโลหะผสมนี้สามารถที่จะอธิบายได้โดยดูจากแผนภูมิเฟส ที่สภาวะสมดุลรู้จักกันดีในทางโลหวิทยาว่า แผนภูมิสมดุลของเฟส หรือ Phase Equilibrium Diagram ในแผนภูมิดังกล่าว ค่าที่แสดงไว้ในแนวนอนคือค่าส่วนผสมของโลหะ ในหน่วยของปริมาณน้ำหนักหรืออะตอม ตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ และค่าแนวตั้งจะบอกระดับของอุณหภูมิ เส้นที่ลากขวางบนสุดระหว่างค่าส่วนผสมของโลหะ จะเรียกว่าเส้นหลอมเหลวสมบูรณ์ (Liquidus Line) โดยเส้นนี้จะบอกขอบเขตระหว่างการเกิดของแข็งกับการเกิดของเหลวสมบูรณ์ ส่วนผสมของโลหะที่มีอุณหภูมิเหนือเส้นนี้ จะมีสถานะเป็นของเหลวโดยสมบูรณ์และเส้นที่อยู่ถัดลงมาจะเรียกว่าเส้นของแข็งสมบูรณ์ (Solidus Line) โดยส่วนผสมของโลหะที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นดังกล่าวจะมีสถานะเป็นของแข็งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นถ้าส่วนผสมและระดับอุณหภูมิของโลหะผสมอยู่ระหว่างเส้นทั้ง 2 ก็จะมีสถานะเป็นของแข็งบางส่วนและของเหลวบางส่วน

จากแผนภูมิของเฟส บริเวณที่ต่ำกว่าเส้นของแข็งสมบูรณ์และมีเฟสเดียวตลอดช่วงส่วนผสมและอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องกันจะถูกระบุด้วยอักษรกรีกที่เรียกว่า อัลฟา (Alpha:α) และบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นของเหลวและของแข็งสมบูรณ์จะเกิดเป็น 2 เฟส ระหว่างของเหลว (L) และของของแข็ง (α) อยู่ปะปนกันสภาวะสมดุล

แผนภูมิสมดุลของเฟสในโลหะผสม 2 ชนิด (Binary Equilibrium Diagram) ของทองและทองแดง แสดงดังในภาพที่ 2.2 สารละลายของแข็งแบบสมบูรณ์ (α-phase) จะสามารถพบได้บริเวณอุณหภูมิที่สูงกว่า 410°C โดยที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 410°C นั้นจะเกิดการแปรสภาพของเฟสกลายเป็น AuCu ที่ส่วนผสมของโลหะ 50 เปอร์เซ็นต์ อะตอมทองแดง (Cu% at.) หรือที่ส่วนผสมทอง (Au) 75.6% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะมีส่วนผสมใกล้กับทอง 18K ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสม และเกิดการแปรสภาพของเฟสกลายเป็น $AuCu_3$ ที่ส่วนผสมของโลหะ 75 เปอร์เซ็นต์อะตอม ทองแดง (Cu% at.) ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 390°C

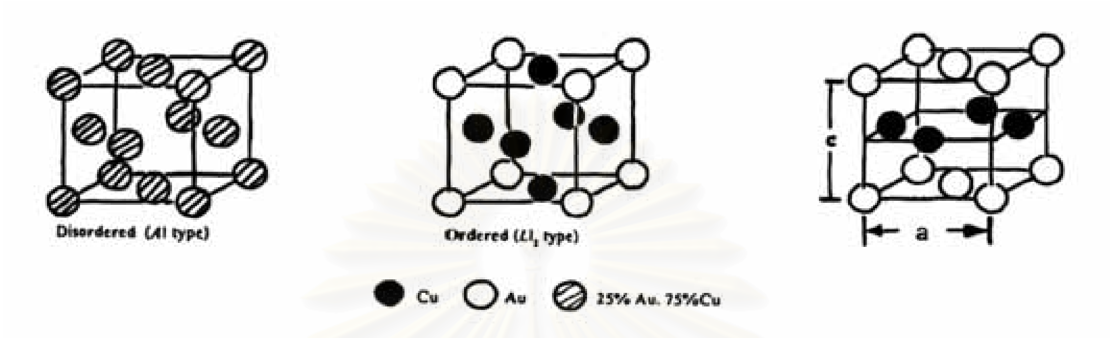


ภาพที่ 2.2 แผนภูมิสมดุล 2 ธาตุ ในระบบทอง-ทองแดง [15]

ของแข็งที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 410°C เหล่านี้เป็นสารละลายของแข็งที่มีการแยกตำแหน่งของอะตอมในแต่ละธาตุ ซึ่งเกิดสัมพันธ์ตามอัตราส่วนโดยอะตอมระหว่าง Au : Cu เป็น 1 : 1 และ 1 : 3 โดยมีการแสดงตำแหน่งของอะตอมแต่ละอะตอมดังภาพที่ 2.3 โดยรูปทางซ้ายลักษณะการละลายกันของอะตอมในสถานะของแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่า 410°C การเรียงตัวของอะตอมในแต่ละธาตุเป็นไปอย่างไม่มีระเบียบและตำแหน่งที่แน่นอน (ระนาบที่มีอะตอมทองแดง 4 อะตอมหรือระนาบกึ่งกลางของลูกบาศก์) ส่วนรูปกลางแสดงลักษณะ $AuCu_3$ โดยระนาบหนึ่งจะประกอบด้วยอะตอมทองแดงเท่านั้น ส่วนชั้นที่อยู่ติดกันจะประกอบด้วยอะตอมของทั้งทองและทองแดง เรียงสลับกันเป็นชั้นๆ ส่วนรูปทางขวาแสดงลักษณะของ AuCu ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างส่วนผสมทองกับทองแดงเป็น 1:1 จะมีการเรียงตัวของอะตอมทองและทองแดงแยกกันคนละระนาบ ซึ่งปรากฏการณ์อย่างนี้จะทำให้ค่าระยะห่างของของค่า Lattice Parameter (C) มีค่าน้อยลงจึงกลายเป็นโครงสร้างผลึกแบบ Face Centered Tetragonal (FCT) เราอาจเรียกเฟสที่เป็นสารละลาย

ของแข็งที่มีการจัดเรียงตำแหน่งของแต่ละอะตอมอย่างเป็นระเบียบนี้ว่า Ordered Solid Solution หรือ Super lattice

การแปรสภาพของเฟสของแข็งที่อุณหภูมิดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อคุณสมบัติความแข็งแรงของโลหะทองผสม



ภาพที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมทองและทองแดงในโครงสร้างผลึก [15]

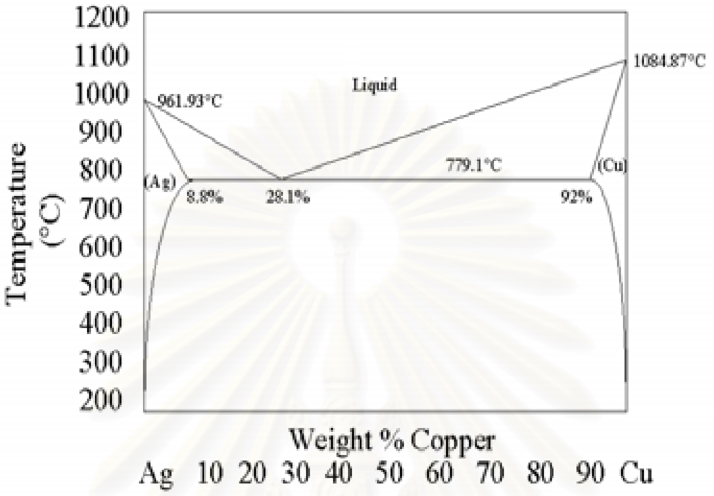
แผนภูมิสมดุลของเฟสในโลหะผสม 2 ชนิด อีกชนิดหนึ่งที่ต้องทราบ เพื่อเข้าใจระบบทอง-เงิน-ทองแดง ก็คือ การผสมกันระหว่างโลหะเงินกับโลหะทองแดง แสดงดังในภาพที่ 2.4 ในโลหะผสมของทั้งสองจะไม่สามารถเกิดการละลายในสภาวะของแข็งแบบสมบูรณ์ แม้ว่าโลหะทั้งสองจะมีระบบโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน (FCC) โดยที่โครงสร้างผลึกของเงินสามารถรองรับอะตอมของทองแดงได้ในปริมาณที่น้อยหรืออีกในหนึ่งก็คือ มีอะตอมเงินในปริมาณที่น้อยที่ถูกแทนที่ด้วยอะตอมของทองแดง และในขณะเดียวกัน

ความสามารถในการละลายก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 779°C ปริมาณของทองแดงที่สามารถละลายในเงินจะเพิ่มสูงขึ้น สูงสุดมีค่าเท่ากับทองแดง 8.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Cu% wt.) ในขณะเดียวกันปรากฏการณ์เดียวกันนี้ก็เกิดขึ้นกับการละลายเงินในทองแดงโดยจะเกิดขึ้นสูงสุดที่เงิน 7.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ag% wt.)

สารละลายของแข็งที่มีเงินละลายอยู่มาก (Ag-rich) และสารละลายของแข็งที่มีทองแดงละลายอยู่มาก (Cu-rich) สารละลายของแข็งทั้ง 2 ดังกล่าว จะถูกจัดว่าเป็นสารละลายของแข็งชนิดละลายได้บางส่วน (Partial Solid Solution) โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็นอัลฟา (α) และเบตา (β) ตามลำดับ

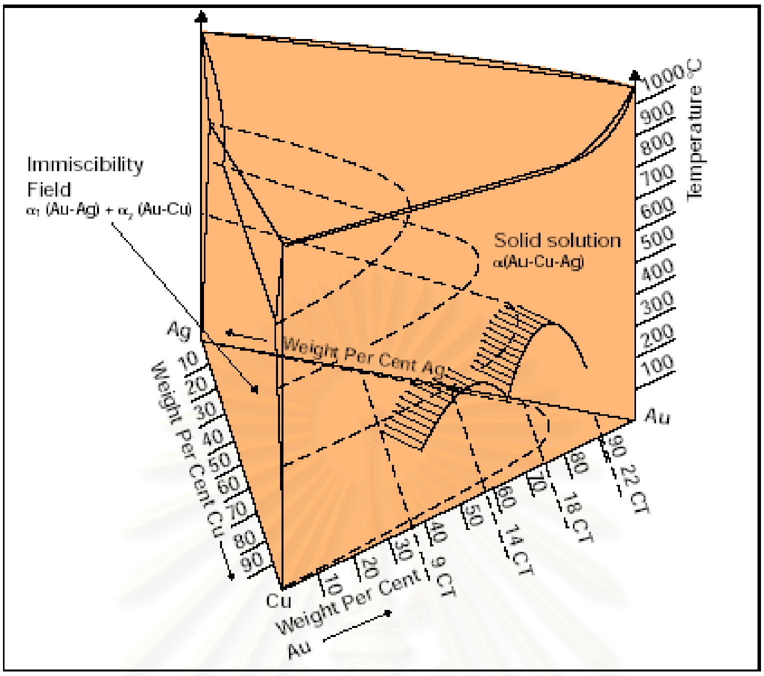
โลหะผสมที่มีส่วนผสมระหว่างของเขตการละลายของทองแดงในเงินและเงินในทองจะเกิดเป็นของแข็ง 2 เฟสด้วยกัน นั่นคืออัลฟา (α) และเบตา (β) อยู่ด้วยกันในบริเวณระหว่างเส้นของแข็งสมบูรณ์ (สารละลายของแข็งทั้ง 2 เฟส) นี้กับเส้นของเหลวสมบูรณ์จะมีส่วนประกอบของของเหลวอัลฟา (α) และของเหลวเบตา (β) และสิ่งที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งของแผนภูมิระหว่าง

ทองแดงและเงินก็คือ ณ จุดที่เกิดการบรรจบกันของเส้นของเหลวสมบูรณ์กับเส้นของแข็งสมบูรณ์ ที่ส่วนผสมทองแดง 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Cu% wt.) ณ อุณหภูมิ 780°C โลหะผสมที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า ยูเทคติก (Eutectic) ซึ่งในภาษากรีกจะหมายถึงสิ่งที่หลอมเหลวและแข็งตัวง่ายที่อุณหภูมิเดียว



ภาพที่ 2.4 แผนภูมิสมดุล 2 ธาตุ ในระบบ เงิน-ทองแดง [15]

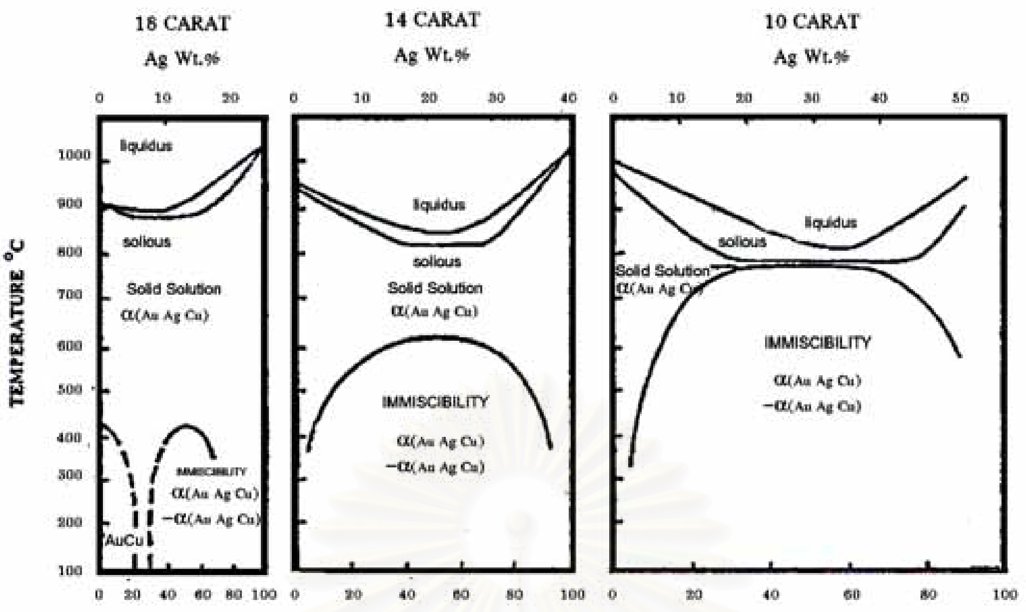
สภาวะของโลหะที่เกิดจากการผสมโลหะทอง เงินและทองแดง ทั้ง 3 ชนิดสามารถแสดงในแผนภูมิเฟส โดยแผนภูมิจะมีลักษณะปริซึม ฐานสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีแต่ละด้านเป็นแผนภูมิเฟสของโลหะผสม 2 ชนิด คือระหว่างทองกับเงิน ทองกับทองแดง และทองแดงกับเงิน หรือที่เรียกว่าแผนภูมิสมดุลเฟสระบบโลหะผสม 3 ธาตุ (Ternary Phase Diagram) ดังแสดงในภาพ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภูมิสมดุล 3 ธาตุในระบบ ทอง-เงิน-ทองแดง ในรูป 3 มิติ [15]

เส้นปะในรูปเป็นเส้นที่แบ่งระหว่างพื้นที่ของสารละลายของแข็ง α (Au-Cu-Ag) กับพื้นที่ที่เกิดการแยกเฟสเป็น 2 เฟส (Immiscibility) คือ α_1(Au-Ag rich) และ α_2(Au-Cu rich) จากรูปจะเห็นว่าพื้นที่ที่ประกอบด้วย 2 เฟสจะมีพื้นที่กว้างขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



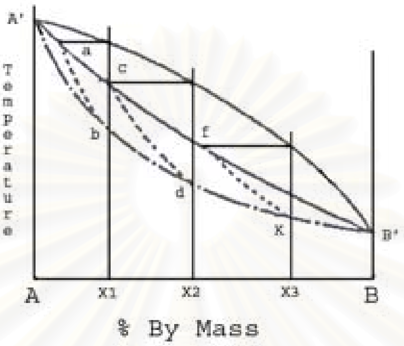
ภาพที่ 2.6 แสดงแผนภูมิสมดุลเฟสของระบบ Au-Cu-Ag ที่ส่วนผสม 18 14 และ 10 กะรัต [12]

ภาพที่ 2.6 แสดงภาพตัดแนวดิ่งเสมือนสองธาตุ (Quasi-Binary Vertical Section) ของแผนภูมิ สมดุลเฟส ของระบบ Au-Cu-Ag ที่ส่วนผสม 18 กะรัต (75%Au) 14 กะรัต (58.3%Au) และ 10 กะรัต (41.7%Au) จากรูปแสดงให้เห็นว่าในระบบ Au-Cu-Ag ทอง 14 กะรัตและ 10 กะรัต จะปรากฏ Immiscibility gap ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการแยกเฟสเป็น 2 เฟส คือα(Cu-Au)และα(Ag-Au) โดยที่อุณหภูมิเหนือ Immiscibility gap จะเป็นบริเวณที่ประกอบไปด้วยสารละลายของแข็งเฟสเดียว นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า โลหะผสม 10 กะรัต มีบริเวณที่ประกอบไปด้วยสารละลายเฟสเดียวในช่วงแคบกว่าโลหะผสม 14 กะรัต เนื่องจากอุณหภูมิของ Immiscibility gap ของโลหะผสม 10 กะรัต มีค่าสูงกว่า ส่วนในโลหะผสม 18 กะรัต นอกจากประกอบด้วย Immiscibility gap แล้วยังประกอบด้วยบริเวณที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบชนิด AuCu อีกด้วย ความแตกต่างดังกล่าวนี้เองจึงทำให้โลหะผสม 18 กะรัต มีพฤติกรรมความแข็งที่แตกต่างออกจากโลหะผสม 10 กะรัตและ 14 กะรัต

โลหะทองผสม 10 กะรัตและ 14 กะรัต จะต้องมีปริมาณเงิน 12-47 เปอร์เซ็นต์ และ10-32 โดยน้ำหนักตามลำดับ เพื่อให้โลหะทองผสมดังกล่าวสามารถเพิ่มความแข็งได้จากการตกตะกอน (Precipitation hardening) ที่อุณหภูมิในช่วง Immiscibility gap ดังแสดงในแผนภูมิเฟส แต่สำหรับทองผสม 18 กะรัต โดยเฉพาะที่ปริมาณ ทองแดงสูง ๆสามารถเพิ่มความเข็งได้จากการเปลี่ยนเฟสจากสารละลายของแข็ง ซึ่งมีโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบไปเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ด้วยการบ่มที่อุณหภูมิวิกฤต

2.3 การเกิดผลึกของโลหะผสมในสภาวะไม่สมดุล

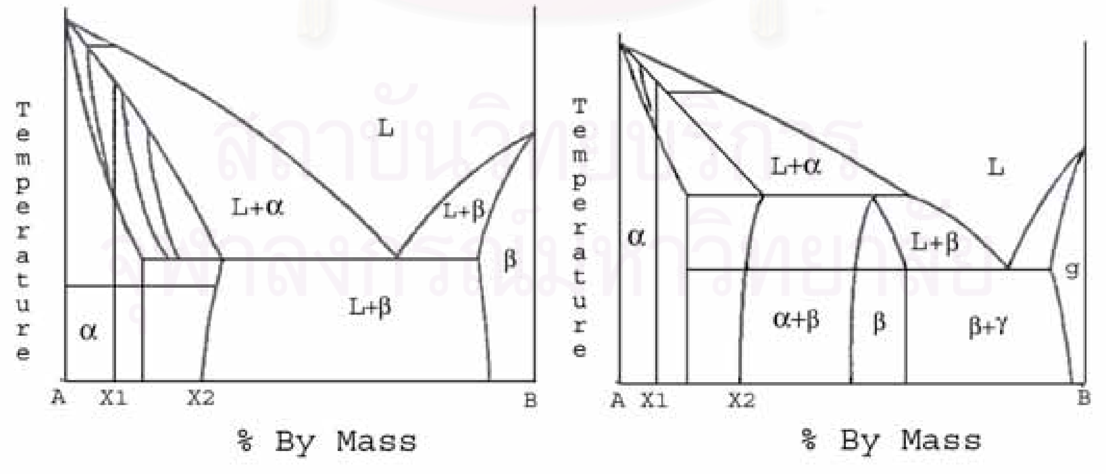
การเกิดผลึกในสภาวะไม่สมดุล คือ การเกิดผลึกจากการโลหะหลอมเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสมดุล ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วในโลหะหลอมเหลว (Supercooled) ทำให้การแพร่ (Diffusion) ของธาตุผสมในผลึกของโลหะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และส่งผลทำให้ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นของส่วนผสมแตกต่างกันเป็นชั้นๆ



ภาพที่ 2.7 แสดงการแข็งตัวใต้สภาวะไม่สมดุล [15]

A’bdKB’ = Non-equilibrium Solidus Line, A’acfB’ = Equilibrium Solidus Line

จากภาพที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าสภาวะไม่สมดุลเส้นการแข็งสมบูรณ์ (Solidus Line) ที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะต่ำกว่าเส้นของแข็งสมบูรณ์ที่เกิดจากสภาวะสมดุล การเกิดผลึกของสารละลายของแข็งที่สภาวะไม่สมดุลจะมีผลต่อผลึกของแข็งที่จะกลายเป็นเดนไดรท์ โดยกิ่งก้านของเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะมีปริมาณส่วนผสมของธาตุผสมต่ำกว่ากิ่งก้านเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ



(A) (B)

ภาพที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้นที่ภายใต้การแข็งตัวที่สภาวะไม่สมดุล ของปฏิกิริยายูเทคติก (ภาพ A) และเพอริเทคติก (ภาพ B) [15]

จากภาพที่ 2.8 จะพบว่า เฟสที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดการแข็งตัวของระบบที่สภาวะสมดุลและไม่สมดุล โดยในระบบยูเทคติกที่ X_2 เมื่อเกิดการแข็งตัวที่สภาวะสมดุลจะเกิดการแข็งเฟสเดียว (α) แต่เมื่อเกิดการแข็งตัวที่สภาวะไม่สมดุลจะเกิดของแข็งสองเฟสที่มีโครงสร้างเป็นยูเทคติก (α+β) และเป็นระบบเพอริเทคติกที่ X_2 ก็จะเกิดในลักษณะคล้ายกันกับระบบยูเทคติก

กล่าวโดยสรุปการเกิดผลึกของสารละลายของแข็งที่สภาวะไม่สมดุลจะก่อให้เกิดผลดังนี้

1. การแยกตัวของเดนไดรท์หรือคอริ่ง
2. จุดการแข็งตัวสิ้นสุดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม
3. เฟสที่จะเกิดขึ้นจากโลหะหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงไปจากที่ควรจะเป็น เช่น จากเฟสเดียวกลายเป็นสองเฟสหรือหลายเฟส
4. อัตราส่วนผสมในเฟสที่สองจะเพิ่มขึ้นสำหรับโลหะผสมแบบ Hetero-phase ภายใต้สภาวะสมดุล

ดังนั้น จากแผนภูมิสมดุลของธาตุ จึงสามารถนำมาอธิบายลักษณะการเกิดและความเป็นอยู่ของโลหะต่างๆที่แทรกตัวอยู่ในตะกรันทุติยภูมิ โดยเหล็กจะแยกตัวออกจากทองคำ เงิน ทองแดง ส่วนทองคำ เงิน และทองแดงจะกระจายตัวอยู่ด้วยกันในลักษณะสารละลายของแข็ง 3 ธาตุ (Solid Solution) โดยทองคำจะกระจายตัวอยู่ทั้งในเฟสของทองแดงและเงิน ส่วนเงินและทองแดงจะมีปริมาณที่น้อยมากที่กระจายตัวอยู่ร่วมกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแผนภูมิสมดุลของธาตุเงินและทองแดง ซึ่งจะได้กล่าวถึงโดยละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ความเป็นมาของกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์

กระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ในปัจจุบันมีพื้นฐานมาจากเทคนิคและกระบวนการแต่งแร่ทองคำซึ่งเป็นที่รู้จักกันในอดีต เช่น การแต่งแร่ทองคำโดยวิธีกราวิทัต (Gravity Concentration) การแต่งแร่ทองคำโดยการแยกด้วยปรอท (Amalgamation) การแต่งแร่ทองคำโดยวิธีไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) การแต่งแร่ทองคำโดยใช้วิธีการแยกด้วยก๊าซคลอรีน (Chlorination) การตกตะกอนด้วยสังกะสี (Zinc Precipitation) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Carbon Absorption) และกระบวนการอื่นๆอีกมากมาย ซึ่งกระบวนการแต่งแร่ทองคำเหล่านี้เป็นที่รู้จักกันมามากกว่า 100 ปี

สำหรับวิธีที่เป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่ในอดีตและถือว่าเป็นวิธีพื้นฐานสำหรับกระบวนการทำให้ทองคำให้บริสุทธิ์ ได้แก่ กระบวนการไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่าเป็นกระบวนการที่ได้ผลและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

ในคริสต์ศตวรรษที่ 18 เป็นที่รู้จักกันว่าทองคำสามารถละลายได้ดีในสารละลายเจือจางของโพแทสเซียมไซยาไนด์ ในปี ค.ศ. 1783 และ1843 ได้มีการบันทึกเกี่ยวกับปฏิกิริยาการทำละลายของพวก Alkaline Cyanides กับทองคำ โดย Scheele และ Bagration ตามลำดับ ต่อมาในปี ค.ศ. 1887 John Stewart MacArthur นักเคมีทางด้านโลหวิทยาและพี่น้องตระกูล Forrests คือ RW.and WM. Forrests ได้ใช้ความรู้ที่ว่าทองคำสามารถละลายได้ในสารละลายเจือจางของโพแทสเซียมไซยาไนด์มาใช้ในการละลายทองคำออกจากแร่ทองคำ

การแต่งแร่ทองคำโดยใช้วิธีไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) ถูกนำมาใช้ในประเทศนิวซีแลนด์เป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1889 ต่อมาที่ Rand เมื่อปี ค.ศ. 1890 และในสหรัฐอเมริกาเมื่อปี 1891 ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา การแต่งแร่ทองคำโดยใช้วิธีไซยาไนด์เดชั่น (Cyanidation) ก็เป็นที่ยอมรับของเหมืองแร่ทองคำทุกแห่งทั่วโลกจนกระทั่งปัจจุบัน

Elsner ได้แสดงปฏิกิริยาเคมีซึ่งใช้ในการละลายทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์ ดังนี้

$$4Au + 8NaCN + O_2 + 2H_2O \;=\; 4NaAu\,(CN)_2 + 4NaOH \text{———} \quad (1)$$

ปฏิกิริยานี้เป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่าเป็น Elsner's Equation ซึ่งมีค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant) ที่คำนวณมาจากค่าพลังงานอิสระของการเกิด Free Energy of Formation = 10^{66}(Bansky, 1934)

Habashi (1970) และ Adamson (1972) ได้ศึกษาถึงกลไกของปฏิกิริยาไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) และได้ชี้ให้เห็นว่า กระบวนการไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) เกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอน ซึ่งทองส่วนใหญ่จะละลายในสารละลายไซยาไนด์ตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

$$2Au + 4NaCN + O_2 + 2H_2O \;=\; 2NaAu\,(CN)_2 + H_2O_2 + 2NaOH \text{———} (2)$$

โดยจะมีทองส่วนน้อยเท่านั้นที่ละลายในสารละลายไซยาไนด์ตามปฏิกิริยาที่ (1)

ค่าคงที่สมดุลที่คำนวณหามาจากพลังงานอิสระของการเกิดสำหรับปฏิกิริยาในสมการที่ (2) เท่ากับ 10^{50} (Bansky, 1934) และ H_2O_2 ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$2Au + 4NaCN + H_2O_2 \quad = \quad 2NaAu(CN)_2 + 2NaOH$$

ซึ่งสุดท้ายแล้วปฏิกิริยาจะเหมือนกับปฏิกิริยาที่ (1)

อัตราการละลายของทองคำในสารละลายไซยาไนด์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1) ความเข้มข้นของไซยาไนด์ พบว่า อัตราการละลายของทองคำสูงขึ้นตามความเข้มข้นของไซยาไนด์ระยะหนึ่งและจะค่อยลดลงตามลำดับหากปริมาณของไซยาไนด์สูงเกินไป โดยทั่วไปปริมาณไซยาไนด์ที่ใช้ในกระบวนการไซยาไนเดชั่นที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 0.02-0.05% CN^-(Sodium Cyanide)

2) pH ของสารละลายจะต้องอยู่ในสภาวะความเป็นด่างในช่วง pH 10-12 ซึ่งควบคุมด้วยปริมาณของปูนขาว สำหรับระบบ Au-CN-H_2O พบว่าทองสามารถละลายได้ดีที่สุด เมื่อ pH ของสารละลายเป็น 10 เนื่องจาก Potential Difference ระหว่าง Anode และ Cathode reactions มีความสามารถในการละลายมากที่สุด ที่ pH 10

ในทางปฏิบัติจะต้องควบคุม pH ของสารละลายให้อยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง เพื่อป้องกันไม่ให้ปริมาณของไซยาไนด์สูญเสียออกไปในรูปของก๊าซ HCN โดยกระบวนการดังต่อไปนี้

Hydrolysis: $NaCN + H_2O \; = \; HCN + NaOH$

Decomposition by Atmospheric CO_2: $NaCN + H2O + CO2 = HCN + NaHCO_3$

ก๊าซ HCN ที่เกิดขึ้นตามปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

อย่างไรก็ตาม สารละลายไซยาไนด์ที่อยู่ในสภาวะที่เป็นด่างอ่อน (pH 9-9.5) อัตราการละลายทองคำก็จะลดลงด้วย

3) ในระหว่างการทำไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) ที่มีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการพ่นอากาศ (Aeration) เข้าไปในระบบด้วยวิธีการต่างๆ

Reyndol (1945) ได้คำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาในกระบวนการไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) ที่มีออกซิเจนเปรียบเทียบกับที่ไม่มีออกซิเจน พบว่า ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่มีออกซิเจนเท่ากับ 10^{66} และไม่มีออกซิเจนเท่ากับ $10^{-9.9}$

ผลการทดลองที่ Morro Velho (Haden, 1937-1938) แสดงให้เห็นว่า อัตราการละลายของทองในสารละลายไซยาไนด์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนอากาศที่พ่นเข้าสู่ระบบ

Cathro (1961), Day (1967) แสดงให้เห็นว่าอัตราการละลายจะดีที่สุดเมื่อพ่นออกซิเจนเข้าไปในระบบ 20 มิลลิกรัมออกซิเจน ต่อ สารละลาย 1 ลิตร

4) โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายทองคำ Julian และ Smart (1921) พบว่า อุณหภูมิสูงสุดสำหรับการละลายทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์ประมาณ 85 องศาเซลเซียส อัตราการละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 85 องศาเซลเซียส เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนในสารละลายลดลง แต่ในทางปฏิบัติการทำไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) นิยมทำที่อุณหภูมิปกติ (Ambient Temperatures) เพราะโดยลักษณะของการทำ Heap Leaching นั้นจะต้องใช้เวลาเป็นเดือนหากมีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายเข้าในระบบจะทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น

5) ขนาดของเม็ดแร่ (Particle Size) ก็มีส่วนสำคัญเช่นกันในการทำละลายทองคำ เพราะถ้าหากเม็ดแร่ละเอียดจะทำให้ใช้เวลาในการทำไซยาไนเดชั่น (Cyanidation) รวดเร็วมากขึ้น เช่น อนุภาคแร่ขนาด 44 ไมครอน ใช้เวลาเพียง 14 ชั่วโมง ในขณะที่ขนาดอนุภาคที่ 150ไมครอน ใช้เวลามากถึง 48 ชั่วโมง

6) อัตราการละลายของทองคำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Pulp Density ลดลง Kameda พบว่า อัตราการละลายของทองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้า Pulp Density ลดลงจาก 50% ถึง 10% แต่ถ้าหาก Pulp Density ลดลงจาก 10% ถึง 5% ในช่วงนี้อัตราการละลายแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย

2.5 กระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์

กระบวนการ Refining หรือ การทำให้ทองคำบริสุทธิ์หลายกรรมวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดและสิ่งเจือปนในโลหะที่ต้องการแยกสกัด กรรมวิธีต่างๆ ที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่

1. **Miller Process** เป็นการแยกสกัดทองคำโดยใช้ก๊าซคลอรีนเป็นตัวแยกสกัด
2. **Wohlwill Process** เป็นการแยกสกัดทองคำโดยใช้วิธีการทางไฟฟ้า **(Electrolysis)**
3. **Chemical Refining Process** เป็นการแยกสกัดทองคำโดยใช้กรดไนตริกและกรดกัดทองเป็นตัวแยกสกัด

การแยกสกัดแต่ละวิธีจะได้ผลลัพธ์ที่มีคุณสมบัติที่ต่างกัน โดยทั่วไปการแยกสกัดโลหะทองคำให้บริสุทธิ์จะใช้กรรมวิธี Miller Process ในขั้นแรก หลังจากนั้นจะใช้กระบวนการ Electrolysis (Wohlwill Process) อีกครั้ง จนได้โลหะทองคำที่ดีที่สุดและมีความเป็นมาตรฐานสากล

2.5.1 กระบวนการแยกสกัดทองคำโดยใช้ก๊าซคลอรีน (Miller Chlorination Process)

กระบวนการแยกสกัดทองคำโดยใช้ก๊าซคลอรีน (Miller Chlorination Process) นี้ใช้ในการแยกโลหะเงินและโลหะอื่นๆออกจากทองคำ จะใช้เมื่อทองคำไม่มีความบริสุทธิ์เพียงพอหรือต้องการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของทองคำก่อนที่จะแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

กระบวนการแยกสกัดทองคำโดยใช้ก๊าซคลอรีน (Miller Chlorination Process) นี้จะเป็นกระบวนการที่พ่นก๊าซคลอรีนเข้าไปในโลหะที่กำลังหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1150°C ภายใต้เงื่อนไขนี้ เหล็ก สังกะสี และตะกั่ว จะรวมตัวอยู่ในรูปของคลอไรด์ในสถานะของก๊าซ ในขณะที่ทองแดงและเงินจะรวมตัวอยู่ในรูปของคลอไรด์ในสถานะของเหลว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังต่อไปนี้

$Fe + Cl_2 \longleftrightarrow FeCl_2;$ $\Delta G^\circ = -200.6$ kJ mol^{-1}

$Zn + Cl_2 \longleftrightarrow ZnCl_2;$ $\Delta G^\circ = -288.8$ kJ mol^{-1}

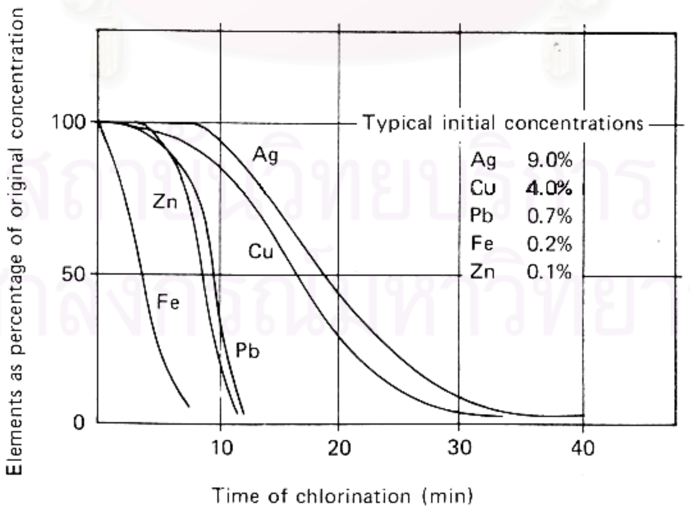
$Pb + Cl_2 \longleftrightarrow PbCl_2;$ $\Delta G^\circ = -200.6$ kJ mol^{-1}

$2Cu + Cl_2 \longleftrightarrow 2CuCl;$ $\Delta G^\circ = -125.6$ kJ mol^{-1}

$2Ag + Cl_2 \longleftrightarrow 2AgCl;$ $\Delta G^\circ = -138.1$ kJ mol^{-1}

$2Au + 3Cl_2 \longleftrightarrow AuCl_3;$ ΔG° Positive

โลหะจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับ คือ Fe > Zn > Pb > Cu > Ag >>> Au ซึ่งจะแสดงให้เห็นในกราฟต่อไปนี้



ภาพที่ 2.9 ผลของเวลาในกระบวนการ Miller Chlorination ในการแยกสกัดโลหะ [7]

Flux ที่เติมเข้าไป (ได้แก่ silica, sodium borate) จะช่วยให้สามารถแยกโลหะมลทินและช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากการระเหยโดยเฉพาะ Silver Chloride

ปฏิกิริยาเริ่มต้นค่อนข้างซับซ้อน ก๊าซคลอรีนรวมตัวกับโลหะและเมื่อปฏิกิริยาหยุดลง ปริมาณของโลหะมลทินก็จะลดลงด้วย ส่วนทองแดงและเงินก็จะรวมตัวในรูปของของเหลวคลอไรด์

สุดท้ายเมื่อกระบวนการ Chlorination ของเงิน ใกล้ที่จะสมบูรณ์ทองคำที่เหลือจะมีความบริสุทธิ์ใกล้ถึง 99% และปฏิกิริยาจะซับซ้อนมากขึ้นไปอีกเมื่อได้ Gold Chlorideอยู่ในรูปของก๊าซ

คุณสมบัติทั่วไปจะแสดงออกให้เห็นได้ คือ ไอระเหยสีน้ำตาล แดง ปฏิกิริยา Chlorination จะใช้เวลาอยู่ระหว่าง 30 และ 40 นาที ถึงจะสมบูรณ์ ที่จุดหลอมเหลวของทองแดงและเงินคลอไรด์จะลอยอยู่บนผิวหน้าของโลหะหลอมเหลวและกำจัดออกได้

การเผาถลุงอีกครั้งและการเติม Fluxes เพิ่มเติม จะทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความบริสุทธิ์มากขึ้น จะได้ทองคำ 99.6% เงิน 0.3-0.4% และทองแดง 0.03-0.04 % แต่จะเสียปริมาณทองคำจากการระเหยออกไปมากขึ้น ถ้าต้องการแยกเงินออกมาอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นก็จะต้องขยายเวลาการเผาถลุงมากขึ้น และผลลัพธ์ที่ได้คือ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีทองคำบริสุทธิ์มากกว่า 99.60% ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์นั้นจะถูกเทลงในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 1100°C และปล่อยให้เย็นตัว ซึ่งทองจะเย็นตัวจากข้างล่างขึ้นข้างบนซึ่งจะช่วยให้โลหะมลทินลอยขึ้นสู่ผิวหน้าด้วย

2.5.2 กระบวนการแยกสกัดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า (Wohlwill Electrolytic Refining Process)

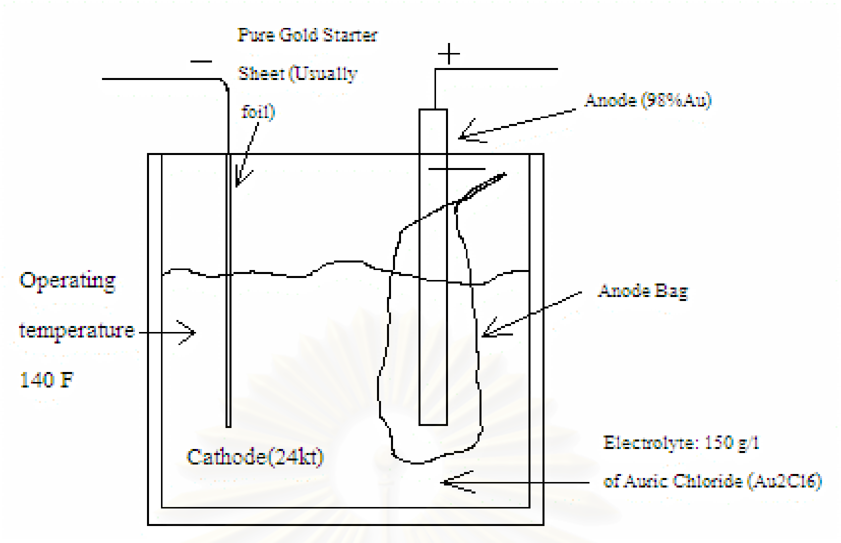
เทคนิคนี้เป็นวิธีดั่งเดิม ใช้ได้ดี และใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำทองคำให้บริสุทธิ์ที่สำคัญทั่วโลก โดยปกติใช่ร่วมกับกระบวนการถลุงแร่

ขั้นตอนที่สำคัญ คือ การเตรียมการจับตัวทางขั้วบวกของทองคำที่ไม่บริสุทธิ์ (เนื้อทองคำอย่างน้อย 98.5%-99.0%แต่อาจจะต่ำกว่าได้ในบางสภาวะ) และการตกตะกอนของทองบริสุทธิ์ที่ขั้วลบซึ่งอาจเป็นแผ่นทองบริสุทธิ์หรือไททาเนียม และมีการลอยตัวของเซลล์ประจุไฟฟ้าที่มีกรดทองคลอไรด์ ($AuCl_3$) กับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส จะทำการแยกโลหะเหลวด้วยกระแสไฟฟ้า

ที่ประจุขั้วบวก ปฏิกิริยากระบวนการทำละลายทองคำ คือ

$$Au + HCl + 3Cl^- \longrightarrow HAuCl_4 + 3e$$

$$Au + HCl + Cl^- \longrightarrow HAuCl_2 + 3e$$



ภาพที่ 2.10 กระบวนการแยกสกัดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า (Wohlwill Process) [1]

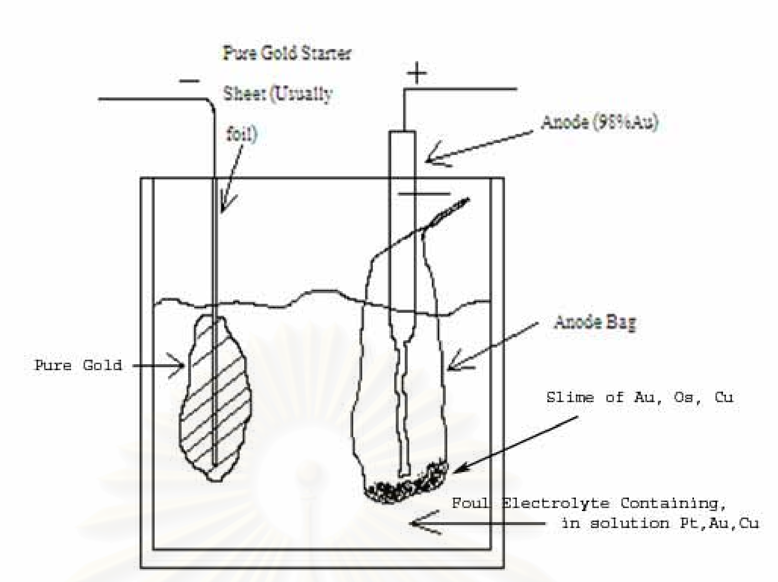
โลหะพื้นฐานในประจุขั้วบวกที่ทำให้เกิดคลอไรด์ บางตัวสามารถละลายได้ในโลหะเหลวที่ถูกแยกด้วยประจุไฟฟ้า เช่น ทองแดง สังกะสี และตัวอื่นๆไม่สามารถละลายได้ เช่น เงิน ตะกั่ว และจมลงใต้ประจุเป็นตะกอนขั้วบวก $HAuCl_2$ และชิ้นส่วนทองคำแท้ก็จมอยู่ใต้ประจุและรวมตัวกันอยู่ในตะกอนขั้วบวก

ส่วนโลหะกลุ่มแพลตตินัมก็อาจจะเกิดที่ขั้วลบ แพลตตินัมและพลาเดียมจะละลายในโลหะเหลวที่แยกด้วยประจุไฟฟ้า ขณะที่ อิริเดียม รูทิเนียม โรเดียม และออสเมียม ไม่สามารถละลายและจะถูกสะสมในตะกอนขั้วบวก

ทองคำจะถูกแยกออกจากสารละลายที่ขั้วลบ ตามปฏิกิริยา

$$HAuCl_4 + 3H \longrightarrow Au + 4HCl - 3e$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.11 ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการแยกสกัดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า [1]

กระบวนการจะสามารถผลิตทองคำให้มีความบริสุทธิ์ได้เกิน 99.99% และขจัดโลหะกลุ่มแพลตตินัมออกได้ทั้งหมดนั้น จำเป็นต้องอาศัยความเอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอในการควบคุมกระบวนการ โดยเฉพาะในขั้นตอนดังต่อไปนี้

- คุณภาพของขั้วบวก (ระดับความบริสุทธิ์ควรเกิน 98.5%)
- อุณหภูมิในการปฏิบัติการ (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)
- ความหนาแน่นของหน่วยวัดความดันกระแสไฟฟ้า

2.5.3 กระบวนการแยกสกัดโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical Refining Process)

2.5.3.1 กลไกการละลายของโลหะทองคำ (Mechanism of Gold Dissolution)

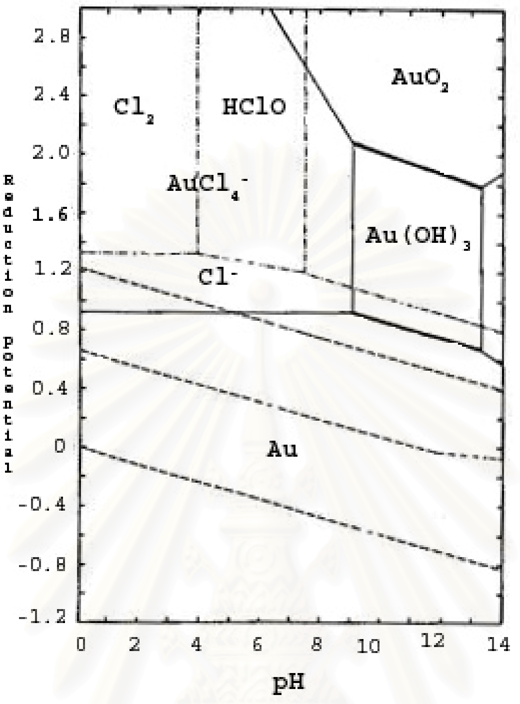
ทองคำที่ละลายในสารละลายคลอไรด์ ได้แก่ Au (I) และ Au (III) Chloride complexes

$AuCl_2^- + e \leftrightarrow Au + 2Cl^-$ $\quad E^\circ = 1.113$ V

$AuCl_4^- + 3e^- \leftrightarrow Au + 4Cl^-$ $\quad E^\circ = 0.994$ V

สมดุล นี้แสดงถึง E_n- pH diagram สำหรับระบบของ Au – Cl – H_2O สารประกอบ Au (III) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่า Au (I) 0.12 V.สารประกอบทองคลอไรด์เหล่านี้จะไม่เสถียรจนกว่าจะกลายเป็นสารประกอบ Au (I) cyanide แต่ประโยชน์อย่างหนึ่ง คือ ง่ายต่อการทำให้เป็นโลหะทองคำ โดยการ Oxidation ซึ่งจะพบได้เมื่อ E°มากกว่าหรือใกล้เคียงกับ 1.2 V และโดยเฉพาะธาตุ Chlorine Chlorate ion หรือ Ozone ซึ่งเป็นตัวที่ละลายทองคำที่ดี โดยเฉพาะคลอรีนเป็น Oxidant ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

อย่างไรก็ตาม Bromine และ Iodine ก็ถูกใช้อย่างได้ผลเช่นกัน กรดไนตริกที่มีความเข้มข้นเพียงพอจะละลายทองคลอไรด์และวิธีนี้ถูกประยุกต์เป็นกรดกัดทอง Aqua Regia (ส่วนผสม HNO_3: HCl = 1: 3) ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการละลายและวิเคราะห์ทองคำ



ภาพที่ 2.12 แสดง Reduction Potential และ pH Diagram ของระบบ Au – H_2O – Cl^- [1]

กลไกทั่วๆไปในการละลายทองคำในสารละลายคลอไรด์นั้น จะดำเนินไป 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรก Au (I) Chloride จะจับตัวอยู่ผิวหน้าของโลหะทองคำ

$$2Au + 2Cl^- \longleftrightarrow 2AuCl + 2e$$

$AuCl_2^-$ จะเกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และจะมีการ Oxidation มากขึ้นจนกลายเป็น Au (III)

$$AuCl_2^- + 2Cl^- \longleftrightarrow AuCl_4^- + 2e$$

หรือแพร่กระจายกลายเป็น $AuCl_2^-$ โดยเป็นผลมาจาก Oxidation Potential ของสารละลาย โดย Oxidation Potential จะใกล้เคียงหรือมากกว่า 1.4 V ผิวหน้าของทองคำจะถูกกระทำกลายเป็นชั้นๆของทองคำออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.3.2 กระบวนการแยกสกัดทองคำโดยใช้กรดกัดทอง (Aqua Regia Process)

ขั้นตอนสำคัญในกระบวนการแยกสกัดทองคำโดยใช้กรดกัดทอง (Aqua Regia Process) คือ การละลายโลหะผสมทองคำในกรดกัดทอง โดยส่วนผสมของกรดกัดทองประกอบไปด้วย กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 3 ส่วนและกรดไนตริก (HNO_3) 1 ส่วน โดยกรดกัดทองจะละลายโลหะทองคำและโลหะกลุ่มแพลตินัมบางตัว คือ แพลตินัมและพลาเดียม ในขณะที่ไม่ละลาย อิริเดียม รูทิเรียม โรเดียม และออสเมียม รวมทั้งโลหะเงิน จึงสามารถใช้คุณสมบัตินี้ในการทำการแยกสกัดโลหะเงินออกจากโลหะทองคำและโลหะพลาตินัมได้ แต่ต้องระวังการจับตัวกันกลายเป็น Silver Chloride ซึ่งจะเป็นตัวที่ทำให้ปฏิกิริยาหยุดชะงักลง ซึ่งปฏิกิริยาในการทำละลายจะเป็นดังต่อไปนี้

$$Au + HNO_3 + 4HCl \longrightarrow H[AuCl_4] + 2H_2O + NO$$

จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะได้สารละลายที่ประกอบไปด้วย Gold Chloride ($AuCl_3$) และ Platinum Chloride (H_2PtCl_6) ซึ่งเมื่อนำไปแยกสกัดอีกครั้ง โดยใช้วิธีการผ่านก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดกัดทองเพื่อทำการตกตะกอนแยกโลหะประเภททองคำออกมาจากสารละลายดังกล่าว ส่วนโลหะมีค่าประเภทแพลตินัมนั้นจะใช้วิธีการตกตะกอนเป็นสารประกอบประเภท Ammonium Chloroplatinate $(NH_4)_2PtCl_6$ โดยการเติม Ammonium Chloride (NH_4Cl) ลงในสารละลายกรดกัดทองเพื่อแยกเอาโลหะประเภทแพลตินัมออกมา ส่วนพลาเดียมนั้นใช้วิธีการตกตะกอนโดยการเติม Dimethyglyoxime และทำการแยกออกจากสารละลายกรดกัดทองโดยวิธีการกรอง (Filter) สำหรับพลาเดียมนั้นการใช้วิธีการตกตะกอนถือว่าเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการทำให้พลาเดียมมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.3.3 กระบวนการแยกสกัดโดยใช้กรดไนตริก (Nitric Parting)

กระบวนการแยกสกัดโดยใช้กรดไนตริก (Nitric Parting) เป็นกระบวนการแยกโลหะเงินออกจากทองคำโดยใช้กรดไนตริกเป็นตัวทำละลาย โดยใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของทองคำน้อยกว่า 25% โดยอาศัยคุณสมบัติ คือ กรดไนตริก (HNO_3) สามารถละลายโลหะเงินและโลหะพื้นฐาน แต่ไม่สามารถละลายโลหะทองคำ ขั้นตอนและกระบวนการ คือ ละลายโลหะผสมในสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ซึ่งปฏิกิริยาในการทำละลายจะเป็นดังต่อไปนี้

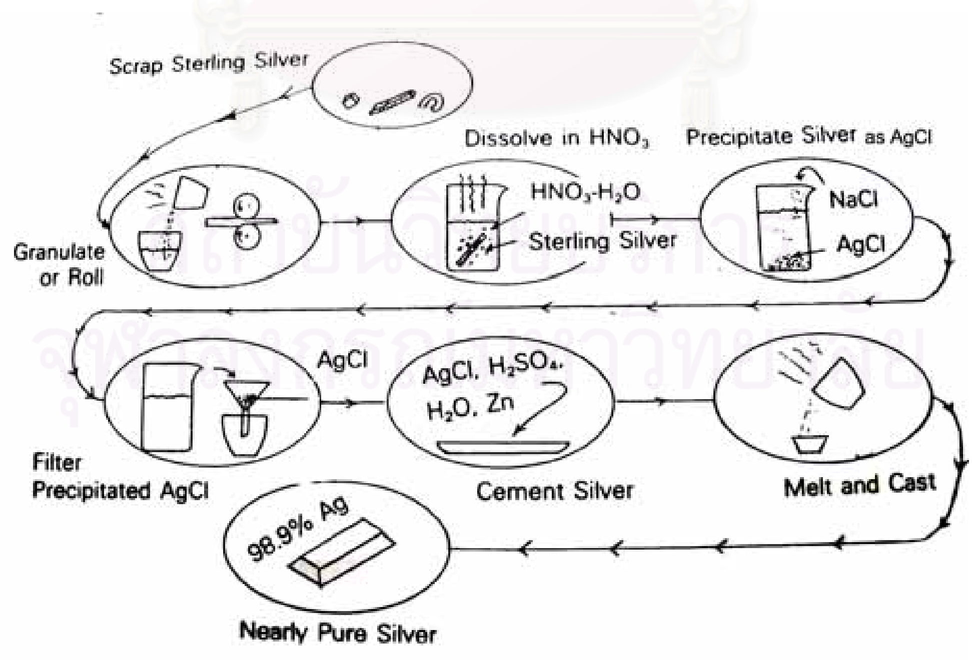
$$2HNO_3 + Ag_2 \longrightarrow 2AgNO_3 + H_2$$

จากปฏิกิริยาจะได้สารละลายที่ประกอบไปด้วยโลหะพื้นฐานและโลหะเงิน ซึ่งสามารถนำไปแยกโลหะเงินออกจาสารละลายด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation) ด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ได้ดังปฏิกิริยา

$$AgNO_3 + NaCl \longrightarrow AgCl + NaNO_3$$

จากนั้นนำไปกรองแยกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ออกจากสารละลายดังกล่าว จากนั้นนำตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ใส่ลงในกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) แล้วเติมผงสังกะสี ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า Cementation of silver chloride by ion exchange แล้วนำตะกอนที่ได้ไปหลอมจะได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 98.9%

เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ได้ในเชิงพาณิชย์โดยสามารถทำการแยกสกัดให้ทองคำมีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.99% โดยการใช้กรดไนตริกเป็นตัวแยกสกัดในกระบวนการเบื้องต้น สำหรับการลดปริมาณของโลหะเงินโดยสามารถลดปริมาณของโลหะเงินจาก 40%-50% ลงเหลือน้อยกว่า 10%



ภาพที่ 2.13 กระบวนการแยกสกัดโดยใช้กรดไนตริก (Nitric Parting) [1]

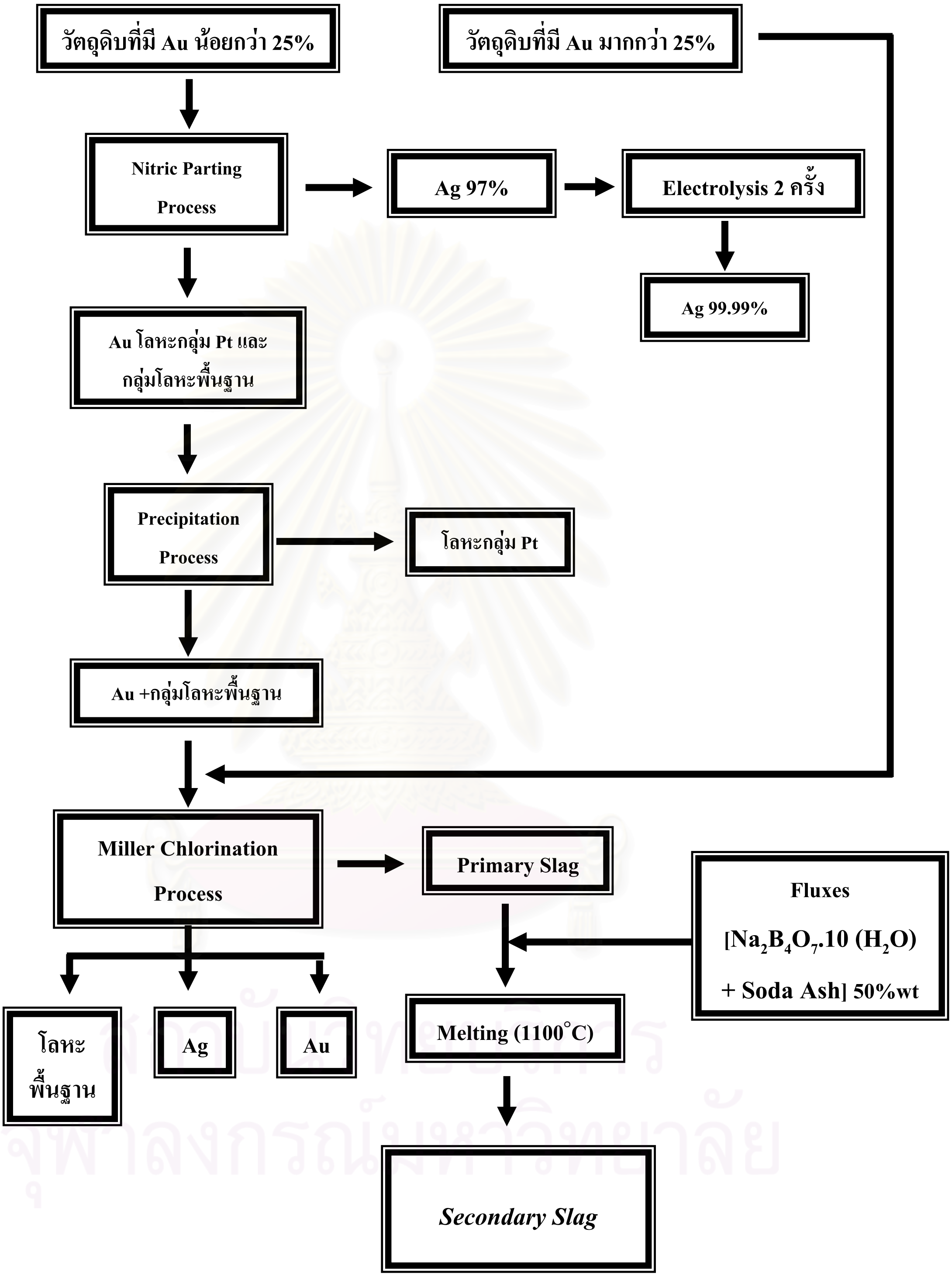
2.6 กระบวนการเกิดของตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag)

กระบวนการและขั้นตอนการทำให้โลหะทองคำบริสุทธิ์ จะมีตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) เกิดขึ้น กล่าวคือ วัตถุดิบซึ่งส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยโลหะมีค่ากลุ่ม ทองคำ เงิน กลุ่มแพลทินัม เหล็ก สังกะสี และโลหะพื้นฐานอื่นๆ โดยขั้นตอนจะแยกวัตถุดิบออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีโลหะทองคำน้อยกว่า 25% และกลุ่มที่มีโลหะทองคำมากกว่า 25% กลุ่มที่มีโลหะทองคำน้อยกว่า 25 % ส่วนนี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Nitric Parting ซึ่งจะสามารถแยกโลหะเงินออกจากโลหะทองคำ โลหะกลุ่มแพลทินัมและโลหะกลุ่มพื้นฐานอื่นๆ โดยกระบวนการนี้จะแยกโลหะออกได้ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 โลหะเงินที่แยกได้จะมีปริมาณเงินอยู่ประมาณ 97 % จะนำเข้าสู่กระบวนการ Electrolysis 2 ครั้ง เพื่อให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์ถึง 99.99%

ส่วนที่ 2 จะประกอบไปด้วยโลหะทองคำ โลหะกลุ่มแพลทตินัมและโลหะกลุ่มพื้นฐาน โลหะส่วนนี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแยกโดยการตกตะกอน (Precipitation) เพื่อแยกเอาโลหะกลุ่มแพลทตินั่มออกจากโลหะทองคำและโลหะพื้นฐาน โดยโลหะทองคำและโลหะกลุ่มพื้นฐานที่ที่แยกได้นั้นจะถูกนำไปรวมกับวัตถุดิบอีกกลุ่มหนึ่งที่มีโลหะทองคำมากกว่า 25% จนได้โลหะทองคำประมาณ 40% ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการ Miller Chlorination เพื่อแยกโลหะเงินและโลหะกลุ่มพื้นฐานออกจากโลหะทองคำ กระบวนการนี้จะให้ตะกรันออกมา เรียกว่า ตะกรันปฐมภูมิ (Primary Slag) ในตะกรันปฐมภูมิ (Primary Slag) จะมีปริมาณของโลหะทองคำหลงเหลือปะปนอยู่ 5-10% ซึ่งสามารถนำไปแยกสกัดโดยนำไปเผาถลุงอีกครั้งที่อุณหภูมิ 1100°C โดยเติม Fluxesจำพวก ($Na_2B_4O_7.10(H_2O)$ + Soda Ash) ซึ่งการเผาถลุงดังกล่าวจะให้ตะกรัน ออกมาอีกครั้ง เรียกว่าตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) จะมีปริมาณของโลหะเงินหลงเหลืออยู่อีกประมาณ0.3%และปริมาณโลหะทองคำหลงเหลืออยู่ประมาณ 0.1 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการเกิดของตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) จากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์



** กลุ่มโลหะพื้นฐานได้แก่ โลหะพวก สังกะสี เหล็ก ทองแดง*

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องย่อยแบบฆ้อน (Hammer Mill)

3.1.2 เครื่องย่อยจอว์ (Jaw Crusher)

3.1.3 ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve)

3.1.4 กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)

3.1.5 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

3.1.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

3.1.7 โต๊ะสั่นแยกแร่ (Shaking Table)

3.1.8 เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

3.1.9 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

3.2 วิธีการดำเนินการทดลองและขั้นตอนการทดลองโดยละเอียด

การทดลองประกอบไปด้วยการศึกษาทบทวนข้อมูล องค์ความรู้พื้นฐานและเก็บตัวอย่างตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) จากกระบวนการเผาถลุง ที่บริษัท GrestestGold & Refinery จำกัด นำมาวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี โดยศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่า ทองคำ เงินและธาตุองค์ประกอบอื่น ในตะกรันทุติยภูมิ โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescent Spectroscopy (XRF) และศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของโลหะมีค่า ทองคำและเงิน ในตะกรันทุติยภูมิ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) และเครื่อง Energy Dispersive X-Ray (EDX) เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) และดำเนินการศึกษาทบทวนข้อมูลจากรายงานการวิจัยและเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาภูมิหลังและศึกษาสถานภาพโดยทั่วไป ที่จะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ โดยมุ่งเน้นที่จะเสนอแนะแนวทางการพัฒนาและวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่า ทองคำและเงิน ในตะกรันทุติยภูมิที่ได้จากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์

3.2.1 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่า ทองคำ เงินและธาตุองค์ประกอบอื่นในตะกรันทุติยภูมิด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescent Spectroscopy (XRF)

ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับวิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่เหมาะสมกับตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) นั้น คือวิธีอัดให้เป็นแผ่นหรือเป็นเม็ด (Palletizing)

วิธีนี้จำเป็นจะต้องบดให้ตะกรันทุติยภูมิละเอียดเพื่อให้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันเมื่ออัดให้เป็นเม็ดหรือเป็นแผ่นจะได้มีผิวหน้าเรียบ

โดยนำตะกรันทุติยภูมิมาบดในเครื่องบด ประมาณ 3-5 นาที หรือจนได้ ตะกรันทุติยภูมิที่มีความละเอียดประมาณ 200 เมช ก่อนชักตัวอย่างตะกรันทุติยภูมิ ด้วยวิธีการทำ Coning and quartering แล้วนำไปใส่ถ้วยอลูมิเนียมเพื่ออัด แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดขนาด 20-30 ตัน เวลา 10-20 วินาที จะได้สารตัวอย่างที่เป็นเม็ดหรือเป็นแผ่น เพื่อวางใน Sample Holder แล้วนำไปทำการวิเคราะห์โดย XRF แล้วบันทึกผลและสรุปผลที่ได้ต่อไป

3.2.2 ขั้นตอนการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) โดยใช้เครื่อง X – Ray Diffractometer (XRD)

ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับวิธีการเตรียมสารตัวอย่างที่เหมาะสมกับตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) นั้น คือ วิธีอัดให้เป็นแผ่นหรือเป็นเม็ด (Palletizing)

วิธีนี้จำเป็นจะต้องบดให้ตะกรันทุติยภูมิ ละเอียดเพื่อให้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันเมื่ออัดให้เป็นเม็ดหรือเป็นแผ่นจะได้มีผิวหน้าเรียบ

นำตะกรันทุติยภูมิมาบดในเครื่องบด ประมาณ3-5 นาที หรือจนได้ ตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) ที่มีความละเอียดประมาณ 200 เมช ก่อนชักตัวอย่างด้วยวิธีการทำ Coning and quartering แล้วนำไปใส่ถ้วยอลูมิเนียมเพื่ออัด แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดขนาด 20-30 ตัน เวลา 10-20 วินาที จะได้ตะกรันทุติยภูมิ ที่เป็นเม็ดหรือเป็นแผ่น เพื่อวางใน Sample Holder แล้วนำไปทำการวิเคราะห์โดย XRD แล้วบันทึกผลและสรุปผลที่ได้ต่อไป

3.2.3 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะ รูปร่าง ขนาด โครงสร้างจุลภาค ของโลหะมีค่าประเภททองคำ เงิน ในตะกรันทุติยภูมิ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) และเครื่อง Energy Dispersive X-Ray (EDX)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เตรียมชิ้นงานโดยการเพิ่มพื้นที่ชิ้นงานด้วยการทำเม้าติ้ง (Mounting) แล้วเตรียมผิวชิ้นงาน โดยการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 แล้วขัดด้วยผงเพชรขนาด 9, 6, 3, 1 และ ¼ ไมครอน ตามลำดับล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ก่อนเป่าให้แห้ง
2) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแล้วถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายต่างๆ
3) ตรวจสอบรูปร่าง ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พร้อมทั้งถ่ายภาพที่กำลังขยายต่างๆ
4) ตรวจสอบลักษณะ รูปร่าง การกระจายตัวของโลหะมีค่า ทองคำ เงินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) โดยใช้วิธี X-ray Image Mapping
5) ตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมในเฟสหรือโครงสร้างที่พบด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray: EDX แล้วบันทึกผลและสรุปผลที่ได้ต่อไป

3.2.4 วิเคราะห์ ประเมินผลและเสนอแนะแนวทางที่เหมาะสม ในการเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ

วิเคราะห์และประเมินผลที่ได้จากการค้นคว้าทดลองข้างต้นทั้งหมด รวมถึงศึกษาเรื่องของปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆกัน (Distribution of Precious Metals in Various Size Fractions) ศึกษาโลหะมีค่าที่แยกตัวเป็นอิสระจากมลทินที่ขนาดอนุภาคต่างๆ (Size Liberation) ศึกษาอัตราการละลายน้ำของตะกรันทุติยภูมิ และนำผลที่ได้ทั้งหมดมาสรุปเพื่อที่จะเสนอแนะแนวทางที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag)

บทที่ 4

รายงานผลการทดลอง

4.1 การศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าทองคำ เงิน และธาตุองค์ประกอบอื่น ในตะกรันทุติยภูมิ โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescent Spectroscopy (XRF)

การศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าทองคำ เงิน และโลหะอื่นๆในตะกรันทุติยภูมิ โดยใช้เครื่อง XRF ทำให้ทราบปริมาณของโลหะมีค่า ทองคำ เงิน ที่กระจายตัวอยู่ในตะกรันทุติยภูมิและยังรวมถึงธาตุอื่นๆ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะบ่งบอกถึงองค์ประกอบทั้งหมดของตะกรันทุติยภูมิ ว่ามีปริมาณของโลหะมีค่าเท่าไร และมีธาตุใดบ้างที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญและมีปริมาณเท่าไร ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญเหล่านี้จะสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบเพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของกระบวนการเก็บกลับคืนว่ามีประสิทธิเพียงพอหรือไม่และยังเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญที่ใช้ประกอบการพิจารณาเลือกกระบวนการที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าเพื่อที่จะเสนอแนะแนวทางการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าประเภท ทองคำ เงิน ในตะกรันทุติยภูมิให้ได้ผลอย่างมีประสิทธิภาพและสมบูรณ์ที่สุด

จากการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าและธาตุองค์ประกอบอื่นในตะกรันทุติยภูมิพบว่า มีปริมาณโลหะมีค่า ทองคำ 0.11% เงิน 0.29% และธาตุองค์ประกอบหลักอื่นที่สำคัญได้แก่ โซเดียม 53.89% ซิลิกอน 17.39% คลอรีน 9.18% แคลเซียม 5.95% เหล็ก 5.49% และทองแดง 0.10% โดยสาเหตุที่มีธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในตะกรันทุติยภูมิ ก็เนื่องมาจาก โลหะมีค่าทองคำ เงิน และทองแดง เป็นองค์ประกอบหลักของทองคำกะรัตซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ตะกรันทุติยภูมินี้ออกมา จึงยังมีโลหะมีค่าเหล่านี้บางส่วนที่ยังหลงเหลือปะปนมาอยู่ในตะกรันทุติยภูมิ ส่วนธาตุองค์ประกอบอื่นจำพวกโซเดียม ซิลิกอนและแคลเซียม โดยโซเดียมนั้นถือเป็นองค์ประกอบหลักของตะกรันทุติยภูมิ ซึ่งสาเหตุที่มีธาตุเหล่าในเป็นองค์ประกอบในตะกรันทุติยภูมิด้วยเนื่องมาจาก ในกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเติม Fluxes ซึ่งเป็นสารจำพวก $Na_2B_4O_7.10H_2O$ และ Na_2CO_3 และสารประกอบอื่นๆพวก SiO_2+Na_2CO_3 และCaO เป็นต้น เพื่อใช้เป็นตัวช่วยให้สามารถแยกโลหะมลทินและช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากการระเหย จึงทำให้องค์ประกอบหลักของตะกรันทุติยภูมิ เป็นธาตุจำพวกโซเดียม ซิลิกอนและแคลเซียม ส่วนธาตุจำพวกคลอรีนสาเหตุที่มีอยู่ในตะกรันทุติยภูมิ เนื่องมาจากในกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ใช้กระบวนการ Miller Chlorination ซึ่งเป็นการแยกสกัดทองคำโดยใช้ก๊าซคลอรีนเป็นตัวแยกสกัด ซึ่งในกระบวนการนี้จะให้ตะกรันปฐมภูมิออกมาซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ ตั้งต้นของตะกรันทุติยภูมิ ทำให้ตะกรันทุติยภูมิมีธาตุจำพวกคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ส่วนธาตุองค์ประกอบของตะกรันทุติยภูมิจำพวกเหล็ก โดย

สาเหตุที่มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบของตะกรันทุติยภูมิ เนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ตั้งต้นเป็นเครื่องประดับเก่าและเศษวัสดุเครื่องประดับที่ได้จากกระบวนการผลิตเครื่องประดับ ซึ่งในกระบวนการผลิตเครื่องประดับ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตเป็นวัสดุที่ทำมาจากเหล็ก เช่น ตะไบ จึงเป็นไปได้ที่วัสดุจำพวกนี้สึกหรอขณะใช้งานและกลายเป็นเศษผงที่ปะปนมากับเศษวัสดุเครื่องประดับที่นำมาเป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นในกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์และในบางกรณีสารประกอบจำพวกเหล็กออกไซด์ (FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4) ยังช่วยทำให้การกลายสภาพเป็นของเหลวได้ดียิ่งขึ้นในกระบวนการเผาถลุงและด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีเหล็กอยู่ในองค์ประกอบของตะกรันทุติยภูมิด้วย

ตารางที่4.1 แสดงผลการตรวจสอบปริมาณธาตุในตะกรันทุติยภูมิ

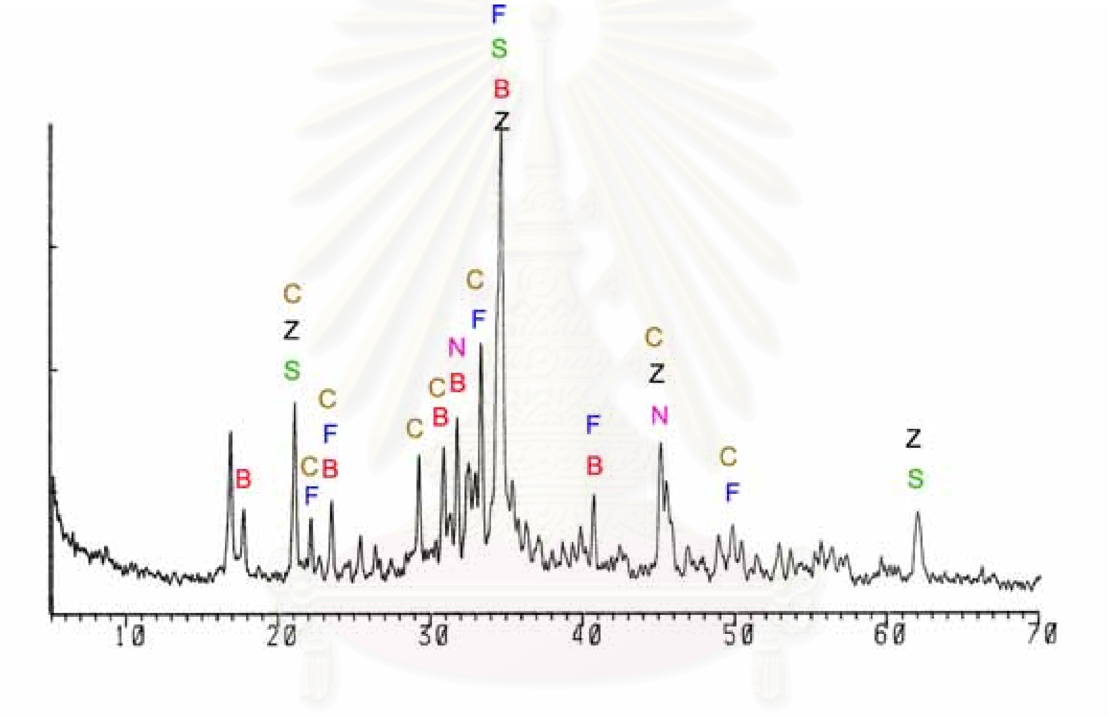
ทองคำ (Au)	**0.11 %**
เงิน (Ag)	**0.29 %**

โซเดียม (Na)	**53.89 %**
ซิลิกอน (Si)	**17.39 %**
คลอรีน (Cl)	**9.18 %**
แคลเซียม (Ca)	**5.95 %**
เหล็ก (Fe)	**5.49 %**
อลูมิเนียม (Al)	**4.42 %**
สังกะสี (Zn)	**0.97 %**
ไททาเนียม (Ti)	**0.84 %**
ซัลเฟอร์ (S)	**0.64 %**
แมกนีเซียม (Mg)	**0.41 %**
โพแทสเซียม (K)	**0.25 %**
ฟอสฟอรัส (P)	**0.17 %**
โครเมียม (Cr)	**0.12 %**
ทองแดง (Cu)	**0.10 %**
เซอโคเนียม (Zr)	**0.04 %**
แมงกานีส (Mn)	**Trace**
สตรอนเทียม (Sr)	**Trace**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ศึกษาสารประกอบในตะกรันทุติยภูมิ โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

ในการศึกษาสารประกอบในตะกรันทุติยภูมิโดยใช้เครื่อง XRD ซึ่งจะทำให้เราทราบข้อมูลที่ต่อเนื่องจากการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบต่างๆของตะกรันทุติยภูมิด้วยเครื่อง XRF ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาด้วยเครื่อง XRD จะบ่งบอกถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นในตะกรันทุติยภูมิ ซึ่งทำให้เราทราบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในตะกรันทุติยภูมิ อยู่ในรูปของสารประกอบอะไรบ้าง เกิดขึ้นได้อย่างไร ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญที่ใช้ประกอบการพิจารณาเลือกกระบวนการที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าเพื่อที่จะเสนอแนะแนวทางการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าประเภท ทองคำ เงิน ในตะกรันทุติยภูมิ ให้ได้ผลอย่างมีประสิทธิภาพและสมบูรณ์ที่สุด



ภาพที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRDของตะกรันทุติยภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* B = Borax – $Na_2B_4O_7.10H_2O$

* S = Sodium Aluminum Silicate – $NaAlSiO_4$

* F = Hematite – Fe_2O_3

* Z = Sodium Zinc Silicate – $NaZnSiO_4$

* N = Sodium Chloride – NaCl

* C = Calcium Silicate – Ca_2SiO_4

จากการทดลองศึกษาวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นในตะกรันทุติยภูมิ โดยใช้ XRD พบว่าในตะกรันทุติยภูมิเป็นสารประกอบจำพวก Borax ($Na_2B_4O_7.10H_2O$), Sodium Aluminum Silicate ($NaAlSiO_4$), Sodium Zinc Silicate (Na1.625Zn0.125Si1.1875O_4), Calcium Silicate (Ca_2SiO_4), และสารประกอบพวก Iron Oxide (Fe_2O_3) ซึ่งสารประกอบดังกล่าวที่พบทั้งหมดล้วนเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นจาก Flux ที่เติมเข้าไปในกระบวนการ เพื่อทำการแยกโลหะมลทินและช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากการระเหยและธาตุบางชนิดที่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ ตั้งต้นดังนั้นจึงทำให้สารประกอบที่พบในตะกรันทุติยภูมิ เป็นสารประกอบที่ได้จาก Flux จำพวก Borax($Na_2B_4O_7.10H_2O$), SiO_2, Soda Ash(Na_2CO_3), CaO ฯลฯ ปะปนอยู่กับสารตั้งต้น ที่เติมเข้าไปทำปฏิกิริยากันนั่นเอง

4.3 การศึกษาโครงจุลภาคของตะกรันทุติยภูมิ

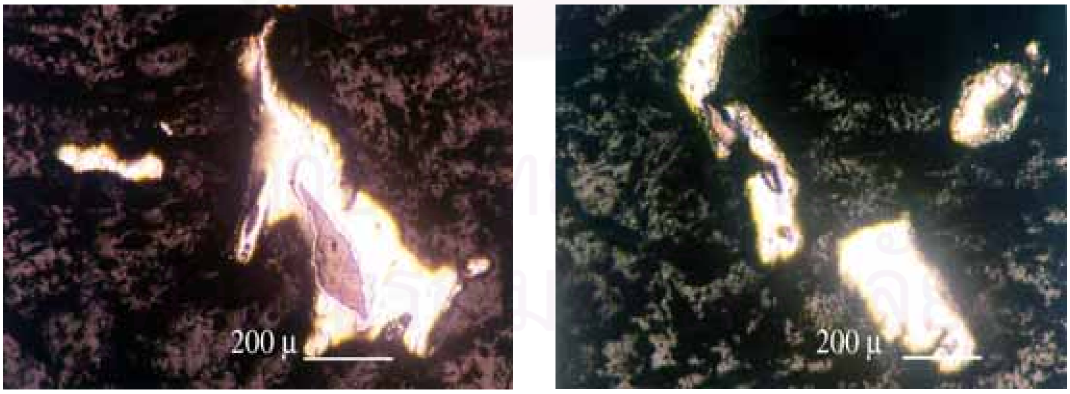
การศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบต่างๆของตะกรันทุติยภูมิ โดยโครงสร้างจุลภาคจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties) และคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) โดยโครงสร้างจุลภาคจะบ่งบอกถึง ขนาดและรูปร่างลักษณะของเกรนหรือผลึก (Grain & Crystallites) ลักษณะการเกิดและอยู่ร่วมกันของโลหะมีค่า ธาตุองค์ประกอบอื่นๆ ปริมาณสารมลทิน ลักษณะของโครงสร้างและการกระจายตัวของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ ซึ่งรวมถึงการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อเสนอแนะแนวทางการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิต่อไป

โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีที่ถูกต้องและเหมาะสม เมื่อขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์จะให้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำ ในขณะที่ตัวอย่างที่ถูกเตรียมอย่างผิดวิธีหรือไม่เหมาะสมจะทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลทำให้เกิดความล้มเหลวและความเข้าใจที่ผิดพลาดในผลการทดลอง

4.3.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Reflected Optical Microscope)

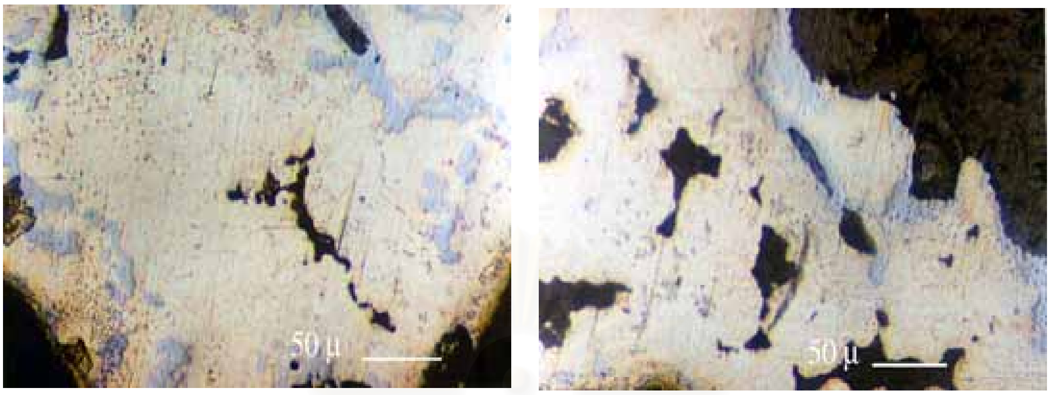
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 50 เท่า ภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่แทรกตัวอยู่ในตะกรันทุติยภูมิ ซึ่งมีโซเดียมเป็นองค์ประกอบหลัก ถ้าพิจารณาโดยใช้กำลังขยายที่เพิ่มขึ้นที่กำลังขยาย 200 เท่า ภาพที่ 4.3 สิ่งที่สังเกตพบในบริเวณพื้นที่ของโลหะมีค่า คือ มีการกระจายตัวของเหล็กอยู่ในพื้นที่ของโลหะมีค่าซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นเฟสสีเทาที่แยกตัวออกมาอย่างเด่นชัดและถ้าพิจารณาโดยใช้กำลังขยายที่เพิ่มขึ้นอีกที่กำลังขยาย 500 เท่า ภาพที่ 4.4 นอกจากเฟสของเหล็กที่แยกตัวให้เห็นอย่างชัดเจนแล้ว สิ่งที่สังเกตพบในบริเวณพื้นที่ของโลหะมีค่าอีก คือ เกิดการแยกตัวออกอีก 2 เฟส อย่างชัดเจนและจาก

การตรวจสอบด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) จะพบว่าโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็นโครงสร้างของ Ag rich-solid solution ซึ่งเป็นเฟสที่มีปริมาณของเงินผสมอยู่มาก และเฟสที่แยกตัวออกจากโครงสร้างของ Ag rich-solid solution นี้เป็นเฟสของ Cu rich-solid solution ซึ่งเป็นเฟสที่มีปริมาณของทองแดงผสมอยู่มากเช่นกัน และถ้าเราพิจารณาที่กำลังขยายที่เพิ่มขึ้นอีกที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ภาพที่ 4.5 สิ่งที่สังเกตพบคือ ลักษณะการเกิดโครงสร้างของชิ้นงาน โดยจะเกิดลักษณะโครงสร้างแบบเดรไดรท์ (Dendritic Structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างปกติที่พบในงานหล่อโลหะผสม โดยโครงสร้างแขนเดนไดรท์หรือโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็นเฟสที่มีเงินสูง (Ag-rich) จะเห็นเป็นสีเหลืองอ่อน ขณะที่บริเวณช่องว่างระหว่างเดนไดรท์จะเป็นเฟสที่มี ทองแดงสูง(Cu-rich)ซึ่งจะเห็นเป็นสีแดงเข้ม การเกิดลักษณะนี้เกิดเนื่องจากการแข็งของโลหะผสมอยู่ในสภาพที่ไม่สมดุล เพราะการเย็นตัวในแบบหล่อจะมีอัตราการเย็นตัวสูงและไม่ใช่อยู่ในสภาวะสมดุล โดยการเกิดผลึกในสภาวะไม่สมดุล คือ การเกิดผลึกจากโลหะหลอมเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสมดุล ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วในโลหะหลอมเหลว (Supercooled) ทำให้การแพร่ (Diffusion) ของธาตุผสมในผลึกของโลหะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และส่งผลทำให้ผลึกที่เกิดขึ้น จะมีความเข้มข้นของส่วนผสมแตกต่างกันเป็นชั้นๆ โดยสภาวะไม่สมดุลเส้นการแข็งสมบูรณ์ (Solidus Line) ที่เกิดขึ้นใหม่จะต่ำกว่าเส้นการแข็งสมบูรณ์ที่เกิดจากสภาวะสมดุล การเกิดผลึกของสารละลายของแข็งที่สภาวะไม่สมดุลจะมีผลต่อผลึกของแข็งที่จะกลายเป็นเดนไดรท์ โดยกิ่งก้านของเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะมีปริมาณส่วนผสมของธาตุผสมต่ำกว่ากิ่งก้านเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ



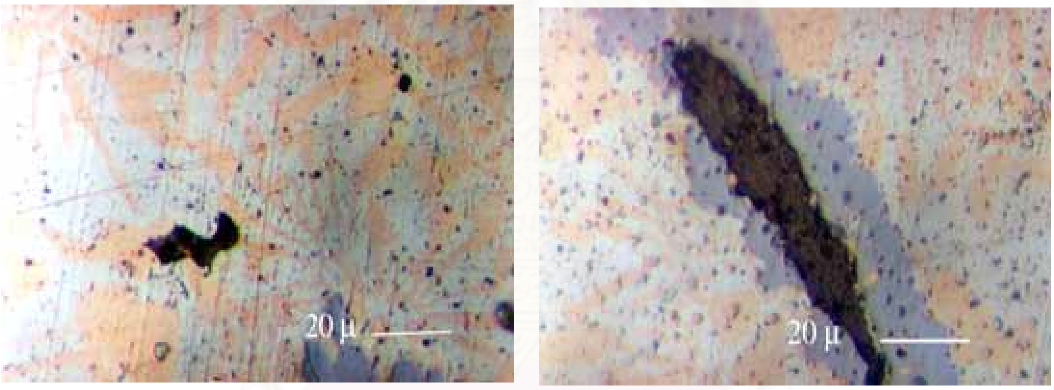
(A) (B)

ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า



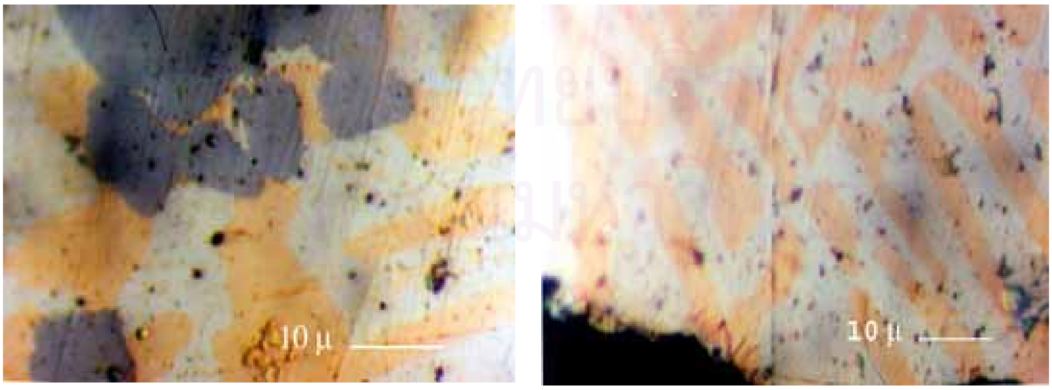
(A) (B)

ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า



(A) (B)

ภาพที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า



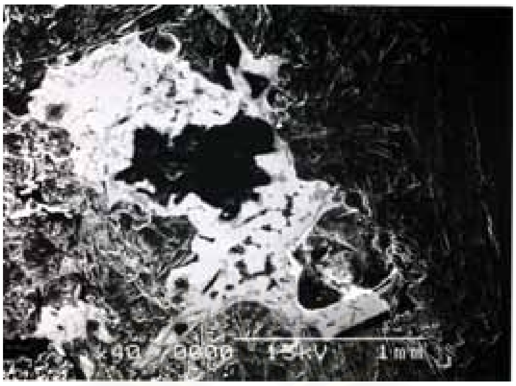
(A) (B)

ภาพที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

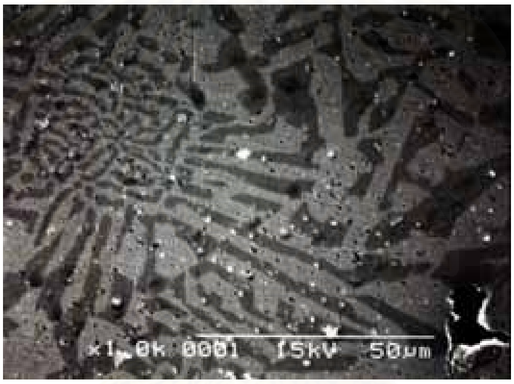
4.3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 40, 1000, 1500 และ4000 เท่า พบว่าผลการตรวจสอบ คือ บริเวณพื้นที่ที่มีเป็นโลหะมีค่าผสมอยู่ จะมีการกระจายตัวของเหล็กอยู่ในพื้นที่นั้นๆ ภาพที่ 4.8 ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นเฟสสีดำเข้มที่แยกตัวออกมาอย่างเด่นชัด และนอกจากเฟสของเหล็กที่แยกตัวออกให้เห็นอย่างเด่นชัดแล้ว สิ่งที่สังเกตพบในบริเวณพื้นที่ของโลหะมีค่าอีก คือ เกิดการแยกตัวออกเป็น 2 เฟสอย่างเด่นชัด ภาพที่ 4.7 และจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง EDX จะพบว่าโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็นโครงสร้างของ Ag rich–solid solution เป็นเฟสที่มีปริมาณของเงินผสมอยู่มาก และเฟสที่แยกออกมาจากเฟส Ag rich-solid solution นี้ เป็นเฟสของ Cu rich-solid solution ซึ่งเป็นเฟสที่มีปริมาณของทองแดงผสมอยู่มาก เช่นกัน และถ้าพิจารณา ภาพที่ 4.9 สิ่งที่สังเกตพบ คือ ลักษณะโครงสร้างแบบเดนไดรท์ (Dendritic Structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างปกติที่พบในงานหล่อโลหะผสม โดยโครงสร้างแขนเดนไดรท์หรือโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็นเฟสที่มีเงินสูง(Ag-rich)จะเห็นเป็นสีอ่อนกว่าบริเวณช่องว่างระหว่างเดนไดรท์ซึ่งจะเป็นเฟสที่มี ทองแดงสูง(Cu-rich)โดยจะเห็นเป็นสีเข้มกว่า การเกิดลักษณะนี้เกิดเนื่องจากการแข็งของโลหะผสมอยู่ในสภาพที่ไม่สมดุล เพราะการเย็นตัวในแบบหล่อจะมีอัตราการเย็นตัวสูงและไม่ใช่อยู่ในสภาวะสมดุลโดยการเกิดผลึกในสภาวะไม่สมดุล คือ การเกิดผลึกจากโลหะหลอมเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสมดุล ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วในโลหะหลอมเหลว (Supercooled) ทำให้การแพร่ (Diffusion) ของธาตุผสมในผลึกของโลหะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และส่งผลทำให้ผลึกที่เกิดขึ้น จะมีความเข้มข้นของส่วนผสมแตกต่างกันเป็นชั้นๆ โดยสภาวะไม่สมดุลเส้นการแข็งสมบูรณ์ (Solidus Line) ที่เกิดขึ้นใหม่จะต่ำกว่าเส้นการแข็งสมบูรณ์ที่เกิดจากสภาวะสมดุล การเกิดผลึกของสารละลายของแข็งที่สภาวะไม่สมดุลจะมีผลต่อผลึกของแข็งที่จะกลายเป็นเดนไดรท์ โดยกิ่งก้านของเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะมีปริมาณส่วนผสมของธาตุผสมต่ำกว่ากิ่งก้านเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

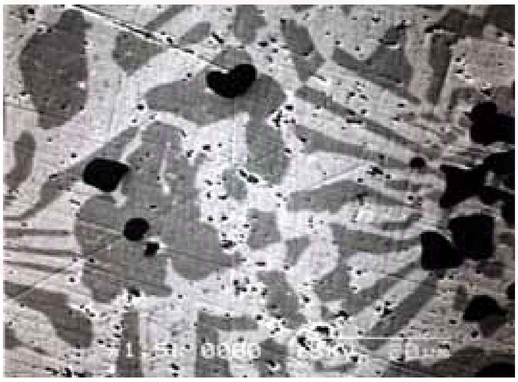
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



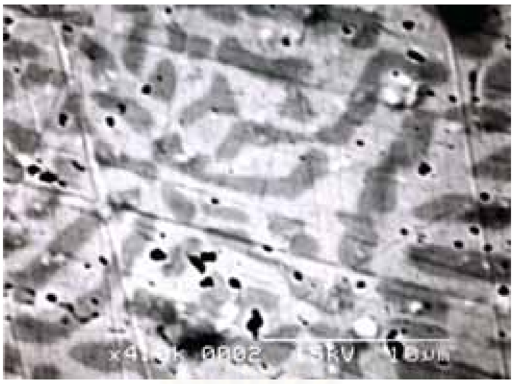
ภาพที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 40 เท่า



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 4,000 เท่า

4.3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray (EDX)

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray (EDX) ในบริเวณพื้นที่ของโลหะผสม ซึ่งผลการตรวจสอบแสดงให้ทราบถึงปริมาณธาตุในบริเวณเฟสต่างๆ ที่พบ ถ้าพิจารณา ภาพที่ 4.10 บริเวณที่ตรวจสอบ คือ บริเวณของเฟสที่มีทองแดงมาก (Cu-rich phase) ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่า

มีปริมาณทองแดง	57.25	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณทองคำ	34.02	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณเงิน	7.71	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณเหล็ก	0.74	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ถ้าพิจารณา ภาพที่ 4.12 บริเวณที่ตรวจสอบ คือ บริเวณของเฟสที่มีเงินอยู่มาก (Ag-rich phase) ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่า

มีปริมาณทองแดง	7.56	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณทองคำ	15.44	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณเงิน	76.31	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณเหล็ก	0.69	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ถ้าพิจารณา ภาพที่ 4.14 บริเวณที่ตรวจสอบ คือ บริเวณของเฟสที่มีเหล็กอยู่มาก (Fe-rich phase) ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่า

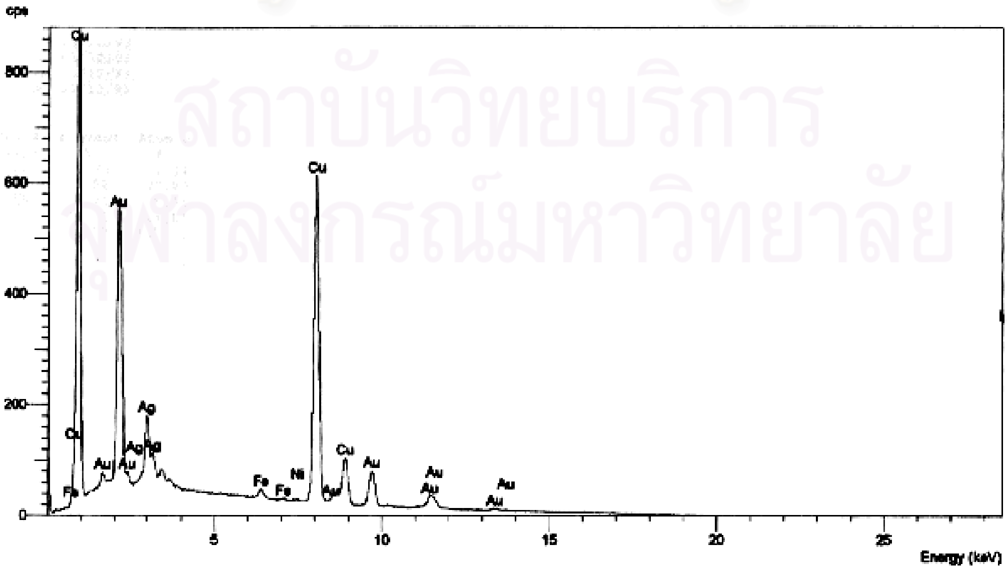
มีปริมาณทองแดง	3.20	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณทองคำ	0.73	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณเงิน	2.25	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
มีปริมาณเหล็ก	93.82	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า บริเวณพื้นที่เฟสสีเทา เป็นพื้นที่เฟสของโลหะผสมที่มีปริมาณของทองแดงผสมอยู่มากซึ่งสามารถเรียกได้ว่าเป็น Cu rich-solid solution หรือบริเวณเฟสที่มีทองแดงผสมอยู่มาก ส่วนบริเวณพื้นที่เฟสสีขาว เป็นพื้นที่เฟสของโลหะผสมที่มีปริมาณของเงินผสมอยู่มากซึ่งสามารถเรียกได้ว่าเป็น Ag rich-solid solution หรือบริเวณเฟสที่มีเงินผสมอยู่มาก ส่วนบริเวณพื้นที่เฟสสีดำ เป็นพื้นที่เฟสของโลหะผสมที่มีปริมาณของเหล็กผสมอยู่มากซึ่งสามารถเรียกได้ว่าเป็น Fe rich-solid solution หรือบริเวณเฟสที่มีเหล็กผสมอยู่มาก โดยอัตราส่วนของโลหะต่างๆในโลหะผสมที่พบในแต่ละเฟสนั้น มีอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสามารถ ในการละลายของโลหะแต่ละชนิดและพฤติกรรมของโลหะผสม ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมนั้นๆ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

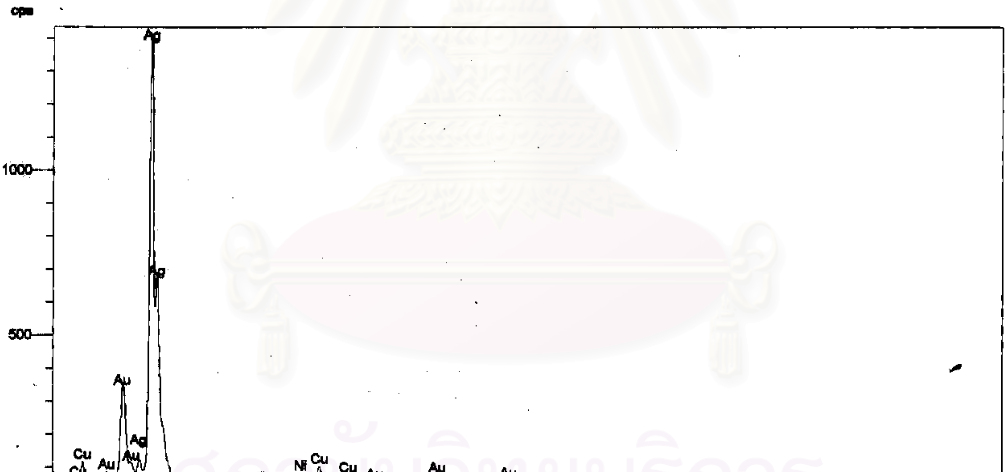
ภาพที่ 4.10 แสดงบริเวณที่ตรวจสอบด้วย EDX

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



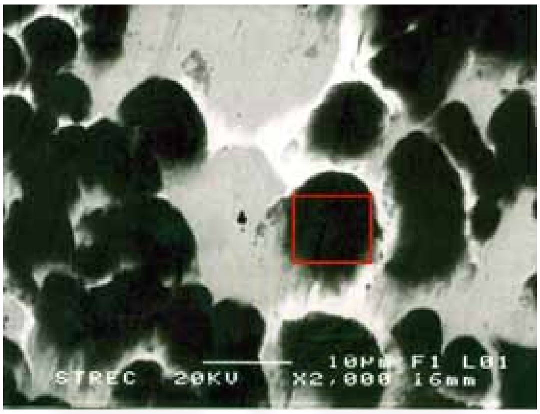
ภาพที่ 4.11 แสดงปริมาณธาตุที่พบในบริเวณที่ตรวจสอบ

ภาพที่ 4.12 แสดงบริเวณที่ตรวจสอบด้วย EDX

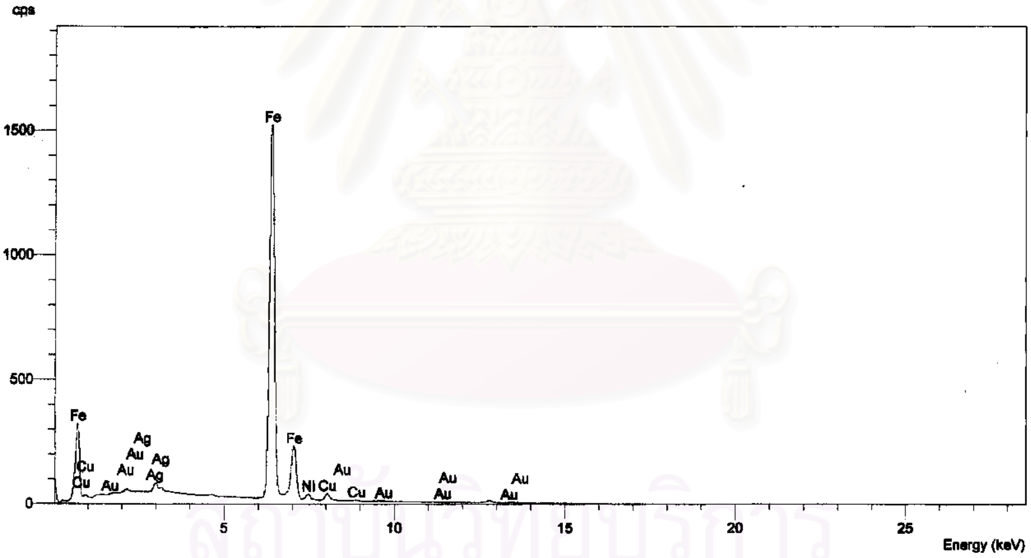


ภาพที่ 4.13 แสดงปริมาณธาตุที่พบในบริเวณที่ตรวจสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

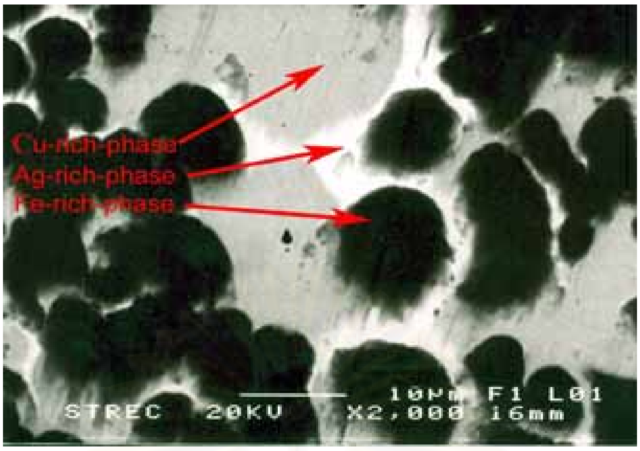


ภาพที่ 4.14 แสดงบริเวณที่ตรวจสอบด้วย EDX



ภาพที่ 4.15 แสดงปริมาณธาตุที่พบในบริเวณที่ตรวจสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.16 แสดงพื้นที่เฟสที่มี ทองแดง เงิน และเหล็กมาก

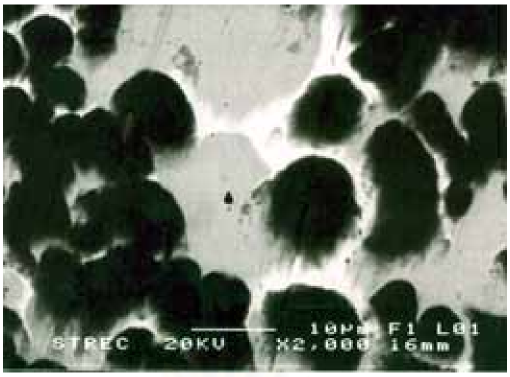
4.3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค การกระจายตัว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้เทคนิค X-Ray Image Mapping (SEM: X-Ray Image Mapping)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การกระจายตัว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้เทคนิค X-Ray Image Mapping นั้น พื้นที่ที่ใช้ในการตรวจสอบคือบริเวณพื้นที่ของโลหะมีค่าที่ ที่แยกออกเป็น 3 เฟส โดยใช้ตัวอย่างเดียวกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 (A) แต่ใช้พื้นที่ที่ต่างกันเพื่อการตรวจสอบได้ครบทุกเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.17

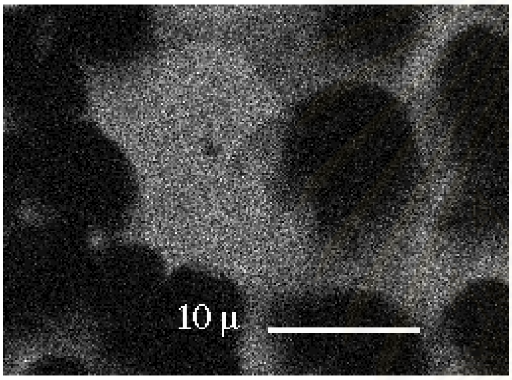
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโดยใช้เทคนิค X-Ray Image Mapping ซึ่งผลการทดลองจะแสดงให้เห็นการกระจายตัวของทองคำ เงิน ทองแดงและ เหล็ก ในโลหะผสมที่แทรกตัวอยู่ในตะกรันทุติยภูมิ โดย รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวรวมกันของเฟสที่มีเหล็กอยู่มาก (Fe-rich) ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นสีดำเข้ม เฟสที่มีทองแดงอยู่มาก (Cu-rich) ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นสีเทา และเฟสที่มีเงินอยู่มาก (Ag-rich) ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นสีขาวและถ้าพิจารณาที่ รูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของทองคำ จะพบว่าทองคำจะกระจายตัวอยู่ในบริเวณของเฟสที่มีทองแดงอยู่มากและบริเวณเฟสที่มีเงินอยู่มาก แต่จะไม่มีทองคำกระจายตัวอยู่ในบริเวณเฟสที่มีเหล็กอยู่มากเลย และถ้าพิจารณาที่ รูปที่ 4.19 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของเงิน จะพบว่าเงินส่วนมากจะกระจายตัวอยู่ในบริเวณเฟสที่มีเงินอยู่มากและมีบางส่วนซึ่งน้อยมากที่กระจายตัวอยู่ในบริเวณเฟสที่มีทองแดงอยู่มาก โดยที่ไม่มีเงินกระจายตัวอยู่เลยในบริเวณเฟสที่มีเหล็กอยู่มากเลยและถ้าพิจารณา รูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของทองแดง จะพบว่าทองแดงส่วนมากจะกระจายตัวอยู่ในบริเวณเฟสที่มีทองแดงมาก และมีบางส่วนซึ่งน้อยมากที่

กระจายตัวอยู่ในบริเวณเฟสที่มีเงินอยู่มาก โดยที่ไม่มีทองแดงกระจายตัวอยู่เลยในบริเวณเฟสที่มีเหล็กอยู่มากเลย และถ้าพิจารณารูปที่ 4.21 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของเหล็ก จะพบว่าเหล็กมีการกระจายตัวอยู่เฉพาะในบริเวณเฟสที่มีเหล็กอยู่มาก และไม่มีเหล็กกระจายตัวอยู่ในเฟสที่มีทองแดงอยู่มากและเฟสที่มีเงินอยู่มากเลย และจากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า โลหะผสมที่แทรกตัวอยู่ในตะกรันทุติยภูมิ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนพื้นที่ที่เป็นโลหะผสมสารละลายของแข็ง 3 ธาตุ ได้แก่ ทองคำ เงิน ทองแดง และส่วนพื้นที่ที่เป็นโลหะผสมของเหล็กโดยมีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและถ้าพิจารณาส่วนพื้นที่ที่เป็นโลหะผสมสารละลายของแข็ง 3 ธาตุ จะพบว่า ทองคำจะกระจายตัวอยู่ได้ดีทั้งในเฟสที่มีเงินอยู่มากและเฟสที่มีทองแดงอยู่มาก แต่มีเงินและทองแดงปริมาณที่น้อยมากที่กระจายตัวอยู่ร่วมกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบ เงิน-ทองแดง ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าโลหะผสมทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถเกิดการละลายในสภาวะของแข็งแบบสมบูรณ์ แม้ว่าโลหะทั้งสองระบบโครงสร้างผลึกเป็นแบบเดียวกัน (FCC) โดยที่โครงสร้างผลึกของเงินสามารถรองรับอะตอมของทองแดงได้ในปริมาณที่น้อย และในขณะเดียวกันความสามารถในการละลายก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 779°C ปริมาณของทองแดงที่สามารถละลายในเงินจะเพิ่มขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับปริมาณทองแดง 8.8 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในขณะเดียวกันปรากฏการณ์เดียวกันนี้ก็เกิดขึ้นกับการละลายของเงินในทองแดงโดยเกิดขึ้นสูงสุดที่ปริมาณของเงิน 7.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสารละลายของแข็งทั้ง 2 ดังกล่าวจะถูกจัดเป็น สารละลายของแข็งชนิดละลายได้บางส่วน (Partial Solid Solution)

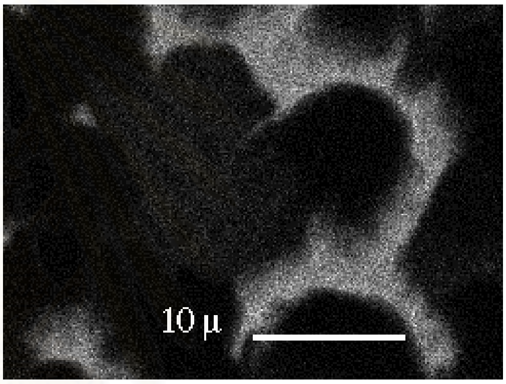
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



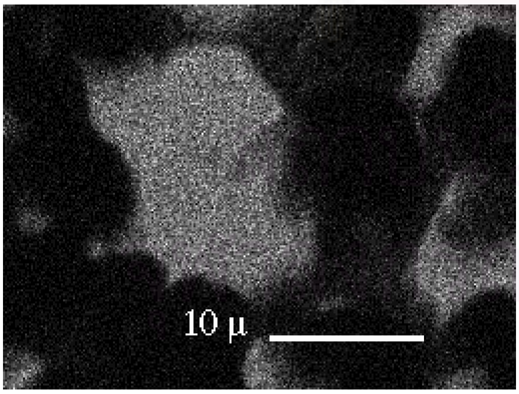
ภาพที่ 4.17 แสดงภาพรวมของกระจายตัวของทองคำ เงิน เหล็ก และ ทองแดง



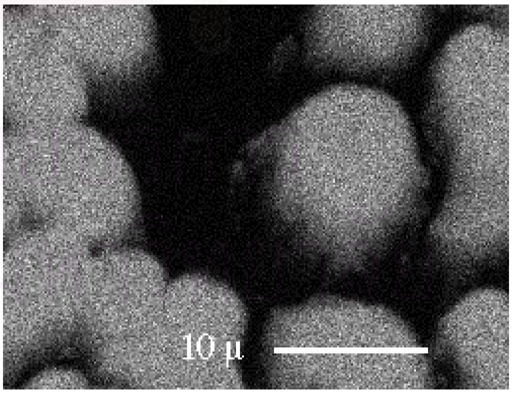
ภาพที่ 4.18 แสดงการกระจายตัวของทองคำ



ภาพที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของเงิน



ภาพที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของทองแดง



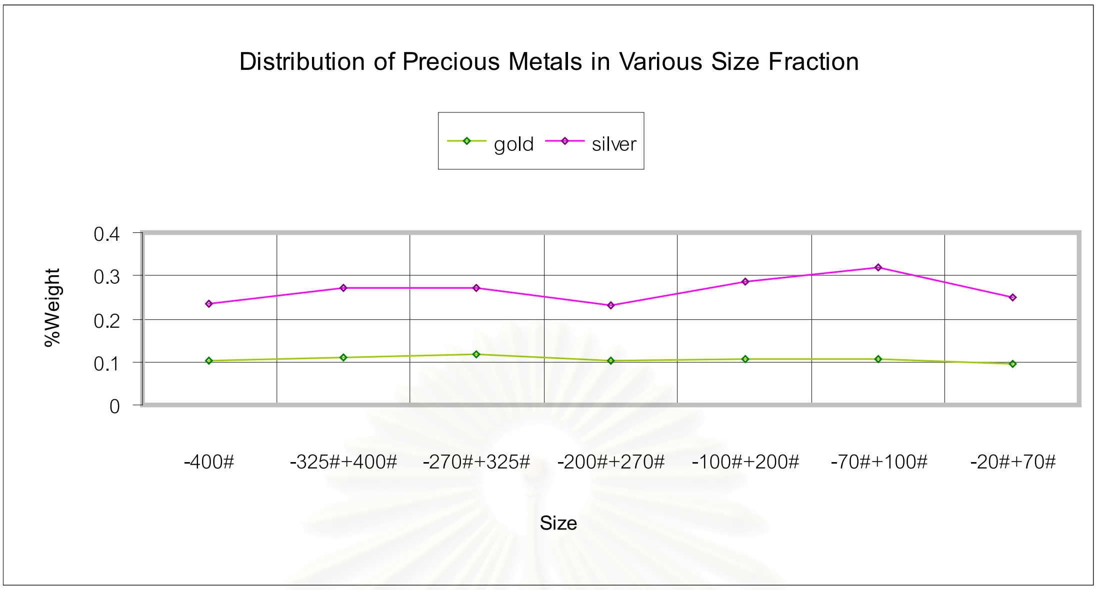
ภาพที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของเหล็ก

4.4 การศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

จุดประสงค์ของการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่อนุภาคต่างๆนั้น เพื่อที่จะทำให้ทราบถึงปริมาณของโลหะมีค่าที่มีอยู่ในขนาดอนุภาคต่างๆหลังทำการบดย่อยและคัดขนาดแล้ว ซึ่งการศึกษาดังกล่าวจะช่วยในการคัดเลือกขนาดอนุภาคที่เหมาะสม ที่จะนำอนุภาคที่ขนาดนั้นๆเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่ที่เหมาะสมเพื่อที่จะเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการนำอนุภาคที่เหมาะสมเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่เพื่อที่จะเก็บกลับคืนนั้น จะช่วยให้สามารถลดขั้นตอนและพลังงานที่ต้องสูญเสียโดยไม่จำเป็น อันเนื่องมาจากไม่มีการคัดเลือกขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการ ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจะสามารถช่วยทำให้ลดต้นทุนในการแต่งแร่ลดลงและยังช่วยให้ประสิทธิภาพในการแต่งแร่มีสูงขึ้นอีกด้วย

จากการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆ (Particle Size Distribution) พบว่า โลหะมีค่าประเภททองคำมีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวที่สม่ำเสมอที่ประมาณ 0.11% ที่ทุกขนาดอนุภาค ส่วนโลหะมีค่าประเภทเงินก็มีลักษณะเช่นเดียวกันคือมีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวที่สม่ำเสมอที่ประมาณ 0.27% ที่ทุกขนาดอนุภาคเช่นกัน ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวนี้สามารถสรุปผลได้ว่า ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับที่จะนำเข้าสู่กระบวนการเก็บกลับคืนได้ต่อไปคือ ทุกขนาดอนุภาคสามารถนำเข้าสู่กระบวนการเก็บกลับคืนได้ เนื่องจากทุกขนาดอนุภาคมีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของโลหะมีค่าในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่จำเป็นต้องคัดขนาดอนุภาคใดทิ้ง แต่ในกระบวนการแต่งแร่เพื่อการเก็บกลับคืนนั้น จำเป็นต้องคัดขนาดอนุภาคเฉพาะให้เหมาะสมกับอุปกรณ์และกระบวนการแต่งแร่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาต่อไปเพื่อหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสม โดยอาจจะใช้การศึกษาอย่างอื่นเข้ามาประกอบการพิจารณาการคัดเลือกขนาดอนุภาคที่เหมาะสม เช่น การคัดขนาดเพื่อหาโลหะมีค่าที่แยกตัวเป็นอิสระจากมลทินที่ขนาดอนุภาคต่างๆ โดยการศึกษาดังกล่าวประกอบด้วยจะช่วยให้สามารถคัดเลือกขนาดอนุภาคที่เหมาะสมเข้าสู่กระกระบวนการแต่งแร่เพื่อการเก็บกลับคืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 แสดงการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

SIZE	GOLD (Au)	SILVER (Ag)
-400#	0.10%	0.24%
-325#+400#	0.11%	0.27%
-270#+325#	0.12%	0.27%
-200#+270#	0.10%	0.23%
-100#+200#	0.10%	0.29%
-70#+100#	0.10%	0.32%
-20#+70#	0.09%	0.25%

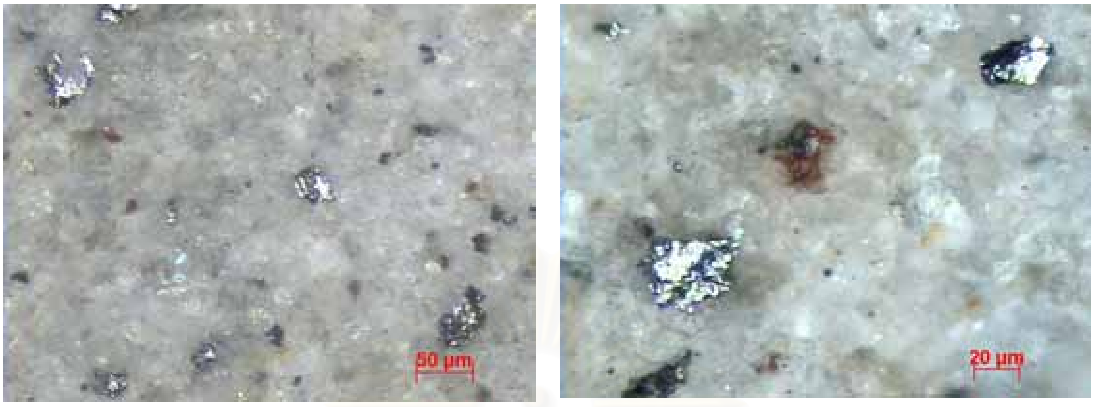
ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

4.5 การศึกษาโลหะมีค่าที่แยกตัวเป็นอิสระจากมลทินที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

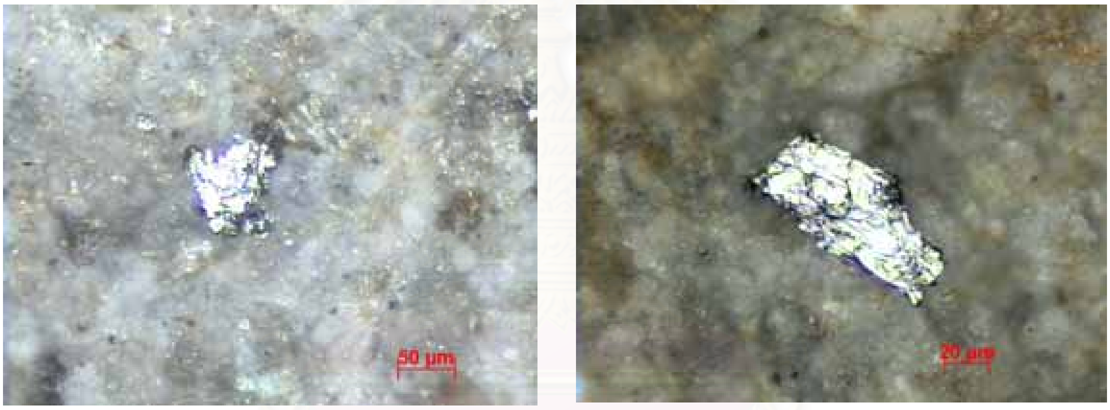
สิ่งที่เป็นจุดประสงค์หลักของการศึกษาโลหะมีค่าที่แยกตัวเป็นอิสระจากมลทินที่ขนาดอนุภาคต่างๆนั้น (Size Liberation) เพื่อต้องการทราบว่าโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิที่สามารถแยกตัวเป็นอิสระออกจากมลทินนั้น มีขนาดอนุภาคเท่าไร ซึ่งการศึกษาดังกล่าวจะช่วยให้สามารถคัดเลือกอนุภาคที่เหมาะสม ที่จะนำอนุภาคที่ขนาดนั้นๆเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่ที่เหมาะสมเพื่อที่จะเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการที่เม็ดแร่ยังไม่หลุดออกจากมลทิน ซึ่งเรียกว่า แร่คละ (Midding) จะต้องนำไปบดหรือแต่งซ้ำใหม่ การที่แร่ยังติดอยู่กับมลทินนี้ ทำให้ประสิทธิภาพในการแต่งแร่ลดลง แต่หากทำการบดแร่ให้ละเอียดมากจนเกินไป (Overgrinding) อาจทำให้กระบวนการแยกแร่ด้วยขบวนการทางฟิสิกส์เกิดการเก็บแร่ (Recovery) ได้น้อยลง ดังนั้นการบดตะกรันทุติยภูมิให้มีขนาดที่เหมาะสม (Optimum Mesh of Grind) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการแต่งแร่เพื่อเก็บกลับคืนโลหะมีค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากการศึกษาโลหะมีค่าที่แยกตัวเป็นอิสระจากมลทินที่ขนาดอนุภาคต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 200 เท่า นั้น พบว่า โลหะมีค่าเริ่มแยกตัวเป็นอิสระจากมลทินที่ขนาดอนุภาค 70 เมช ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.28 ในขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 70 เมช จะสังเกตเห็นว่ามีโลหะมีค่าซึ่งเห็นเป็นสีเหลืองแทรกตัวอยู่ในมลทินซึ่งเป็นเหล็กและสารประกอบจำพวกซิลิเกตมีสีดำ ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.29 จากการทดลองดังกล่าว ประกอบกับการทดลองการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าที่ขนาดอนุภาคต่างๆ ทำให้สามารถทราบได้ถึงขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่เพื่อการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

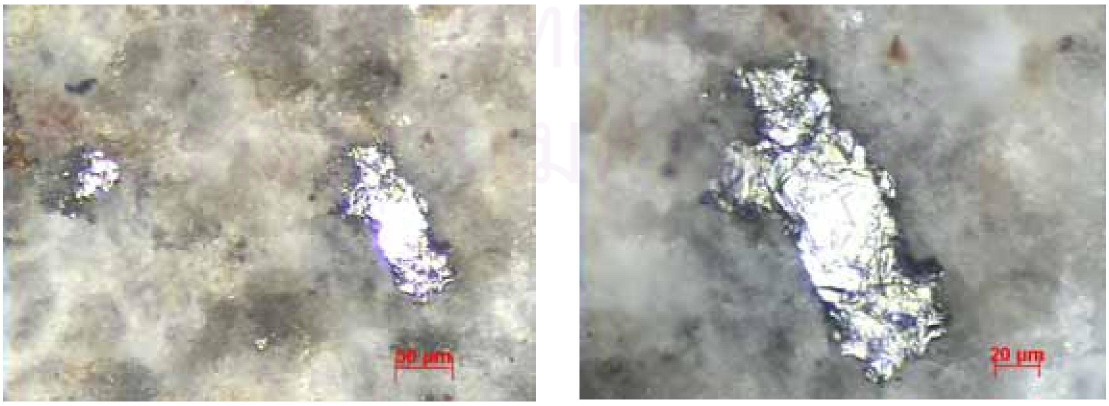
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



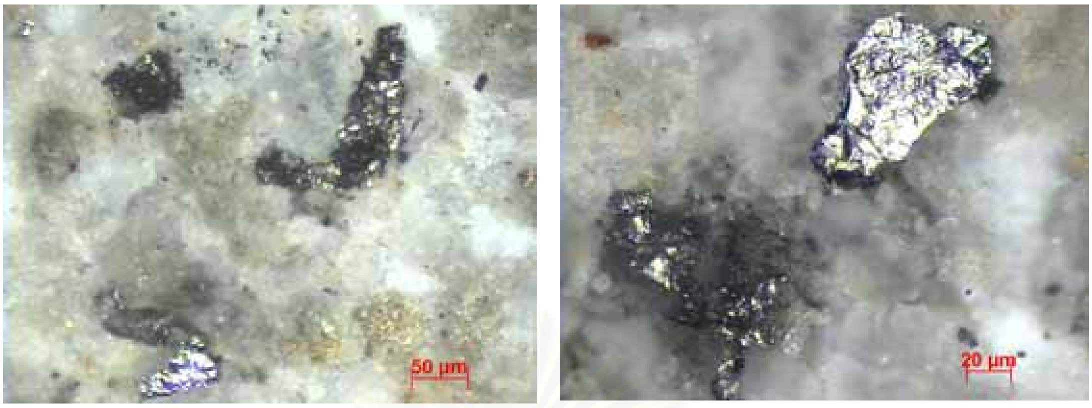
รูปที่ 4.23 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -400# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า



รูปที่ 4.24 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -325#+400# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า

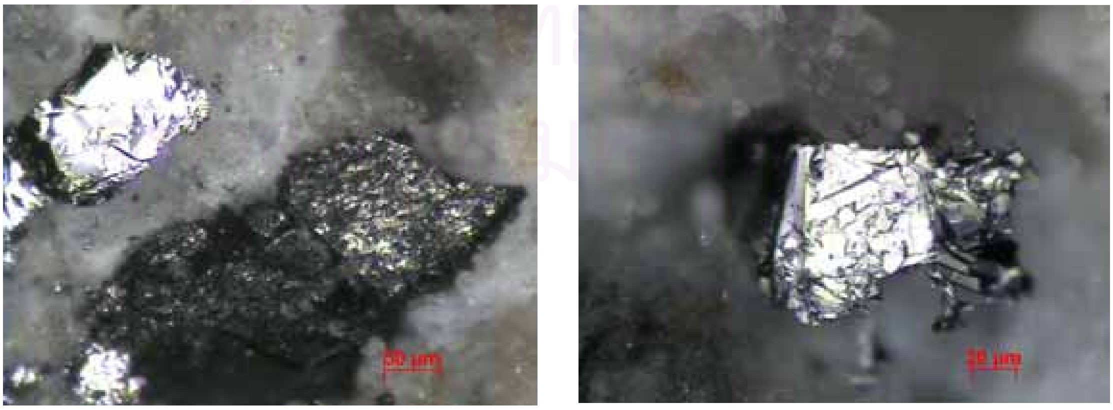


รูปที่ 4.25 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -270#+325# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า

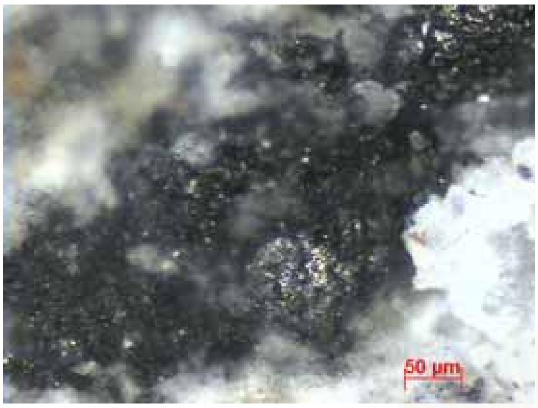


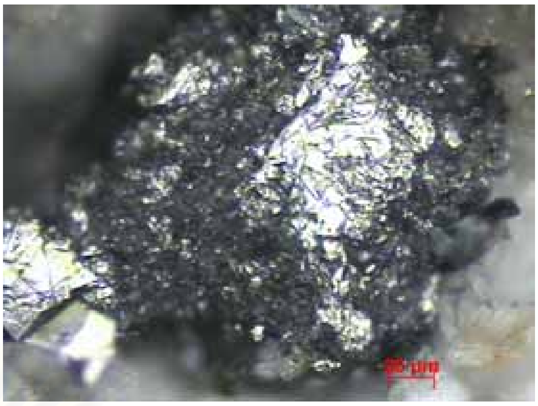
รูปที่ 4.26 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -200#+270#ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า

รูปที่ 4.27 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -100#+200# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า



รูปที่ 4.28 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -70#+100# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า





รูปที่ 4.29 แสดงภาพโลหะมีค่าขนาดอนุภาค -20#+70# ที่กำลังขยาย 100 และ200 เท่า

4.6 การศึกษาการละลายน้ำของตะกรันทุติยภูมิเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณโลหะมีค่า

เนื่องจากผลของการศึกษาองค์ประกอบของตะกรันทุติยภูมิ ด้วยวิธี เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (X-Ray Diffraction: XRD) พบว่าในตะกรันทุติยภูมินอกเหนือจากโลหะมีค่าและสารประกอบจำพวกซิลิเกตแล้ว องค์ประกอบที่เหลือส่วนใหญ่เป็นสารประกอบจำพวก Borax ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)อีกเล็กน้อย ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ดังนั้น การศึกษาอัตราการละลายน้ำของตะกรันทุติยภูมิ จึงเป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าในตะกรันทุติภูมิ การศึกษาดังกล่าวมีจุดประสงค์เพื่อ หาอัตราการละลายของตะกรันทุติยภูมิ ในการละลายสารประกอบจำพวก Borax ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการออกไป โดยใช้เวลาและปริมาณของน้ำที่เหมาะสม ก่อนเข้าสู่กระบวนการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่า ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเข้มข้นของโลหะมีค่า ทำให้ประสิทธิภาพในการแต่งแร่สูงขึ้น

ขั้นตอนการศึกษาได้ดำเนินการดังนี้

(1) การหาปริมาณการละลายมากที่สุดของตะกรันทุติยภูมิ

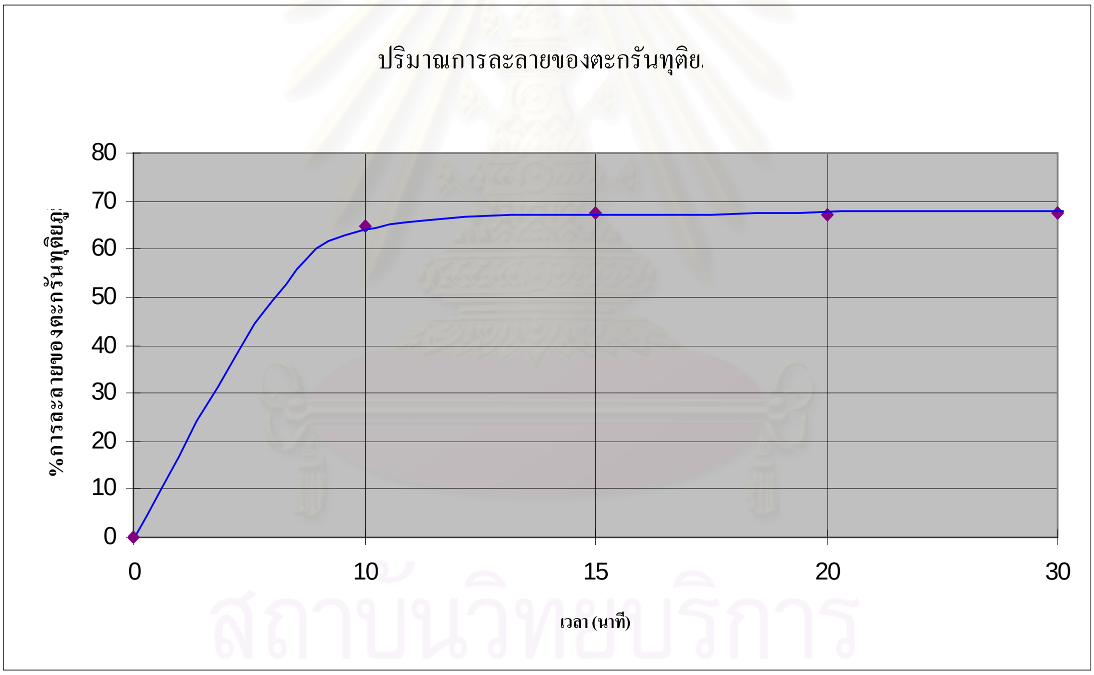
- การทดลองทำโดยนำตะกรันทุติยภูมิ 50 กรัม ละลายในน้ำที่มากเกินพอ อย่างน้อยไม่น้อยกว่าปริมาณน้ำที่ต้องการ เมื่อพิจารณาจากความสามารถในการละลายของ Borax และ NaCl เป็นเวลาที่แตกต่างกัน เมื่อถึงเวลาที่กำหนดให้รินน้ำออกแล้วนำส่วนที่เหลือไปอบให้แห้งก่อนน้ำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณของตะกรันทุติยภูมิที่หายไป

(2) ศึกษาปริมาณน้ำและปริมาณการละลายของ Borax และ NaCl

- โดยนำจำนวน Borax ที่ละลายไปจากการทดลองแรก มาคำนวณจากหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมได้จากตารางแสดงความสามารถในการละลายของ Borax ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาอัตราการละลายน้ำของตะกรันทุติยภูมิจะพบว่า ปริมาณการละลายของตะกรันทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ปริมาณการละลายจะเริ่มคงที่ประมาณ 67.5% ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.30 ตะกรันทุติยภูมิสามารถละลายในน้ำได้สมบูรณ์โดยรวดเร็ว ในเวลาประมาณ 15 นาที และจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและปริมาณการละลายของตะกรันทุติยภูมิ โดยใช้วิธีคำนวณจากความสามารถในการละลายของ Borax และ NaCl ในน้ำพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการทำละลายตะกรันทุติยภูมิ คือ น้ำ 550 มิลลิลิตร ต่อตะกรันทุติยภูมิ 50 กรัม หรือปริมาณน้ำ 11 เท่า ของน้ำหนักตะกรันทุติยภูมิ

การละลายน้ำจะทำให้สามารถเพิ่ม ความเข้มข้นของปริมาณโลหะมีค่า ในตะกรันทุติยภูมิขึ้นประมาณ 3-4 เท่า ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเก็บกลับคืน ซึ่งจะทำให้กระบวนการเก็บกลับคืนทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการละลายของตะกรันทุติยภูมิ

เวลา(นาที)	ปริมาณคงเหลือ(กรัม)	ปริมาณที่ละลาย(กรัม)	เปอร์เซ็นต์การละลาย
0	50	0	0%
10	17.65	32.35	64.7%
15	16.21	33.79	67.6%
20	16.35	33.65	67.3%
30	16.19	33.81	67.6%

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการละลายของตะกรันทุติยภูมิ

จากตารางที่ 4.4 พบว่าความสามารถในการละลายของ Borax และ NaCl ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เท่ากับ 5.8 เปอร์เซ็นต์ และ 35.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังนั้น สามารถคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ละลาย Borax และ NaCl ออกจากตะกรันทุติยภูมิ 50 กรัม ซึ่งมี Borax และ NaCl อยู่ประมาณ 33.8 กรัม ได้ดังนี้

คำนวณปริมาณน้ำโดยคิดจากความสามารถในการละลายน้ำของ Borax ซึ่งมีมากกว่า NaCl อยู่มากเป็นหลัก เท่ากับ 550 มิลลิลิตร

ตารางที่ 4.4 แสดงความสามารถในการละลายของ Borax และ NaClในน้ำ

Temperature °C	Borax ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) percent by weight	Sodium Chloride(NaCl) percent by weight
0	1.99	26.30
5	2.46	26.30
10	3.09	26.30
15	3.79	26.30
20	4.71	26.30
25	5.80	26.30
30	7.20	26.30
35	9.02	26.30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Temperature °C	Borax ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) percent by weight	Sodium Chloride(NaCl) percent by weight
40	11.22	26.30
45	14.22	26.30
50	17.91	26.30
55	23.22	26.30
60	30.33	26.30
65	33.89	26.30
70	36.94	26.30
75	40.18	26.30
80	44.31	26.30
85	48.52	26.30
90	53.18	26.30
95	58.95	26.30
100	65.64	26.30

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) แสดงความสามารถในการละลายของ Borax และ NaClในน้ำ

4.7 แนวทางและวิธีการที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าจากตะกรันทุติยภูมิ

ขั้นตอนนี้เป็นการประเมินผลที่ได้จากการค้นคว้าทดลองข้างต้นทั้งหมด เพื่อที่จะเสนอแนะแนวทางวิธีการที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่า ที่ได้จากตะกรันทุติยภูมิ

จากผลการศึกษาองค์ประกอบของตะกรันทุติยภูมิด้วยวิธี X-Ray Diffraction พบว่าตะกรันทุติยภูมิ มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นโลหะมีค่าประเภท ทองคำ เงิน ส่วนที่เป็น สารประกอบจำพวก Borax ($10H_2O.Na_2B_4O_7$) เกลือ NaCl และส่วนของสารประกอบจำพวกซิลิเกต โดยส่วนที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ โลหะมีค่า และสารประกอบจำพวกซิลิเกต ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้มีความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันมาก ทองคำ มีค่าความถ่วงจำเพาะ(Specific Gravity)เท่ากับ 19.3 และเงินเท่ากับ 12 และสารประกอบจำพวกซิลิเกตมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ในช่วง 2.5-3 จากการศึกษาการแยกตัวเป็นอิสระจากมลทินที่ขนาดอนุภาคที่ต่างๆกัน (Particle Size Liberation)พบว่า โลหะมีค่าเริ่มแยกตัวเป็นอิสระที่ขนาดอนุภาคประมาณ 70 เมช ดังนั้น วิธีขั้นต้นที่จะใช้ในการเก็บกลับคืน ได้แก่ การละลายด้วยน้ำ และการใช้โต๊ะสั่น (Shaking Table)

การทดลองเก็บกลับคืนโดยใช้โต๊ะสั่นเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ ดำเนินการดังนี้

1. นำตะกรันทุติยภูมิมาลดขนาด โดยการย่อย (Crushing) ด้วยเครื่องย่อยแบบฆ้อน (Hammer Mill) ให้มีขนาด -70 เมช

2. นำตะกรันทุติยภูมิที่มีขนาด -70 เมช ไปละลายในน้ำโดยใช้อัตราส่วนตะกรันทุติยภูมิ 1 กรัม ต่อน้ำ 11 มิลลิลิตร เป็นเวลาประมาณ 15 นาที

3. นำส่วนที่เหลือจากการละลาย เข้าสู่กระบวนการเก็บกลับคืนโดยใช้โต๊ะสั่น (Shaking Table) โดยปรับอัตราการไหลของน้ำ ความเอียงของพื้นโต๊ะ ความเร็วของจังหวะชัก ความยาวช่วงชัก ที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บกลับคืนส่วนที่หนักกว่า

4.7.1 ผลการศึกษาการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิขั้นต้นโดยใช้โต๊ะสั่น

จากตะกรันทุติยภูมิที่ป้อนเข้ากระบวนการ 5000 กรัมหลังจากละลายด้วยน้ำแล้ว จะมีส่วนที่เหลือไม่ละลายน้ำ 1,644 กรัม คิดเป็น 32.9% ของตะกรันที่ป้อนเข้าทั้งหมด ดังนั้น ความเข้มข้นของทองคำในส่วนที่เหลือจากการคำนวณจะเพิ่มขึ้นจาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ เป็น 0.33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำส่วนที่เหลือทั้งหมดผ่านการแยกโดยโต๊ะสั่นที่ปรับตัวแปรในการทำงานให้เหมาะสมจนได้ ส่วนหนัก ส่วนคละ และส่วนเบา และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ ทองคำ จะพบว่าปริมาณการเก็บกลับคืนโลหะมีค่า ทองคำในส่วนหนัก เท่ากับ 78 เปอร์เซ็นต์ ที่มีความเข้มข้นที่ 1.91 เปอร์เซ็นต์ทองคำ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

	Weight (g)	**Weight (%)**	**Assay (%Au)**	**Weight of Au (g)**	**% Distribution**
ตะกรันที่ป้อน	5000	-	0.11%	5.50	-
ส่วนที่เหลือ ไม่ละลายน้ำ	1644	100%	0.33% *(คำนวณ)*	5.50	100%
ส่วนหนัก (Concentrate)	225	13.69%	1.91%	4.29	78%
ส่วนคละ (Midding)	425	25.85%	0.21%	0.89	16.18%
ส่วนเบา (Tailing)	941	57.23%	0.03%	0.28	5.09%
สูญเสีย (Loss)	53	3.23%	-	0.04	0.73%

ตารางที่ 4.5 มวลสมดุลของโลหะทองคำจากการเก็บกลับคืนโดยใช้โต๊ะสั่น

ในการทดลองเดียวกัน ตารางที่ 4.6 แสดงมวลสมดุลของโลหะเงินที่ได้จากการเก็บกลับคืนของโลหะเงิน พบว่า ปริมาณการเก็บกลับคืนโลหะเงินในส่วนหนักเท่ากับ 87.5 เปอร์เซ็นต์ที่ความเข้มข้นของโลหะเงิน 5.64 เปอร์เซ็นต์เงิน

	Weight (g)	Weight (%)	Assay (%Ag)	Weight of Ag (g)	% Distribution
ตะกรันที่ป้อน	5000	-	0.29%	14.50	-
ส่วนที่เหลือไม่ละลายน้ำ	1644	100%	0.88% *(คำนวณ)*	14.50	100%
ส่วนหนัก (Concentrate)	225	13.69%	5.64%	12.69	87.52%
ส่วนคละ (Midding)	425	25.85%	0.25%	1.07	7.37%
ส่วนเบา (Tailing)	941	57.23%	0.07%	0.66	4.55%
สูญเสีย (Loss)	53	3.23%	-	0.08	0.56%

ตารางที่ 4.6 มวลสมดุลของโลหะเงินจากการเก็บกลับคืนโดยใช้โต๊ะสั่น

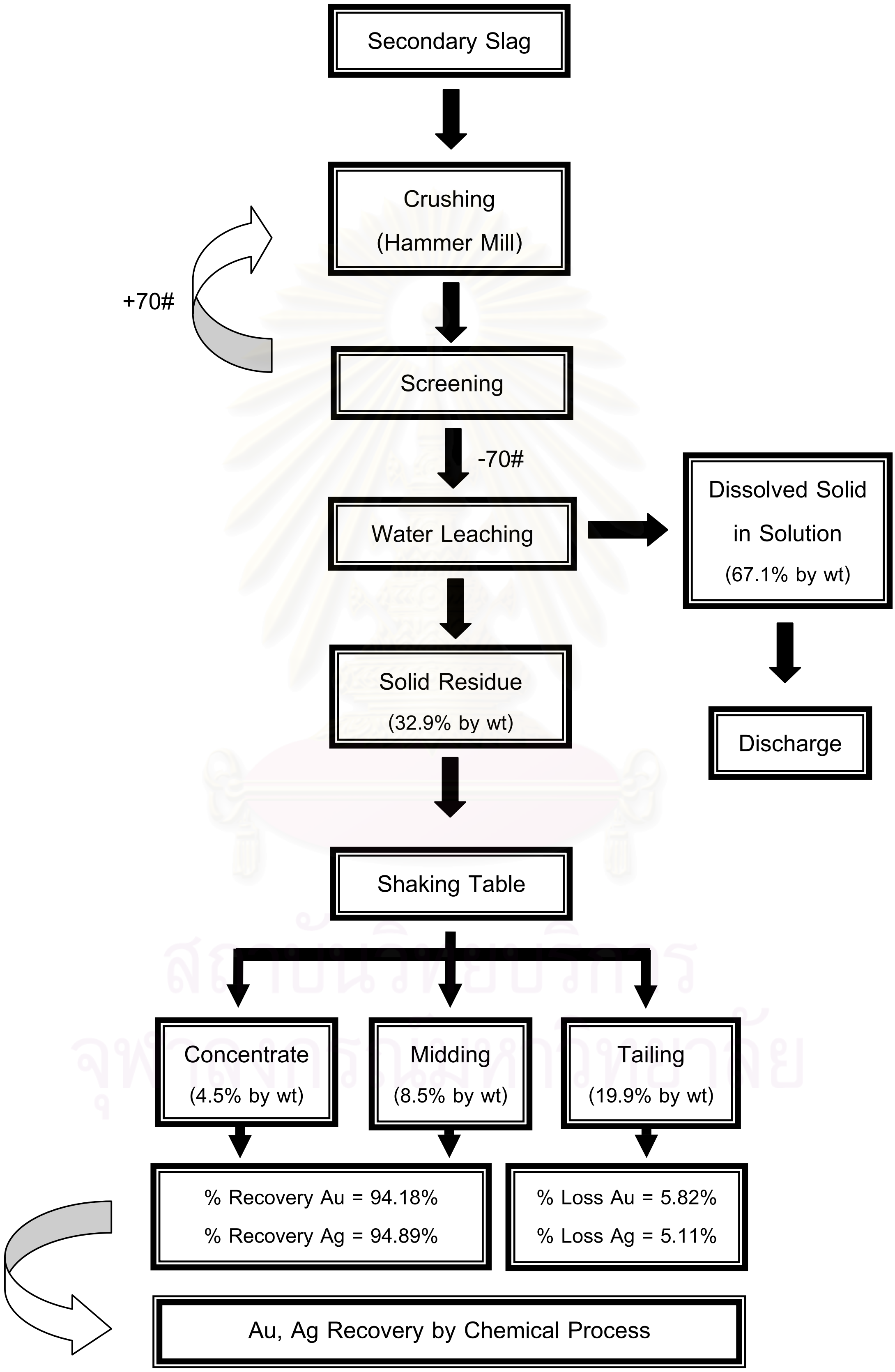
จากการศึกษาการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิขั้นต้นโดยใช้โต๊ะสั่น (Shaking Table) นั้น สามารถสรุปผลได้ว่า สามารถเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ ในส่วนหนักและส่วนคละเก็บกลับคืนทองคำได้ 94.18% เงินเก็บกลับคืนได้ 94.89% และสูญเสียโลหะมีค่าในส่วนเบาและส่วนสูญหาย ทองคำ 5.82% เงิน 5.11% การทำงานของโต๊ะสั่นควรมีความลาดเอียงของพื้นโต๊ะ (Slope) อยู่ที่ 3.5-4 องศา อัตราการไหลของปริมาณน้ำ (Flow rate) ที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 22 ลิตรต่อนาที ความเร็วของจังหวะชัก (Speed) 180-270 ครั้งต่อนาที ความยาวช่วงชัก (Stroke) ½ นิ้ว

4.8 สรุปกระบวนการเก็บกลับคืนขั้นต้นโดยใช้โต๊ะสั่น

ในกระบวนการเก็บกลับคืนขั้นต้นโดยใช้โต๊ะสั่นนั้น จะสามารถแยกส่วนที่เหลือหลังจากการละลายน้ำของตะกรันทุติยภูมิออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนหนักที่มีความเข้มข้นของโลหะมีค่าสูง (Concentrate) ส่วนคละที่มีความเข้มข้นของโลหะมีค่าปานกลาง (Midding) และส่วนเบาที่มีโลหะมีค่าอยู่น้อย (Tailing) โดยส่วนที่มีโลหะมีค่าอยู่น้อย (Tailing) เป็นส่วนสูญเสียและไม่มีความคุ้มค่าที่จะนำมาแยกสกัดต่อไป แต่ส่วนหนักที่มีความเข้มข้นของโลหะมีค่าสูงและส่วนคละที่มีความเข้มข้นของโลหะมีค่าปานกลางนั้น สามารถนำเข้าสู่กระบวนการแยกทองคำและเงิน โดยใช้วิธีทางเคมีหรือวิธีการอื่นเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะมีค่าขึ้นอีกก่อนที่แยกสกัดโดยใช้วิธีทางเคมีต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8.1 แสดงแผนผังกระบวนการขั้นต้นของการเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิจากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) ทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1) ตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) มีปริมาณการกระจายตัวของธาตุต่างๆ คือ

มีปริมาณของโลหะมีค่า

ทองคำ (Au)	0.11%
เงิน (Ag)	0.29%

มีปริมาณของธาตุพื้นฐานที่สำคัญ

โซเดียม (Na)	53.89%
ซิลิกอน (Si)	17.39%
คลอรีน (Cl)	9.18%
แคลเซียม (Ca)	5.95%
เหล็ก (Fe)	5.49%
อะลูมิเนียม (Al)	4.42%
ทองแดง (Cu)	0.10%

2) ตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) มีองค์ประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ

- ส่วนที่เป็นโลหะมีค่า ซึ่งประกอบไปด้วยโลหะผสมสารละลายของแข็ง 3 ธาตุ ได้แก่ ทองคำ เงิน ทองแดง

- ส่วนที่เป็นสารประกอบจำพวก Borax ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) ซึ่งประกอบไปด้วย

Borax ($Na_2B_4O_7.10H_2O$)

Sodium Aluminum Silicate ($NaAlSiO_4$)

Hematite (Fe_2O_3)

Sodium Zinc Silicate ($NaZnSiO_4$)

Sodium Chloride (NaCl)

Calcium Silicate (Ca_2SiO_4)

3) โลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) สามารถแยกตัวเป็นอิสระออกจากมลทินได้เมื่อผ่านการบดย่อยโดยใช้เครื่องย่อยแบบฆ้อน (Hammer Mill) ที่ขนาดอนุภาค -70 เมช และตะกรันทุติยภูมิสามารถละลายในน้ำได้โดยมีอัตราการละลายที่ตะกรันทุติยภูมิ 1 กรัม ต่อ น้ำ 11 มิลลิลิตร โดยใช้เวลาในการละลาย 15 นาที จึงเสร็จสมบูรณ์ โดยจะเหลือส่วนที่ไม่ละลายน้ำประมาณ 1 ใน3-4 ส่วน
4) เครื่องมือที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนเบื้องต้นของตะกรันทุติยภูมิ (Secondary Slag) ได้แก่ โต๊ะสั่น (Shaking Table) ซึ่งสามารถเก็บกลับคืนโลหะมีค่าประเภท

ทองคำ (Au) ได้ 94.18%

เงิน (Ag) ได้ 94.89%

และสูญเสียโลหะมีค่า

ทองคำ (Au) เท่ากับ 5.82%

เงิน (Ag) เท่ากับ 5.11%

โดยสามารถสรุปขั้นตอนของกระบวนการเก็บกลับคืนได้ดังนี้ คือ

1) ย่อยตะกรันทุติยภูมิโดยใช้เครื่องย่อยแบบฆ้อน (Hammer Mill)
2) คัดขนาดโดยนำตะกรันทุติยภูมิที่มีขนาด -70 เมช ไปใช้งาน ส่วนที่มีขนาด +70 เมช ให้นำไปย่อยซ้ำ
3) ละลายตะกรันทุติยภูมิ ด้วยน้ำ โดยใช้อัตราส่วนตะกรันทุติยภูมิ 1 กรัม ต่อ น้ำ 11 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 นาที
4) รินส่วนที่เป็นสารละลายทิ้ง นำส่วนที่ไม่ละลายน้ำ เข้าสู่กระบวนการเก็บกลับคืนโดยใช้โต๊ะสั่น (Shaking Table)
5) นำส่วนที่เป็นส่วนหนัก (Concentrate) และส่วนคละ (Midding) เข้าสู่กระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ โดยใช้วิธีทางเคมี หรือวิธีการอื่นเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะมีค่าอีก ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

วิจารณ์การทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 วิจารณ์การทดลอง

1. จากการทดลองศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ โดยเครื่อง XRF จะมีข้อจำกัดในการใช้เครื่อง คือ จะให้ความแม่นยำที่ลดลงเมื่อปริมาณของสารที่ต้องการตรวจสอบมีปริมาณที่น้อยมากๆ เมื่อเทียบกับเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์อื่นๆ แต่สาเหตุที่เลือกใช้เครื่อง XRF ในการทดลองเนื่องจาก เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) สามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุพร้อมกัน (Simultaneous) และสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับที่มีความเข้มข้นต่ำพอสมควร และเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วในการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งจากคุณสมบัติโดยรวมของเครื่องจะเหมาะสมที่จะใช้กับตะกรันทุติยภูมิ

2. ในการวิเคราะห์ตะกรันทุติยภูมิแต่ละครั้งอาจได้ผลวิเคราะห์ปริมาณของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ ที่ค่อนข้างมีความแตกต่างและหลากหลาย เนื่องจากผลิตภัณฑ์ตั้งต้นในกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ ในแต่ละครั้งมีความแตกต่างและหลากหลาย ดังนั้น ปริมาณของโลหะมีค่าที่หลงเหลืออยู่ในตะกรันทุติยภูมิ จึงมีปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละครั้งของกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ ดังนั้น กระบวนการชักตัวอย่าง (Sampling)จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งจำเป็นต้องกระทำอย่างระมัดระวังและถูกต้อง เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากที่สุด

3. กระบวนการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิเบื้องต้นโดยใช้โต๊ะสั่น (Shaking Table) จะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น อัตราการไหลของปริมาณน้ำ (Flow rate) ความเอียงของพื้นโต๊ะ (Slope) ความเร็วของจังหวะชัก (Speed) ความยาวช่วงชัก (Stroke) ดังนั้น การเลือกใช้องค์ประกอบที่ถูกต้องอย่างระมัดระวัง จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิดียิ่งขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

1. ในการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ ในกรณีที่ปริมาณของโลหะมีค่ามีความเข้มข้นต่ำมากๆ เพื่อให้ได้ผลของการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น อาจใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorbsion (AA) ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ได้ดีกับการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำ เข้ามาแทนที่เครื่อง X-Ray Fluorescent Spectroscopy (XRF) แต่อาจมีข้อเสียที่ว่าการเตรียมตัวอย่างค่อนข้างยุ่งยากและไม่สามารถวิเคราะห์ได้ครั้งละหลายๆธาตุทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง

2. สำหรับการนำผลการศึกษาวิจัยไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมนั้น การศึกษาวิจัยนี้เป็นกระบวนการเบื้องต้นของการเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมต่อจากกระบวนการที่ได้เสนอแนะไว้ โดยศึกษาวิธีการแยกสกัดโลหะมีค่าที่ได้จากกระบวนการเก็บกลับคืนขั้นต้นดังกล่าว เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

(1) Ammen, C.W. Recovery and refining of precious metal. 2nd Edition, New York : Chapman & Hall, 1997.

(2) Buhrke, E.V. & Jenkins, R. & K Smith, D. A Practical guide for the preparation of specimens for X-Ray Fluorescence and X-Ray Diffraction Analysis. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1998.

(3) Goldstein, J.I. & Newbury, D.E. & Echlin, P. & Joy, D.C. & Fiori, C. & Lifshin, E. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Micro Analysis. New York : Plenum Press, 1981.

(4) Kelly, E.G. & Spottiswood, Introduction to Mineral Processing. Oxford : John Wiley & Sons, Inc., 1982.

(5) Kirke Rose, T. & Newman, W.A.C. Metallurgy of Gold. London : Charles Griffin & Company, Ltd., 1937.

(6) Loewen, R. Small Scale Refining of Jewelers Wastes. Colorado : 1995.

(7) Marsden, J. & House, I. The chemistry of gold extraction. New York : Ellis Horwood, 1992.

(8) Newton, J. Extractive Metallurgy. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1959.

(9) Perter, R. & Christopher W Corti. The Assaying and Refining of Gold. London : Trait Design, 1997.

(10) Yannopoulos, J.C. The Extractive Metallurgy of Gold. New York : Van Nostrand Reinhold, 1991.

(11) Wills, B.A. Mineral Processing Technology. 4th edition, Oxford : 1998

(12) Wise, E.W. Gold Recovery Properties and Applications. Princeton : Van Nostrand Company, 1964.

(13) แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์, 2535.

(14) เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. วัสดุศาสตร์มูลฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

(15) เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, ฉัตรชัย สมศิริ และ ศิริรัตน์ นิสารัตนพร. Atlas Microstructure of Gold Alloys. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย, สำนักนายกรัฐมนตรี.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องย่อยแบบฆ้อน (Hammer Mill)

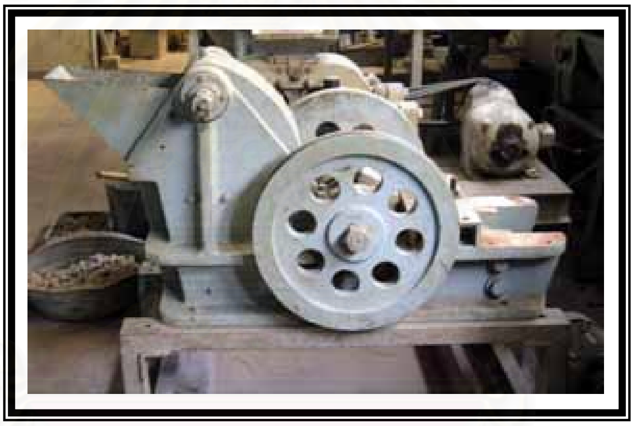
ภาพที่ ก.1 เครื่องย่อยแบบฆ้อน (Hammer Mill)

เครื่องย่อยแฮมเมอร์มิลล์ (Hammer Mill) หรือที่เรียกว่า เครื่องย่อยฆ้อน รูปร่างของแฮมเมอร์มิลล์ดังแสดงให้เห็นในรูป ตัวฆ้อน(Hammer) มักทำมาจากเหล็กกล้าแมงกานีส (Manganese Steel) หรือเหล็กหล่อนอดูล่าร์ (Nodular Cast Iron) ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium Carbide) ซึ่งทนทานต่อแรงขัดสีได้ดี และแผ่นกระแทก (Breaker Plate) มักทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกัน ที่ตัวแกนของฆ้อนจะถูกยึดไว้ให้หมุนได้โดยรอบ (Pivoted) ซึ่งเมื่อตัวฆ้อนกระทบกับของแข็งที่มีขนาดใหญ่ (Oversize) หรือวัสดุแปลกปลอม (Tramp) ที่แข็งและหลงเข้าไปในห้องย่อย (Crushing Chamber) แล้วสามารถหมุนหลบวัสดุเหล่านั้นเข้าไปด้านในได้ ดังนั้นตัวฆ้อนที่หมุนได้ (Pivoted Hammer) นี้จะให้แรงกระแทกที่น้อยกว่าตัวฆ้อนที่ตรึงอยู่กับที่ (Rigidly Attached Hammer) จึงเหมาะสำหรับย่อยวัสดุอ่อนๆ (Soft) ทางออกของของแข็งที่ถูกย่อยจะมีลักษณะเป็นรูคล้ายตะแกรง (Grid) ซึ่งจะทำให้อนุภาคที่ยังมีขนาดใหญ่ยังคงค้างอยู่ในห้องย่อยต่อไป เพื่อให้ถูกย่อยซ้ำจนมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงจึงจะลอดผ่านรูตะแกรงออกมาได้

เครื่องย่อยชนิดนี้จะออกแบบให้ของแข็งที่จะนำมาย่อยมีความเร็วประมาณเท่ากับความเร็วของตัวฆ้อน การแตกหักอาจเกิดจากการกระแทกระหว่างฆ้อนกับของแข็งอย่างรุนแรง หรือเนื่องจากการกระแทกระหว่างเครื่องห่อหุ้ม (Casing) หรือตะแกรง (Grid) กับของแข็งก็ได้ และ

เนื่องจากของแข็งเมื่อโดนกระแทกมีความเร็วสูง ดังนั้นการลดขนาดของของแข็งที่เกิดขึ้นมักเกิดจากแรงขัดสี (Abrasion) คือแรงระหว่างของแข็งเสียดสีกับของแข็งด้วยกันเอง (Interparticle Force) ทำให้การควบคุมขนาดของของแข็งที่ย่อยได้ลำบากกว่าการย่อยจากพวกเครื่องย่อยที่ใช้แรงกด เช่น เครื่องย่อยจอว์ เครื่องย่อยไจเรตอรี่ เครื่องแบบกรวย หรือเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้ง เป็นต้น เครื่องย่อยชนิดนี้อาจสร้างให้มีขนาดใหญ่ โดยน้ำหนักของฆ้อนอาจหนักถึง 100 กิโลกรัม สามารถย่อยวัสดุขนาด 30 นิ้วให้ลงมาเหลือขนาดประมาณ 4 นิ้วได้ โดยมีความเร็วรอบประมาณ 500 ถึง 3000 รอบต่อนาที จากคุณสมบัติเครื่องย่อยชนิดนี้ จึงมักนิยมใช้ย่อยของแข็งที่ไม่คมมากนัก (Non-Abrasive) เช่น หินปูน หรือถ่านหิน ข้อดีสำหรับเครื่องย่อยแบบนี้คือ ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ย่อยได้ จะมีรูปร่างเป็นกล่อง (Cubic)

เครื่องย่อยจอว์ (Jaw Crusher)



ภาพที่ ก.2 เครื่องย่อยจอว์ (Jaw Crusher)

ลักษณะที่สำคัญของเครื่องย่อยจอว์ คือ ประกอบด้วยแผ่นย่อย 2 แผ่น แผ่นหนึ่งอยู่กับที่ (Fixed Jaw) แต่อีกแผ่นหนึ่งเคลื่อนที่เข้าและออกจากแผ่นแรก (Swing Jaw) ทำงานคล้ายๆกับขากรรไกรเคี้ยวอาหาร แผ่นย่อยทั้งสองทำมุมแหลมซึ่งกันและกัน อนุภาคของแข็งที่ถูกนำมาย่อยจะถูกกดหรือหนีบ (Compressed or Nipped) แล้วก็ปล่อยออกมา ของแข็งจะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงแล้วเคลื่อนที่ลงไปข้างล่างด้วยแรงโน้มถ่วงแล้วก็จะถูกกดซ้ำแล้วซ้ำอีก จนกระทั่งเคลื่อนที่ออกจากปากทางออก (Set) ไป

เครื่องย่อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องย่อยชนิด เครื่องย่อยเบรค (Brake Crusher) จะมีแกนหมุนอยู่ตรงส่วนบนสุดของแผ่นย่อยเคลื่อนที่ได้ ฉะนั้นช่องด้านป้อนจะคงที่ แต่ช่องด้านออกข้างล่างหรือปากทางออก (Set) จะเคลื่อนที่ไปมา ทำให้ของแข็งถูกย่อยแตกออกมาหลายขนาด เครื่องย่อยชนิดนี้เป็นที่นิยมกันโดยทั่วไป

เครื่องย่อยเบรค (Brake Crusher) ประดิษฐ์โดย W.E. Blake ในปี ค.ศ. 1858 ต่อมาเป็นที่นิยมและนำไปใช้กันมาในงานอุตสาหกรรม เครื่องย่อยเบรคสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะตามชนิดของข้อส่ง (Toggle) ที่ใช้คือ เครื่องย่อยข้อส่งคู่ (Double Toggle Jaw Crusher) และเครื่องย่อยแบบข้อส่งเดี่ยว (Single Toggle Jaw Crusher)

โดยเครื่องย่อยเบรค ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องย่อยแบบข้อส่งเดียว (Single Toggle Jaw Crusher) เครื่องย่อยชนิดนี้เป็นเครื่องย่อยที่มีแผ่นเคลื่อนที่ได้ (Swing Jaw) แขวนต่อมาจากเพลาเบี้ยว (Eccentric Shaft) ซึ่งออกแบบให้มีรูปร่างกระทัดลัด (Compact Design) และมีน้ำหนักเบากว่าเครื่องย่อยข้อส่งคู่เมื่อเทียบขนาดปากที่เท่าและยังออกแบบให้มีแผ่นย่อยเคลื่อนที่ได้นั้นจะแตกต่างกันด้วย กล่าวคือ ไม่เพียงแต่เคลื่อนที่เข้าหาแผ่นย่อยเคลื่อนที่ไม่ได้ในแนวข้าง เนื่องจาการเคลื่อนที่ของข้อส่ง แต่ยังเคลื่อนที่ในแนวดิ่งด้วย จึงทำให้มีความจุในการย่อยแข็งสูงมากกว่าเครื่องย่อยข้อส่งคู่เมื่อเปรียบเทียบขนาดปากที่เท่ากัน แต่การสึกหรอของแผ่นย่อยจะสูงกว่า การติดแผ่นย่อยเคลื่อนที่ได้กับเพลาเบี้ยวโดยตรง จะทำให้เวลาทำงานตัวเพลาเบี้ยวขับเคลื่อนจะเกิดความเค้นมาก ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องย่อยข้อส่งเดี่ยวจะแพงกว่าเครื่องย่อยข้อส่งคู่ แต่ปกติแล้วเครื่องย่อยข้อส่งคู่จะมีราคาที่สูงกว่าเครื่องย่อยข้อส่งเดี่ยวที่มีขนาดปากที่เท่ากัน เคลื่อนย่อยข้อส่งคู่จึงเหมาะสำหรับย่อยอนุภาคที่แข็ง (Hard) เหนียว (Tough) และคม (Abrasive) เช่นหินแกรนิต หินบะซอลต์ เป็นต้น ส่วนเครื่องย่อยข้อส่งเดี่ยว จะเหมาะสมสำหรับย่อยอนุภาคที่มีคุณสมบัติตรงกันข้าม เช่น หินปูน

เนื่องจากเครื่องย่อยจอว์เป็นเครื่องจักรหนัก (Heavy Duty Machine) ดังนั้นการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยจอว์จะต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรง (Robust) ตัวโครงสร้างหลัก (Main Frame) มักทำมาจากเหล็กหล่อ (Cast Iron or Cast Steel) และจะยึดติดกับตัวโบล์ต (Bolt) โดยตัวโครงสร้างหลักมักจะสร้างเป็นส่วน ซึ่งจะสามารถทำให้ถอดออกเป็นชิ้นๆได้สะดวกต่อการขนส่งไปยังท้องที่ทุรกันดาร แล้วนำมาประกอบใหม่ได้ เครื่องย่อยจอว์แบบใหม่ๆมักมีโครงสร้างหลักทำมาจากเหล็กกล้าอ่อน (Mid Steel Plate) นำมาเชื่อมต่อกัน ตัวปากนั้นมักจะทำมาจากเหล็กกล้าหล่อ (Cast Steel) โดยมีไลเนอร์ (Liner) บุหุ้มเอาไว้เรียกว่า แผ่นย่อย (Jaw Plate) ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนได้เมื่อเกิดการสึกหรอเนื่องจากการใช้งานไปนานๆ แผ่นย่อยมักทำมาจากเหล็กกล้าแมงกานีส (Manganese Steel) หรือเหล็กกล้าชุบแข็งหรือ ไน-ฮาร์ด (Ni-Hard) หรือเหล็กนิเกิล-โครเมียม (Ni-Cr Alloy Cast Iron) ที่แข็ง ซึ่งสามารถลดการสึกหรอของแผ่นย่อยเนื่องจากการกระทบกับของอนุภาคของของแข็ง ยังสามารถช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการย่อยได้อีกด้วย โดยส่วนมากแผ่นย่อยมัก

จะทำเป็นส่วนๆ โดยใช้โบล์ตเป็นตัวยึดให้ติดกับปาก ซึ่งจะสามารถทำให้เปลี่ยนไลเนอร์ของแผ่นย่อยได้โดยง่าย แผ่นลองด้านข้าง (Cheek Plate) จะบุไว้ด้านข้างของห้องย่อย (Crushing Chamber) เพื่อป้องกันไม่ให้โครงสร้างหลักเกิดการสึกหรอด้านข้าง ซึ่งมักจะใช้วัสดุที่ทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกับที่ใช้ทำแผ่นย่อยนั้นแผ่นย่อยอาจทำให้มีลักษณะเรียบแต่นิยมทำให้เป็นลักษณะลูกคลื่น (Corrugated) ซึ่งเหมาะสำหรับการย่อยอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะแข็งและคมได้ดี ปกติมุมระหว่างแผ่นย่อยที่เคลื่อนที่ไม่ได้ (Fixed Plate) และแผ่นย่อยเคลื่อนที่ได้ (Swing Plate) จะน้อยกว่า 26 องศา หากทำมุมเกิน 26 องศาแล้ว จะทำให้เมื่อย่อยอนุภาคของแข็งเกิดการลื่นไถล (Slipping) ของอนุภาคของแข็งที่ต้องการย่อยทำให้ความจุ (Capacity) ของเครื่องย่อยลดลงและจะทำให้เกิดการสึกหรอเพิ่มมากขึ้นด้วย แผ่นย่อยอาจออกแบบให้บริเวณปากทางออก (Set) มีลักษณะโค้งเพื่อลดปัญหาที่จะเกิดการ CHOCKING ของอนุภาคของแข็งตรงบริเวณปากทางออกของเครื่องย่อยเมื่อทำการย่อยอนุภาคของแข็ง การออกแบบให้แผ่นย่อยเป็นแบบใด หรือมีลักษณะของผิวเป็นแบบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคที่จะนำมาทำการย่อยด้วยเช่นกัน การขับเคลื่อนของมอเตอร์หรือเครื่องยนต์จะทำให้เกิดแรงอัดกลับไปมาของแผ่นย่อย โครงสร้างหลักของเครื่องย่อยจะต้องมีน้ำหนักมากเพียงพอที่จะทำการต้านแรงสั่นสะเทือนขณะทำการย่อย จึงทำให้แผ่นย่อยมักทำจากวัสดุที่ทนทานและแข็งแกร่งเป็นพิเศษ ข้อส่ง (Toggle) อาจทำเป็นแผ่นหรือแกนยึดติดกับแผ่นย่อย สามารถถอดเปลี่ยนได้เช่นเดียวกับแผ่นย่อย ตัวข้อส่งจะติดกับเข้าที่รองรับ (Toggle Seat) ตัวแบริ่ง (Bearing) อาจเป็นแบริ่งชิ้นเดียว หรือบอลบริ่ง (Ball Bearing) ถ้าเป็นเครื่องย่อยเล็กจะใช้พูลเล่ (Pulley) ข้างเดียว ถ้าเป็นเครื่องย่อยขนาดกลางและใหญ่จะใช้พูลเล่สองข้าง กำลังงานที่จะใช้อาจใช้เครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวฉุดโดยให้มีกำลังมากกว่าที่คำนวณไว้ 20-30% ความเร็วรอบของเครื่องย่อยจอว์จะแปรผันไปตามขนาดของอนุภาคของแข็ง แต่ปกติทั่วไปแล้วจอยู่ระหว่าง 100-350 รอบต่อนาที การที่จะตัดสินใจว่าจะใช้ความเร็วรอบเท่าใด ก็ขึ้นอยู่กับอนุภาคของแข็งที่จะถูกย่อยจะสามารถมีเวลาพอที่จะเคลื่อนตัวลงไปอยู่ตำแหน่งที่ต่ำกว่าด้วยแรงโน้มถ่วงได้ทันก่อนที่จะถูกย่อยซ้ำ

ระยะมากสุดของระยะชักออกมา (Throw) ของแผ่นย่อยเคลื่อนที่ได้จะเป็นเท่าใดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคของของแข็งที่จะทำการย่อย ซึ่งจะสามรถปรับได้โดยการปรับความเบี้ยว (Eccentric) ของเพลาเบี้ยว (Eccentric Shaft) ซึ่งมักจะอยู่ในช่วง 1-7 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเครื่องย่อยของจอว์ ค่าระยะชักมักมากเมื่อทำการย่อยของแข็งที่เหนียว (Tough) และยืดหยุ่น (Plastic) แต่ค่าช่วงชักจะน้อยเมื่อทำการย่อยของแข็งที่แข็งมาก (Hard) และเปราะ (Brittle) ยิ่งช่วงชักมากโอกาสที่จะเกิด CHOKING จะลดลง เพราะว่าของแข็งที่ถูกย่อยแล้วจะเคลื่อนที่ออกไปได้ง่ายและเร็วกว่าปกติ อัตราส่วนของการลดขนาด (Apparent Reduction Ratio) จะมีค่า 6:1 สำหรับของแข็งที่เหนียว และ 8:1 สำหรับของแข็งที่เปราะ ปริมาณของของแข็งที่ได้ต่อชั่วโมงจะขึ้นอยู่กับ

นาดของของแข็งที่ป้อนและขนาดของของแข็งที่ผ่านการย่อยแล้ว ถ้าต้องการย่อยให้มีอัตราส่วนการลดขนาดมาก ความจุจะน้อยลง

ตะแกรงมาตรฐาน (SIEVE)

ภาพที่ ก.3 ตะแกรงมาตรฐาน (SIEVE)

การวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเป็นวิธที่นิยมกันมาก ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยเส้นลวดนำมาสานกันทำให้เกิดเป็นช่องสี่เหลี่ยมและมักบอกขนาดเป็นเมช (Mesh) ตะแกรงขนาด 10 เมช ซึ่งหมายถึงระยะความยาว 1 นิ้วจะมีช่องรูตะแกรงจำนวน 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกเสียจากเส้นผ่าศูนย์กลางของลวด ดังนั้น คำว่า เมช จึงยังไม่ได้บอกขนาดที่แท้จริงของอนุภาคที่ผ่านลอกรูตะแกรง จนกว่าจะทราบขนาดเส้นลวดที่โรงงานต่างๆนำมาใช้สานทำตะแกรง วิธีง่ายๆอีกวิธีหนึ่งจะทราบขนาดของช่องตะแกรงเป็นเมช ก็คือ เมื่อทราบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดและช่องว่าง (หน่วยเป็นนิ้ว) แล้วนำตัวเลขทั้งสองไปรวมกันแล้วหาร 1 ผลลัพธ์ที่ออกมาจะเป็นเมช เช่น ตะแกรงมีช่องว่า 0.0015 นิ้ว และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดเท่ากับ 0.0010 นิ้ว เมื่อนำมารวมกันจะได้ 0.0025 นิ้วเมื่อนำไปหาร 1 จะได้เท่ากับ 400 คือขนาดของตะแกรงนั้นเป็น 400 เมช

ตะแกรงชุดหนึ่งๆ มักจะมีกฎเกณฑ์ขนาดของรูลดหลั่นลงไป ถ้าจะใช้หลักการก้าวหน้าทางเลขคณิต (Arithmetic Series) อย่างง่ายๆ คือ 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 และ 1 นิ้วตามลำดับ จะเห็นว่าหลักนี้ไม่เหมาะสม เพราะว่าอนุภาคขนาด 1 นิ้ว และ 2 นิ้วมีขนาดแตกต่างกันมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับอนุภาคขนาด 9 นิ้วและ 10 นิ้ว ซึ่งดูแล้วเกือบจะไม่เห็นความแตกต่าง ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นใหม่

โดยหาตัวคงที่มาคูณ เช่น ใช้ 2 เป็นตัวคูณ ตัวเลขจะออกมาร 8, 4, 2 และ ½ นิ้ว เป็นต้น ซึ่งอยู่ในระบบความก้าวหน้าทางเลขาคณิต (Geometric Series) แต่ต่อมาได้มีการแก้ไข $\sqrt{2}$ เป็นตัวคูณ และได้กลายเป็นมาตรฐานของตะแกรงที่ใช้กันในประเทศสหรัฐอเมริกาในปัจจุบัน ในงานค้าคว้าบางงานใช้ $\sqrt[4]{2}$ เป็นตัวคูณและทางบริษัทผู้ผลิตได้ยึดเอาตะแกรงขนาด 200 เมชเป็นมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 75 ไมครอนหรือ 0.075 มิลลิเมตร

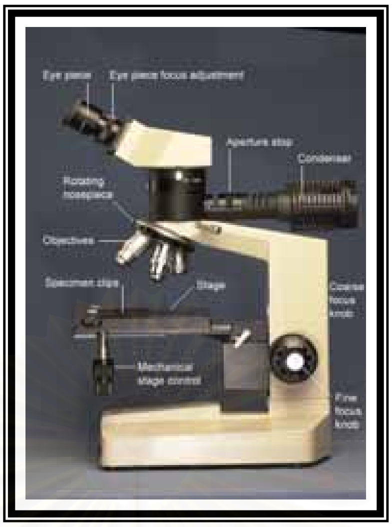
ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในงานคัดขนาดทั่วๆไป จะอยู่ระหว่าง 3 ถึง 400 เมช เป็นส่วนใหญ่ โดยขนาด 400 เมช เท่ากับขนาดของรูตะแกรง 38 ไมครอน (1 ไมครอน = 1/1,000 มิลลิเมตร) สำหรับการคักขนาดด้วยตะแกรงที่มีรูขนาดเล็กกว่านี้ จะใช้ตะแกรง Micromesh ซึ่งสามารถคัดขนาดได้เล็กถึง 5-10 ไมครอน

การคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานนี้ ทำได้โดยการนำเอาอนุภาคของแข็งไปผ่านบนตะแกรงที่มีขนาดต่างๆ แต่หากต้องการคัดขนาดออกมาหลายๆขนาดก็ต้องวางชุดตะแกรง (Stack of Sieves) เป็นหลายๆชั้น ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้คัดขนาดจะติดอยู่กับส่วนล่างของโลหะทองเหลืองรูปกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 นิ้ว สูงประมาณ 2 นิ้ว ตะแกรงชุดหนึ่งจะประกอบไปด้วยตะแกรงขนาดต่างๆมีฝาปิดครอบที่ตะแกรงชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดจะมี Pan รองรับ Pan มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับตะแกรงทั่วๆไป แต่ข้างล่างแทนที่จะมีลวดเป็นตะแกรง กลับเป็นโลหะทึบสำหรับรองรับอนุภาคที่ผ่านตะแกรงชั้นที่เหนือกว่าไว้ หลังจากการคัดขนาดจะมีอนุภาคค้างอยู่บนตะแกรง เรียกว่า อนุภาคขนาดเกิน (Oversize)

สิ่งที่ควรระวังในการคัดขนาดก็คือ อย่างใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่งๆ เพราะอนุภาคจะเกิดการอุดตันในรูตะแกรงมาก และอาจจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะทำให้อนุภาคเม็ดเล็กๆเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ผิดไป นอกจากนี้ความชื้นจะต้องมีน้อยที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)



ภาพที่ ก.4 กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ที่ใช้ส่องดูวัตถุที่มีขนาดเล็ก ขยายให้เป็นภาพขนาดใหญ่และมองเห็นรายละเอียดมากขึ้น ปกติตาคนเราจะมีความสามารถในการจำแนกรายละเอียด (Resolving power) เพียง 0.25 มม. ถ้าใช้กล้องจุลทรรศน์ช่วยจะสามารถแจกแจงรายละเอียดได้ถึง 0.25 μm โดยทั่วไปถ้ากล่าวถึงกล้องจุลทรรศน์จะหมายถึงกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical หรือ Light Microscope) ซึ่งสามารถขยายภาพสูงสุดไม่เกิน 2,000 เท่า ใช้ประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้างานทางด้านวิทยาศาสตร์ได้หลายสาขาวิชา

กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานโลหวิทยา จะแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในงานชีววิทยา เนื่องจากโลหะเป็นวัตถุทึบแสง จึงต้องอาศัยหลักการตกกระทบและสะท้อนแสงของผิวหน้าที่เรียบของชิ้นงาน แหล่งกำเนิดแสงสำหรับกล้องจุลทรรศน์มี 2 แบบคือ แสงธรรมดาและลำแสงอิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง ส่งลำแสงผ่านเลนส์รวมแสงไปตกกระทบบนแผ่นแก้วสะท้อนแสง ทำให้แสงสะท้อนตกลงบนผิวตัวอย่างในลักษณะตั้งฉาก ผิวที่ขัดเรียบของตัวอย่างจะสะท้อนแสงกลับขึ้นไปผ่านเลนส์วัตถุ แล้วไปผ่านเลนส์ตา ก่อนจะผ่านเข้าตาผู้ดู ทำให้เห็นภาพขยายโครงสร้าง กล้องจุลทรรศน์ธรรมดามีกำลังขยายตั้งแต่ 50 เท่า จนถึง 1,000 เท่า เลนส์วัตถุที่ใช้มี 2 แบบ คือ แบบเปียกกับแบบแห้ง แบบแห้งให้กำลังขยายต่ำ แบบเปียกให้กำลังขยายสูง คำว่าเปียกหรือแห้งหมายถึง สื่อ (Media) ระหว่างเลนส์วัตถุกับตัวอย่าง แบบแห้งสื่อ คือ อากาศ แบบเปียกสื่อ คือ น้ำมัน ซึ่งมีดัชนีการหักเหสูงโดยใช้น้ำมันเพื่อเพิ่มความคมชัดในการขยายภาพ แต่ควรต้องระวังเรื่องการทำความสะอาดเลนส์ด้วย

เครื่องเอกซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรโกปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF)

ภาพที่ ก.5 เครื่องเอกซ์ เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรโกปี (XRF)

เมื่อปี ค.ศ. 1895 W.C. Rontgen ได้ค้นพบรังสีเอกซ์ (X-Ray) ซึ่งเป็นสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่ง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.1-100 อังสตรอม (A°) หรือ 0.1-10 nm แต่ที่ใช้ในทางเคมีวิเคราะห์จะอยู่ในช่วง 0.07-0.2 nm รังสีเอกซ์จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์หลายๆอย่าง ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซ์ เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรโกปี เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีเป็นแบบไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) สามารถทำได้ทั้งวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวๆทีละธาตุ (Sequential) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (Simultaneous) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ทันสมัย มีความสามารถสูง ได้นำมาใช้ในระบบข้อมูลด้วย ช่วยให้เทคนิคนี้ได้รับความนิยมมากขึ้นทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย เพราะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ทางเคมีได้ทุกแทบชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นสูงไปจนถึงความเข้มข้นต่ำ บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับ Trace Analysis (ppm) ซึ่งวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง XRF มีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบทีวัดความยาวคลื่น (Wavelength Dispersion System) และระบบที่วัดเป็นพลังงาน (KeV) (Energy Dispersion System)

โดยในการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคทาง XRF นั้นมีหลักการและขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการดังนี้ คือ ลำรังสีเอกซ์ที่ได้จากเครื่อง X-ray generator (ซึ่งมีหลอดรังสีเอกซ์อยู่) จะถูกส่งไปยังสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่างๆในสารตัวอย่าง แล้วเกิดเอกซ์ เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ขึ้นให้เอกซ์ เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ผ่านคลอลิเมเตอร์ (Collimator) เพื่อทำให้ลำรังสีเอกซ์เป็นลำขนานและไปในทิศทางที่ต้องการ คือ ไปกระทบกับ Analysis Crystal ซึ่งอยู่ในสเปกโทรมิเตอร์ที่

ทำให้เป็นสุญญากาศหรือความกดดันต่ำมากๆ Analysis Crystal นี้จะทำหน้าที่กระจายหรือแยกรังสีเอกซ์ออกไปให้มีความยาวคลื่นต่างๆกัน คล้ายกับเกรตติ้งทำหน้าที่แยกแสงในเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโกปี รังสีเอกซ์ที่ความยาวคลื่นต่างๆกันจะถูกวัดความเข้มหรือกำลัง (Power) ด้วยการสแกน (Scan) ของดีเทคเตอร์ สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลแล้วถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัมด้วยเครื่อง Printer หรือ Recorder จากข้อมูลที่เก็บได้ทั้งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

ภาพที่ ก.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

อนุภาคอิเล็กตรอนถูกค้นพบโดย Sir J.J. Thomson ในปี 1897 หลังจากนั้นในปี 1924 Louid de Broglie พบว่าอิเล็กตรอนมีลักษณะคล้ายคลื่น จึงทำให้เกิดแนวความคิดว่าน่าจะนำอิเล็กตรอนมาสร้างเป็นเลนส์ซึ่งจะได้ลักษณะคล้ายคลึงกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แต่มีกำลังในการแจกแจงสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนมีค่าสั้นกว่าความยาวคลื่นของแสงถ้าใช้ศักดาไฟฟ้าที่มีค่ามากพอ โดย Carl Stormer ได้เริ่มศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะสมมาตร ปี 1927-1928 ได้มีการสร้างเลนส์แม่เหล็ก (Magnetic Lens) โดย Denis Gobor แต่ไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากความรู้ในเรื่องระบบเลนส์แม่เหล็กยังไม่ดี ต่อมา Max Knoll และ Ennst Ruska ได้สร้างและทดสอบเลนส์แม่เหล็กก็ได้ผลออกมาเช่นเดียวกัน มีการนำเอาแนวคิดเรื่องระบบเลนส์ของ Carl Stormer มาใช้ในการออกแบบและได้มีการปรับปรุงหลายครั้ง ในที่สุดก็ได้มีการสร้างกล้อง Scanning เป็นเครื่องแรกโดย Manfred Von Ardenne ในปี 1930 ซึ่งลักษณะการทำงานโดยทั่วไปคือ เมื่อแคโทดซึ่งเป็น

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้า ผ่านมายังระบบเลนส์และจะถูกควบคุมการกราดบนพื้นผิวของตัวอย่างโดย Scanning Coils ซึ่งพื้นที่ในการกราดบนผิวตัวอย่างนี้เป็นสัดส่วนกับกำลังขยายที่ปรากฏบนจอภาพ ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพ (Image Resolution) ของกล้องชนิดนี้มีมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมากมายหลายเท่าและไม่เพียงแต่มองเห็นภาพของตัวอย่างที่จะศึกษาเท่านั้น ยังสามารถนำสัญญาณอื่นๆ ที่เกิดจากอัตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและตัวอย่างมาใช้ศึกษาคุณลักษณะอย่างอื่นของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์หาธาตุต่างในตัวอย่างที่สนใจ ศึกษาลักษณะการเรียงตัวของผลึกในตัวอย่าง เป็นต้น

โต๊ะสั่นแยกแร่ (Shaking Table)

ภาพที่ ก.7 โต๊ะสั่นแยกแร่ (Shaking Table)

โต๊ะแยกแร่เป็นอุปกรณ์แต่แร่อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งแย่แร่ออกได้ด้วยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (Gravity) ขนาดของเม็ดแร่ที่จะแยกได้ผลดี คือ ขนาดประมาณ 20 เมช ลงไปถึง 440 เมช หรือละเอียดกว่านั้น โต๊ะแยกแร่แบ่งออกตามขนาดของเม็ดแร่ที่จะใช้แยก ได้ 2 ชนิด คือ โต๊ะแยกแร่ขนาดเม็ดทราย (Sand Table) โต๊ะแยกแร่ขนาดตะกอน (Slime Table) ซึ่งแยกแร่ตั้งแต่ขนาด 200-300 เมช ลงไป

การแต่งแร่เม็ดละเอียดด้วยโต๊ะแยกแร่ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติการไหลของน้ำบนพื้นเอียงและความหนืด (Viscosity) ของของเหลวหรือน้ำ ของเหลวที่มีความหนืดสูงย่อมทำให้การไหลบนพื้นเอียงลดลง ลักษณะรูปร่างของเม็ดแร่หรือวัตถุที่ใช้แยกย่อมมีผลต่อการแยกด้วย เช่น เม็ดแร่รูปกลมย่อมไหลไปได้ไกลกว่าแบนหรือสี่เหลี่ยม

ส่วนสำคัญของโต๊ะแยกแร่

1. พื้นโต๊ะ ปกติทำด้วยไม้และปูพื้นด้วยยางหรือ ยาง Linoleum เฉพาะของยี่ห้อ Holman ทำด้วยไฟเบอร์กลาส (Fiber-Glass Deck) บนพื้นโต๊ะที่ปูด้วยยาง โดยปกติจะตอกไม้ขั้น (Riffle) เอียงไปตามแนวยามของโต๊ะ โดยมีความหนาตอนต้นทางด้านปล่อยแร่และค่อยๆบางตอนปลาย บางตอนที่บางมากใช้แผ่นทองแดงบางๆ ตอกแทนไม้ลูกขั้นที่กล่าวถึงลูกขั้นอันบนๆจะสั้นกว่าลูกขั้นอันถัดลงมาเล็กน้อย และมีความยาวเพิ่มขึ้นเรียงลำดับกันลงไป

2. เครื่องกลไก (Head Motion) มีหน้าที่ทำให้โต๊ะมีจังหวะโล้ไปข้างหน้าช้าและโล้กลับโดยเร็ว การเคลื่อนของกลไก จะทำให้เม็ดแร่เคลื่อนที่ไปตามแนวยาวของโต๊ะ หรือตามแนวเอียงของลูกขั้น (Riffle) แร่หนักจะเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าทรายที่เบากว่า

3. โครงเหล็ก ส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ ทำให้โต๊ะเอียงได้ตามมุมต่างๆ

การทำงานของโต๊ะ

พื้นโต๊ะตั้งอยู่บนโครงเหล็ก มีกลไกประกอบทำให้จัดพื้นโต๊ะให้เอียง มีความสูงทางด้านรางน้ำและต่ำทางตรงข้าม น้ำจะถูกปล่อยให้ไหลลงตามรางและไหลแผ่ลงพื้นโต๊ะ ป้อนแร่ลงในช่องที่ป้อนแร่ มอเตอร์ไฟฟ้าจะขับเคลื่อนกลไกทำให้โต๊ะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและกระตุกกลับข้างหลังโดยเร็ว เม็ดแร่หนักจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ไกลกว่าเม็ดแร่เบาหรือกรวดทรายที่เบากว่าแต่มีขนาดเท่ากัน การเอียงของโต๊ะและการพัดพาของน้ำไหล แร่เบาและทรายจะถูกพัดพาออกมาทางด้านหางแร่ ส่วนแร่หนักหรือหัวแร่จะออกตอนปลายอีกด้านหนึ่งของโต๊ะ โดยน้ำทำหน้าที่เป็นสื่อแยกด้วย

สำหรับการจัดโต๊ะโดยทั่วไป ได้แก่ การจัดปริมาณน้ำ (Wash Water) ความเอียงของพื้นโต๊ะ (Slope) ความเร็วของจังหวะชัก (Speed) ความยาวช่วงชัก (Stroke) ของกลไกขับโต๊ะ (Head Motion) ปกติความเร็วของจังหวะประมาณ 180-270 ครั้งต่อนาที (Stroke per Minute) ความยาวช่วงชักประมาณ ½ ถึง 1 ½ นิ้ว

สำหรับการแต่งหัวแร่ขั้นต้น (Rougher Concentrate) ปล่อยน้ำมาก ป้อนแร่มาก จัดโต๊ะเอียงมาก และช่วงชักยาว

การแต่งหัวแร่สะอาด (Cleaner Concentrate) ปล่อยน้ำน้อย ป้อนแร่น้อย จัดโต๊ะเอียงน้อย และช่วงชักสั้น

สำหรับแร่ละเอียด ปล่อยน้ำน้อย ป้อนแร่ทีละน้อยๆ จังหวะเร็วแต่ช่วงชักสั้น

สำหรับแร่หยาบปล่อยน้ำมาก ป้อนแร่มาก จังหวะช้าและช่วงชักยาว

ความสามารถรับแร่ป้อนแร่ของโต๊ะแยกแร่ขึ้นอยู่กับขนาด ลักษณะ และชนิดของแร่ที่จะแยก แร่หยาบแยกได้เร็วและแร่ละเอียดแยกได้ช้า สำหรับโต๊ะใหญ่ขนาดกว้าง 5-6 ฟุต ยาว16 ฟุต ปกติแยกได้ประมาณ 1-5 ตัน ต่อชั่วโมง

ความสัมพันธ์ของโต๊ะ

1. **ความยาวช่วงชักและจังหวะ (Stroke and Speed)** ขึ้นอยู่กับความถ่วงจำเพาะของแร่และรูปร่างของเม็ดแร่ (Shape) ถ้าแร่มีความถ่วงจำเพาะสูงควรจัดจังหวะให้เร็ว เพราะแร่ต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งในการแยกความยาวของช่วงชักปกติ อาจตั้งได้กว้างถึง ½ นิ้ว ถึง 1 ½ นิ้ว แต่เม็ดแร่ขนาดเล็กใช้ 3/8นิ้ว 3/4นิ้ว 5/8นิ้ว

2. **ปริมาณแร่ที่โต๊ะขนาด Full Size จะแยกได้ (Through-put)** ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเม็ดแร่ เปอร์เซ็นต์ของหัวแร่ที่มีอยู่ในแร่ และความถ่วงจำเพาะของแร่ป้อน แร่หนัก และแร่เม็ดโต สำหรับแร่เม็ดใหญ่แยกได้เร็วกว่าแร่เบาหรือแร่เม็ดเล็ก อาจแยกได้ถึง 4-6 ตันต่อชั่วโมง ส่วนโต๊ะแยกแร่แบบละเอียด Slime Table อาจแยกได้เพียง 3-6 ตันต่อ 24 ชั่วโมง

3. **ความลาดเอียงของพื้นโต๊ะ (Slope)** ความลาดเอียงโดยทั่วไปประมาณ 3/4 องศา ถึง 1 1/4 องศา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเม็ดแร่หยาบหรือละเอียดและความถ่วงจำเพาะของแร่ด้วย

เครื่องเอนเนอร์ยีดิสเพอร์สิฟ เอกเรย์ (Energy Dispersive X-Ray: EDX)

ภาพที่ ก.8 เครื่องเอนเนอร์ยีดิสเพอร์สิฟ เอกซ์เรย์ (EDX)

ระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบ EDX เป็นระบบวิเคราะห์ธาตุที่นิยมใช้กันอย่างมากในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพราะติดตั้งเข้ากับกล้องจุลทรรศน์แบบทรานสมิชชันและแบบสแกนนิ่งได้ง่ายสามารถวิเคราะห์ธาตุทุกธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ในเวลาเพียงไม่กี่นาที แต่มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถจะวิเคราะห์ธาตุที่เบากว่าโซเดียม (Na^{11}) ได้และหัววัดเป็นแบบกึ่งตัวนำที่ใช้วัดรังสีต้องรักษาให้มีอุณหภูมิต่ำ ประมาณ 77°K โดยใช้ไนโตรเจนเหลวหล่อเย็นอยู่ตลอดเวลาทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง เครื่องวิเคราะห์ธาตุแบบนี้ อาจใช้การกระตุ้นด้วยไอโซโทปกัมมันตรังสีหรือหลอดรังสีเอกซ์ก็ได้ หลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้เป็นเป็นประเภทกำลังงานต่ำขนาด 10-50 W และสามารถให้กำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่มีพลังงานต่อเนื่องได้ตั้งแต่ 0-50 keV หัวรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือหัว

รังสีแบบกึ่งตัวนำ Si(Li) (Lithium drifted Silicon) เหมาะสมสำหรับการวัดรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 1.5-30 keV หรือหัววัด HPGe (High Purity Germanium) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์ได้ช่วงกว้าง 3-200 keV ถึงแม้หัววัด HPGe จะสามารถวัดรังสีเอกซ์ได้ช่วงกว้างกว่าก็จริง แต่ในการวิเคราะห์ธาตุเบาหัวรังสีแบบกึ่งตัวนำ Si(Li) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำในย่าน 1 keV ก็ยังมีความจำเป็นอยู่มาก หัววัดรังสีทั้ง Si(Li) และ HPGe จะเปลี่ยนพลังงานของรังสีเอกซ์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักดาไฟฟ้า โดยขนาดของของสัญญาณไฟฟ้าที่ออกจากหัววัดจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนหัววัด เครื่องวัด MCA จะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่อง และสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ออกทางจอภาพ หรือบันทึกสเปคตรัมลงในกระดาษกราฟ พร้อมทั้งผลวิเคราะห์เชิงปริมาณ ด้วยวิธีการของโปรแกรมสำเร็จที่มีอยู่ในเครื่องวัด MCA ซึ่งมีความซับซ้อนแตกต่างกันแล้วแต่แบบชนิดของบริษัทผู้ผลิต

เครื่องเอกซ์ เรย์ ดิฟแฟรคชั่น (X-Ray Diffraction)

ภาพที่ ก.9 เครื่องเอกซ์ เรย์ ดิฟแฟรคชั่น (X-Ray Diffraction)

เอกซ์ เรย์ ดิฟแฟรคชั่น (X-Ray Diffraction) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในรูปของสารประกอบ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย เครื่องเอกซ์ เรย์ ดิฟแฟรคชั่น (XRD) ถูกนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ในการค้นคว้าวิจัยสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นฐาน รวมทั้งในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ โดยทั่วไปสามารถประยุกต์ใช้ในด้านของธรณีวิทยา ในด้านของเคมีเกี่ยวกับอนินทรีย์สาร ในด้านของฟิสิกส์ ในด้านของการค้นคว้าวิจัยอุปกรณ์เครื่องมือ และในด้านของอุตสาหกรรมแร่ธาตุต่างๆ เป็นต้นหลักการทำงานของเครื่องเอกซ์ เรย์ ดิฟแฟรคโทมิเตอร์

(XRD) สามารถอธิบายได้ คือ ในอะตอมหนึ่งๆของธาตุใดๆจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ นิวเคลียส และอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนซึ่งเป็น Primary Electron ถูกยิงเข้าสู่ผิววัตถุก็จะเคลื่อนที่ไปชนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่รอบนิวเคลียสของอนุภาคแล้วสะท้อนกลับออกมา อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับออกมานี้เรียกว่า Backscatter Electron ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกชนได้รับการถ่ายเทพลังงาน Backscatter Electron ทำให้มีพลังงานสูงกว่าแรงดึงดูดจากนิวเคลียส จึงเคลื่อนที่หลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนตัวนี้เรียกว่า Secondary Electron หาก Secondary Electron เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรชั้นในแล้ว อิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอกที่มีพลังงานจลน์สูงกว่า ก็จะกระโดดเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะถูกตรวจจับโดยเครื่องตรวจจับสัญญาณและเนื่องจากว่าค่าพลังงานในแต่ละชั้น วงโคจรของในแต่ละธาตุ จะมีค่าเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับขนาดและรัศมีของวงโคจร จึงสามารถทราบได้ว่าเป็นธาตุใด ในขณะเดียวกันก็มี Primary Electron บางส่วน ที่ไม่ชนกับอิเล็กตรอนรอบวัตถุเลยและเคลื่อนที่ผ่านนิวเคลียส จึงถูกแรงดึงดูดจากนิวเคลียสเบี่ยงเบนแนวการเคลื่อนที่ให้วิ่งย้อนวนกลับขึ้นมา อิเล็กตรอนส่วนนี้เรียกว่า Auger Electron

จากสูตร $n\lambda = 2d\sin\theta$ (θ คือ มุมที่กวาดตอนทำ XRD)

ค่าที่สนใจคือค่า d ซึ่งคือ ระยะระหว่างอะตอมในผลึก อันเกิดจากการเชื่อมพันธะ ค่า d เป็นค่าเฉพาะในแต่ละธาตุ หาทราบค่านี้ก็จะทราบโครงสร้างของธาตุ ทำให้ทราบว่าธาตุที่วิเคราะห์เป็นธาตุใด และจาก $d = \lambda/(2\sin\theta)$ ก็จะสามารถบอกชนิดโครงสร้างของสารประกอบได้ ในการทำ XRD ดังนั้น เมื่อรังสีกระทบตัวอย่าง รังสีจะเกิดการกระจาย จึงต้องใช้ Collimator และ Crystal มาจับให้รวมกันเครื่องตรวจจับจึงสามารถตรวจจับและแปลข้อมูลออกเป็นกราฟได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะมีค่า

ผลการตรวจสอบปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองคำในตะกรันทุติยภูมิ

ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยีสำหรับการวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. 02-218-6772

CENTRE OF EXCELLENCE NUCLEAR TECHNOLOGY FOR MATERIAL ANALYSIS AND TESTING
PHAYA-THAI ROAD, PATUMWAN, BANGKOK 10330 THAILAND TEL. 02-218-6772

เอกสารเลขที่ RPTNT/03

ใบแจ้งผลการวิเคราะห์และทดสอบ

วันที่ 12 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2546

ส่วนที่1 รายละเอียด

ตัวอย่าง ตะกรันทุติยภูมิ(secondary slag)

ผู้ส่งตัวอย่าง นายอภิสิทธิ์ น้ำประสานไทย

วัตถุประสงค์ในการส่งตัวอย่าง วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของทองคำ

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ EDXRF

วิธีวิเคราะห์ Internal standard

วันที่วิเคราะห์ 10 มีนาคม พ.ศ. 2546

ผลการวิเคราะห์

Sample-No. 1

	%Au
1	0.1163 ± 0.0138

ลงชื่อ [illegible]
([illegible])
ผู้รับรองผลวิเคราะห์
วันที่ 12 / มี.ค. / 2546

ลงชื่อ [illegible]
([illegible])
ผู้อำนวยการศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์ฯ
วันที่ 12 / มี.ค. / 46

หมายเหตุ ผลการทดสอบที่ได้รับนี้เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ได้ส่งมาดำเนินการวิเคราะห์กับศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยีสำหรับการวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการตรวจสอบปริมาณความเข้มข้นของโลหะเงินในตะกรันทุติยภูมิ

แบบ วศ. 7

DEPARTMENT OF SCIENCE SERVICE
RAMA VI ROAD, RATCHATHEWI DISTRICT
BANGKOK 10400, THAILAND

Our Ref.No.0302/ 13454

Mr.Apisit Numprasanthai
Chulalongkorn University, Phaya-thai Rd.,
Patumwan,
Bangkok 10330

24 September 2003

Dear Sirs,

With reference to your request of 10 September 2003 Ref. No.6081 we are pleased to send you the following report on the sample/s of "Secondary Slag" received on 10 September 2003.

Bureau of Community Technology
Tel.0 2245 9159

Yours truly,

Rung-Arun Vatanawong

(Mrs.Rung-Arun Vatanawong)
Director, Bureau of Community Technology

REPORT

Sender's Sample Designation	Marking	Laboratory No.		
Secondary Slag	-	WV.424	Silver (Ag),%	0.29

Note 1. Chemical composition was analysed by X-ray Fluorescence Spectrometer (Uniquant 2 Software)
2. Percent; on dry basis

Arun Kongkaew

(Mr.Arun Kongkaew)
Scientist 6

Fee.800.-Baht.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The above report is valid for the received sample/s only. The report does not guarantee any such material of the same brand or marking which may be sold in the market
THIS REPORT IS NOT TO BE USED FOR ADVERTISING PURPOSES.

ผลการตรวจสอบปริมาณโลหะมีค่าหลังกระบวนการเก็บกลับคืนขั้นต้นโดยโต๊ะสั่น

umicore
Jewellery & Electroplating

Umicore Precious Metals (Thailand) Ltd.

Head office
23 /110-113 , Sorachai Bldg.,
25-28 Fl.,Sukhumvit Road,
North Klongtan, Wattana
Bangkok 10110 , Thailand
Phone (662) 714-3969
Fax (662) 714-4224

Refinery Factory
47/33 Moo 4, Sukhapibal 2 Road
Dokmai, Prawet, Bangkok 10250
Phone : (662) 727-0234-7
Fax : (662) 727-0238

To : คุณอภิสิทธิ์
Fax : คณะวิศวกรรมศาสตร์ภาควิชาเหมืองแร่
Attn : 01-705-8707 , fax 02-218 6920
CC. :

Date : October 10, 2003

ASSAY RESULTS
RECEIPT NO. : 06864

Bar no.	Weight in grams		Au		AG		PT x 0.98		PD x 0.98	
	Received	Return	%	Fine	%	Fine	%	Fine	%	Fine
Middle	11.40	9.96	0.21		0.25		-	-		
Tailing	14.21	13.06	0.03		0.07		-	-		-
Concentrate	11.45	10.26	1.91		5.64		-	-		-
						-	-	-		-
				-		-	-	-		-
				-		-	-	-		-
				-		-	-	-		-
				-		-	-	-		-
				-		-		-		-

We would consider the above accepted if we do not hear from you within five (5) working days from today.

Yours sincerely
Umicore Precious Metals (Thailand) Ltd.

Acceptance / Date

This certificate has been issued for testing purposes only. Umicore Precious Metals (Thailand) Ltd. shall bear no commitment or liability arising from the testing result.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอภิสิทธิ์ น้ำประสานไทย เกิดเมื่อวันอังคารที่ 13 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 จบการศึกษาปริญญาวิทยาศาตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์(อัญมณีและเครื่องประดับ) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร) เข้าศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 ประสบการณ์ด้านการทำงาน ได้แก่ ผ่านการฝึกอบรมการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพพลอย ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นผู้ช่วยนักวิจัย ในโครงการวิจัยอนุรักษ์และฟื้นฟูเขานางพันธุรัต (เขาเจ้าลายใหญ่) อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี เข้าทำงานในบริษัท YOOLIM SILVER CO.Ltd., ในตำแหน่งหัวหน้างานแผนกพัฒนาผลิตภัณฑ์และออกแบบเครื่องประดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย