

การเก็บกลับคืน โลหะทองแดงในตะกรันจากกระบวนการผลิตทองแดงด้วยเทคนิคทางฟิสิกส์



นายคณิตภูมิ พิบูลนุรักษ์

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

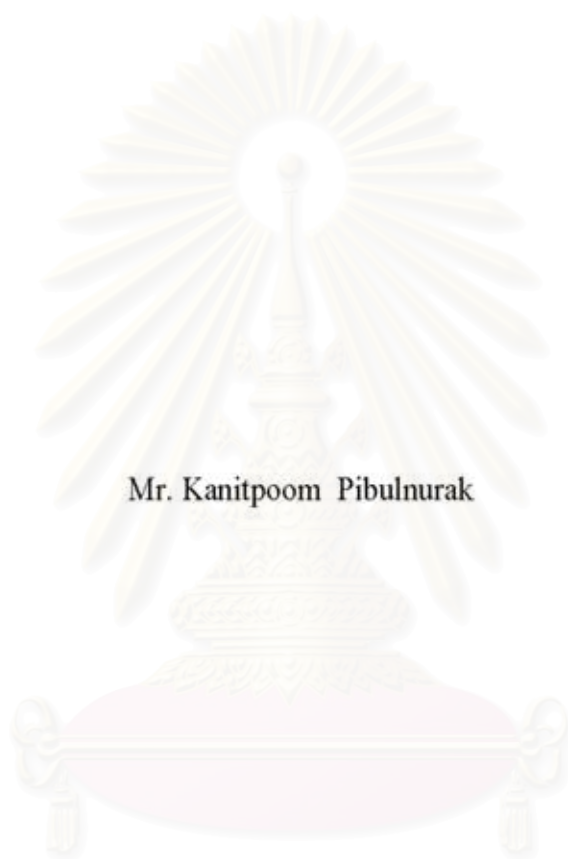
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECOVERY OF COPPER FROM COPPER SLAG BY PHYSICAL  
SEPARATION TECHNIQUE



Mr. Kanitpoom Pibulnurak

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering  
Department of Mining and Petroleum Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2007  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงในตะกรันจากกระบวนการผลิตทองแดง  
   ด้วยเทคนิคทางฟิสิกส์

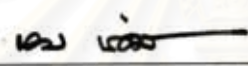
โดย                              นายคณิตภูมิ พิบูลนุรักษ์

สาขาวิชา                      วิศวกรรมทรัพยากรธรณี


อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีขำนะ

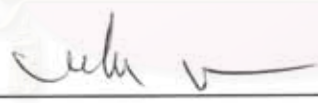
---

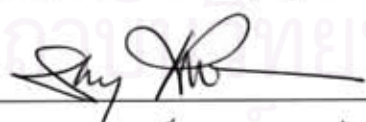
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
\_\_\_\_\_      คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
\_\_\_\_\_      ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. คาวัลย์ วิวรรณะเดช)

  
\_\_\_\_\_      อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีขำนะ)

  
\_\_\_\_\_      กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนทร พุ่มจันทร์)

  
\_\_\_\_\_      กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์)

คณิตภูมิ พิบูลนุรักษ์: การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงในตะกรันจากกระบวนการผลิตทองแดงด้วยเทคนิคทางฟิสิกส์ (RECOVERY OF COPPER FROM COPPER SLAG BY PHYSICAL SEPARATION TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษา: รศ. ดร. ภิญญา มีจันทร์, 59 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะแยกหัวตะกรันทองแดงออกจากตะกรันทองแดงซึ่งเป็นของเสียจากโรงถลุงทองแดงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ตะกรันทองแดงที่ใช้ในการศึกษานี้มีปริมาณทองแดงอยู่ 7.82 เปอร์เซ็นต์ถูกนำมาทดลองแยกด้วยวิธีโต๊ะสั่น และการลอยแยกเพื่อการเปรียบเทียบ จากการทดลองแยกด้วยโต๊ะสั่นพบว่าการนำตะกรันมาบดด้วยเครื่องบดลูกป็นกลมจนมีขนาดเล็กกว่า 120 เมช ทั้งหมด สามารถแยกหัวตะกรันทองแดงที่มีปริมาณทองแดงสูงถึง 25.68 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการเก็บคืนโลหะทองแดงต่ำเพียง 12.97 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงทำการทดลองแยกด้วยวิธีลอยแยกพบว่า การนำตะกรันมาบดด้วยเครื่องบดลูกป็นกลมจนมีขนาดเล็กกว่า 100 เมช ทั้งหมด สามารถลอยแยกหัวตะกรันทองแดงที่มีปริมาณทองแดงถึง 25.91 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการเก็บกลับคืนสูงถึง 91.44 เปอร์เซ็นต์ หัวตะกรันทองแดงจากการแยกทั้ง 2 วิธีสามารถแยกออกมาเพื่อนำมาป้อนให้แก่โรงถลุงทองแดงได้ เนื่องจากมีปริมาณทองแดงสูงกว่า 23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งกำหนดไว้สำหรับทองแดงที่ป้อนเข้าโรงถลุงทองแดง แต่ปริมาณการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงด้วยการลอยแยกสามารถให้การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงที่สูงกว่า ดังนั้นจึงควรแยกตะกรันทองแดงด้วยวิธีการลอยแยก

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม  
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี  
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4770232521 : MAJOR MINING ENGINEERING

KEY WORD: COPPER SLAG / COPPER RECOVERY / XRF / XRD / ICPS

KANITPOOM PIBULNURAK : RECOVERY OF COPPER FROM COPPER SLAG BY PHYSICAL SEPARATION TECHNIQUE. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PINYO MEECHAMNA, Ph.D, 59 pp.

The aim of this research is to separate copper concentrate from copper slag which is the waste from copper smelter for recycling. Copper slag containing 7.82 % Cu was tested to comparably separate the copper concentrates by shaking table and froth flotation method. The shaking table test was to grind the copper slag to be less than 120 mesh and then fed to shaking table. The copper concentrate obtained was found to contain 25.68 % Cu with the lower recovery of 12.97 %. Froth flotation is then proposed to separate the copper concentrate from the slag. Grinding of copper slag to be less than 100 mesh and then fed through flotation cell was tried to obtained copper concentrate containing 25.91 % Cu with the higher recovery of 91.44 %. The copper concentrates obtained from both tests can be recycled as the feed for copper smelter as they contain more than 23 % copper (as specified by copper smelter). Therefore, froth flotation is recommended to separate copper concentrate from the copper slag.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Mining and Petroleum Engineering  
Field of study Georesources Engineering  
Academic year 2007

Student's signature.....  
Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ผู้ทำการวิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งให้คำปรึกษาในการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. คาวลีย์ วิวโรชนะเดช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. สุนทร พุ่มจันทร์ อาจารย์ ดร. จิตศักดิ์ บุญปราโมทย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ คุณอุทิศ ทองกลิ้ง คุณพงษ์ธร รุ่งเจริญ คุณระวิน อยู่ใจ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการ ตลอดจนขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชากรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมทุกท่านที่ให้แนวคิดและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และอำนวยความสะดวกตลอดการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ผู้ทำการวิจัยใคร่ขอขอบคุณ บริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างตะกั่วทองแดงสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชาย ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดี โดยเฉพาะด้านการศึกษางานสามารถสำเร็จได้ดังเจตนารมณ์ และท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ถึคกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
1    บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2    ปริทรรศน์วรรณกรรม.....	5
2.1 กรรมวิธีการผลิตทองแดงบริสุทธิ์ของบริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสตรี จำกัด (มหาชน).....	5
2.2 เทคโนโลยีหลักที่เลือกใช้ในกระบวนการผลิตของ บริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสตรี จำกัด (มหาชน).....	9
2.3 การประยุกต์ใช้แร่ทองแดงในปัจจุบัน.....	9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.4.1 นายอภิสิทธิ์ น้าประสาน ไทย.....	9
2.4.2 A. Sarrati, B. Rahmati, H.R. Hassani and H.H.A. Shrirazi (2003).....	11

	2.4.3 W.J.Bruckard ,M. Somerville and F. Hao (2004).....	12
3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	13
	3.1 แผนการศึกษาวิจัย.....	13
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย.....	13
	3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	13
	3.4 วัตถุประสงค์.....	14
	3.5 ขั้นตอนในการทดลอง.....	15
	3.5.1 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณการกระจายตัวของ โลหะทองแดงและธาตุองค์ประกอบอื่น ในตะกอนด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF).....	18
	3.5.2 ขั้นตอนการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทองแดง โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟ แฟร็ก โทมิเตอร์ (XRD).....	18
	3.5.3 การเตรียมตัวอย่าง โดยการลดขนาดด้วยลูกป็นกลม (Ball Mill).....	18
	3.5.4 การเตรียมตัวอย่าง โดยการคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน(Sieve).....	19
	3.5.5 การแต่งแร่ด้วยตะกอนทองแดง โดยอาศัยความแตกต่างของ ความถ่วงจำเพาะด้วย โต๊ะสั่น(Shaking Table).....	19
	3.5.6 การแต่งแร่ตะกอนทองแดง โดยใช้กระบวนการลอยแยก(Float Flotation).....	21
4	รายงานผลการทดลอง.....	23
	4.1 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในตะกอนทองแดง โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็ก โทมิเตอร์ (XRD).....	23
	4.2 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในตะกอนทองแดง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์อินดักทีฟลิคิฟเพิล พลาสมาสเปกโตรสโคปี(ICPS).....	25
	4.3 ผลการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงด้วยโต๊ะสั่น (Shaking table).....	25
	4.3.1 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ออกจากตะกอนด้วยโต๊ะสั่น.....	25
	4.3.2 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ออกจากตะกอนด้วยโต๊ะสั่น.....	25
	4.3.3 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ออกจากตะกอนด้วยโต๊ะสั่น.....	28
	4.3.4 วิเคราะห์ผลการแยกทองแดงด้วยโต๊ะสั่น.....	28



4.4	ผลการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากตะกั่วทองแดงด้วยกระบวนการลอยแร่(Froth Flotation)..28	
4.4.1	ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยการลอยแยก.....29	
4.4.2	ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยการลอยแยก.....29	
4.4.3	ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยการลอยแยก.....29	
4.4.4	วิจารณ์ผลการแยกทองแดงด้วยการลอยแยก.....34	
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....35	
5.1	สรุปผลการทดลอง.....35	
5.1.1	ผลการทดลองแต่งตะกั่วทองแดงด้วยโต๊ะต้น.....35	
5.1.2	ผลการทดลองแต่งตะกั่วทองแดงด้วยกระบวนการลอยแยก.....35	
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย.....38	
	รายการอ้างอิง.....39	
	ภาคผนวก ก. เครื่องบดแร่แบบบดด้วยลูกป้อนกลม.....41	
	ภาคผนวก ข. ตะแกรงมาตรฐาน..... 42	
	ภาคผนวก ค. เครื่องเอกซ์ เรย์ ดิฟแฟรค โดมิเตอร์.....44	
	ภาคผนวก ง. เครื่องเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์สเปก โทโร โกปี.....46	
	ภาคผนวก จ. เครื่องวิเคราะห์อินดักทีฟสเปกโทรสโกปี.....48	
	ภาคผนวก ฉ. เครื่องแยกโดยการเคลื่อนที่ในของเหลวหรือน้ำเป็นชั้นบางและมีการเคลื่อนที่ในแนวราบ..... 49	
	ภาคผนวก ช. การคัดแยกด้วยการลอย..... 52	
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....59	

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สภาวะการลอยแร่ที่ศึกษาโดย A.Sarrati , B.Rahmati,H.R.Hassani and H.H.A. Shirazi (2003).....	11
ตารางที่ 2.2	แสดงสารเคมีที่ใช้ในการศึกษา และ หน้าที่ของสารเคมี โดย W.J. Bruckard ,M. Somerville and F. Hao (2004) .....	12
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรสภาวะการทำงานของ โตะ สั่น แยก แร่.....	20
ตารางที่ 3.2	สภาวะการลอยแยกที่ได้ผลดีที่สุด.....	21
ตารางที่ 4.1	ผลการคัดแยกตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วย โตะ สั่น.....	26
ตารางที่ 4.2	ผลการคัดแยกตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วย โตะ สั่น.....	27
ตารางที่ 4.3	ผลการคัดแยกตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วย โตะ สั่น.....	30
ตารางที่ 4.4	ผลการเก็บกลับคืนตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยการลอยแยก.....	31
ตารางที่ 4.5	ผลการเก็บกลับคืนตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยการลอยแยก.....	32
ตารางที่ 4.6	ผลการเก็บกลับคืนตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยการลอยแยก.....	33
ตารางที่ 5.1	เปรียบเทียบผลของการแต่งแร่ที่ได้ผลโดยรวมที่ดีที่สุดของ วิธี โตะ สั่น กับ วิธีการลอยแยก.....	38

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปลูกภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	แผนภาพแสดงการผลิตทองแดง 99.99% ของบริษัท ไทยคอปเปอร์อินดัสทรี จำกัด (มหาชน).....	6
รูปที่ 2.2	แผนผังกระบวนการขั้นตอนของการเก็บกลับคืน โลหะมีค่าในตะกรันทุติยภูมิ จากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ ของนายอภิสิทธิ์ น้าประสานไทย (2544).....	10
รูปที่ 3.1	กองตะกรันทองแดงของบริษัท ไทยคอปเปอร์อินดัสทรี จำกัด (มหาชน).....	14
รูปที่ 3.2	ลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดงของบริษัท ไทยคอปเปอร์อินดัสทรี จำกัด (มหาชน).....	14
รูปที่ 3.3	แสดงแผนผังกระบวนการศึกษาขั้นตอนการเก็บกลับคืนตะกรันทองแดงด้วยวิธี โด้ะสัน.....	16
รูปที่ 3.4	แสดงแผนผังกระบวนการศึกษาขั้นตอนการเก็บกลับคืนตะกรันทองแดงด้วยวิธีลอยแยก.....	17
รูปที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์สารประกอบในตะกรันทองแดง โดยใช้เทคนิค XRD.....	23
รูปที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตะกรันทองแดงเปรียบเทียบระหว่างแร่ป้อน (Feed) กับ หัวแร่ (Conc) ที่ผ่านกระบวนการ โด้ะสันเบื้องต้น โดยใช้เทคนิค XRF.....	24
รูปที่ 4.3	แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดง ขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วย โด้ะสัน .....	26
รูปที่ 4.4	แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดง ขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วย โด้ะสัน .....	27
รูปที่ 4.5	แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดง ขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วย โด้ะสัน .....	30
รูปที่ 4.6	แผนผังแสดงขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงจากตะกรัน ขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วย กระบวนการลอยแยก.....	31
รูปที่ 4.7	แผนผังแสดงขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงจากตะกรัน ขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วย กระบวนการลอยแยก.....	32
รูปที่ 4.8	แผนผังแสดงขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงจากตะกรัน ขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วย กระบวนการลอยแยก.....	33
รูปที่ 5.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดง ขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วย โด้ะสัน .....	36
รูปที่ 5.2	แผนผังแสดงขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงจากตะกรัน ขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วย กระบวนการลอยแยก.....	37

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การใช้ประโยชน์แหล่งทรัพยากรในปัจจุบันเป็นไปเพื่อตอบสนองความต้องการการบริโภคที่มีอัตราเพิ่มขึ้น ทรัพยากรที่สามารถเกิดทดแทนขึ้นได้ใหม่ก็จะต้องมีปริมาณมากขึ้นในอัตราเดียวกันด้วย แต่ทรัพยากรที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่ก็จะหมดเปลืองไปอย่างรวดเร็วจนถึงระดับที่ขาดแคลนถ้าอัตราการบริโภคยังคงดำเนินต่อไป หรือ ไม่มีการเก็บกลับคืนมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ แหล่งทรัพยากรที่เป็นแหล่งของวัตถุดิบจึงมีปริมาณจำกัดแน่นอนปริมาณหนึ่ง ดังนั้น การหมดเปลืองของทรัพยากรเช่นนี้เป็นเรื่องที่มีความสำคัญต่อการใช้ประโยชน์ทรัพยากรในอนาคต (ขวัญชัย ลิเผ่าพันธุ์, 2549)

การพัฒนาที่ยั่งยืนเป็นแนวทางของการพัฒนาที่มุ่งเน้นความสมดุลที่พอดีของความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การป้องกันรักษาสิ่งแวดล้อมและการเพิ่มพูนคุณภาพชีวิตของคนในสังคม โดยมีการบริหารจัดการที่ดี โดยการใช้แหล่งทรัพยากรเพื่อการพัฒนาจึงต้องให้ความสำคัญในการจัดการให้เกิดประโยชน์เต็มที่ตามแนวทางดังกล่าวนี้ อย่างมีประสิทธิภาพ คู่คุณค่าในเชิงพาณิชย์ และการพัฒนาที่ยั่งยืนก่อให้เกิดประโยชน์ต่อคุณภาพชีวิตและมีส่วนร่วมของคนในสังคม อีกทั้งยึดอายุการใช้งานของแหล่งทรัพยากรให้ใช้ได้อย่างยั่งยืนยาวนาน กฎของการใช้ทรัพยากรจึงควรต้องคำนึงถึงหลักปฏิบัติสำคัญดังนี้

1. มีอัตราการเก็บทรัพยากรนำมาใช้ประโยชน์สูงสุดที่ยังคู่คุณค่าในทางเศรษฐกิจ
2. มีการป้องกันและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมโดยใช้เทคโนโลยีที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ
3. มีการปรับปรุงฟื้นฟูพื้นที่แหล่งทรัพยากรที่ผ่านการใช้ประโยชน์แล้วให้มีสภาพที่สามารถใช้ประโยชน์พื้นที่ในด้านอื่นๆ ได้อีก
4. มีการเก็บกลับคืนและนำทรัพยากรจากแหล่งทุติยภูมิมาใช้ประโยชน์ใหม่มากที่สุดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

การเก็บกลับคืนทรัพยากรและนำกลับมาใช้ใหม่ (Resource Recovery and Recycling) คือการเก็บกลับคืนจากแหล่งทุติยภูมิที่มาจากแหล่งปฐมภูมิที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยที่ แหล่งทุติยภูมิดังกล่าวรวมถึงแหล่งของเสียหรือของใช้แล้วทิ้งแล้ว แหล่งผลิตด้วยคุณภาพค้ำทิ้ง เศษวัสดุและ

กากเหลือทิ้ง ซากบรรจุภัณฑ์ กองเศษวัสดุและวัตถุอันตรายจากแหล่งปฐมภูมิ รวมทั้งแหล่งทรัพยากรที่มีปริมาณวัตถุดิบต่ำกว่าระดับที่สามารถเก็บมาใช้ประโยชน์โดยกระบวนการที่ใช้กันโดยทั่วไปอย่างคุ้มค่าเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน

การเก็บกลับคืนทรัพยากรและนำกลับมาใช้ใหม่จึงมีหัวข้อที่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อเรื่องสำคัญ 3 ข้อคือ

1. ขีดอายุการใช้งานของแหล่งทรัพยากรที่สิ้นเปลืองและไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้
2. ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดมลพิษที่เกิดจากกระบวนการใช้แหล่งทรัพยากรปฐมภูมิ
3. ลดการใช้พลังงานในการผลิตวัตถุดิบเมื่อเทียบกับการผลิตวัตถุดิบจากแหล่งปฐมภูมิ

การเก็บกลับคืนทรัพยากรและการนำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นเรื่องสำคัญในการที่จะอนุรักษ์ทรัพยากร โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเก็บกลับคืนทรัพยากรจากเศษวัสดุของเหลือทิ้งแล้วหรือของเสียจากอุตสาหกรรมหรือขยะจากบ้านเรือน คือการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมและมีคุณภาพในกระบวนการคัดแยกและปรับปรุงคุณภาพวัสดุให้มีความบริสุทธิ์เพียงพอที่จะนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการเดิมหรือกระบวนการอื่น ดังนั้นความเข้าใจในคุณลักษณะของวัสดุเหลือใช้หรือของเสียที่ทิ้งแล้ว จะสามารถออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการในการเก็บกลับคืนอย่างมีประสิทธิภาพในเชิงพาณิชย์และสามารถวางแผนในการจัดหาวัตถุดิบทดแทนจากแหล่งทุติยภูมิเพื่อใช้ประโยชน์ทรัพยากรอย่างยั่งยืนและรองรับเงื่อนไขในด้านมาตรการข้อกำหนด ด้านสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์ทรัพยากรที่เป็นสากล ขอบเขตของการนำกลับมาใช้ใหม่ในความหมายที่กว้างขึ้น โดยครอบคลุมตั้งแต่

1. การลดปริมาณของเสียเศษวัสดุเหลือทิ้ง
2. การใช้ซ้ำในรูปของผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์
3. การใช้ในรูปของวัตถุดิบหรือวัสดุที่คัดแยกได้ในกระบวนการเดิมหรือกระบวนการใหม่
4. การเก็บคืนและใช้พลังงานความร้อนจากของเสีย
5. การลดมลพิษจากของเสียในเศษวัสดุเหลือทิ้งสุดท้าย

โดยทั่วไปการผลิตทองแดงด้วยกระบวนการถลุงทองแดง จะเกิด ตะกั่วทองแดงจำนวนมาก และในส่วนประกอบของตะกั่วทองแดง ยังคงมีแร่ทองแดงอยู่ปริมาณหนึ่ง ซึ่งปริมาณของแร่ทองแดงในตะกั่วทองแดงมีน้อยเกินกว่าที่จะนำเข้าสู่กระบวนการถลุงทองแดงได้ และในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีกระบวนการจัดการกับตะกั่วทองแดงเหล่านี้ให้เหมาะสม ดังนั้นการศึกษาการ

เก็บกลับคืนตะกรันทองแดงจะเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตแร่ทองแดงให้มีประโยชน์และคุ้มค่าที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาองค์ประกอบของทองแดง ในตะกรันทองแดง
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเก็บกลับคืนทองแดง ในตะกรันทองแดงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการแยกโดย โตะสั้น และ การลอยแร่
3. เพื่อเก็บกลับคืนแร่ทองแดงจากตะกรันทองแดงเพื่อเอาไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ชักตัวอย่าง ตะกรันทองแดงจาก กระบวนการถลุงทองแดงของ บริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสตรี จำกัด (มหาชน)
2. วิเคราะห์โลหะทองแดงในตะกรันทองแดง
3. ศึกษาวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในตะกรัน โดยใช้เครื่อง เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ และ เครื่องอินดักทีฟพลาสมาสเปกโตรสโกปี
4. ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างและองค์ประกอบโดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์
5. เสนอแนะแนวทางที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืน โลหะทองแดงโดยพิจารณาจากการกระจายตัวและองค์ประกอบต่างๆที่ได้จากการศึกษา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจลักษณะการกระจายตัวแร่ทองแดง ในตะกรันทองแดงเพื่อเสนอแนะขั้นตอนและวิธีที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. เข้าใจลักษณะองค์ประกอบของแร่ทองแดง ในตะกรันทองแดงเพื่อเสนอแนะขั้นตอนและวิธีที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. เพื่อให้ทราบถึงขั้นตอนและวิธีที่เหมาะสมซึ่งเป็นแนวทางที่จะสามารถพัฒนาวิธีการเก็บกลับคืนโลหะทองแดง ในตะกรันทองแดงได้ อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

4. เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน ในการใช้ประโยชน์ จากทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่ามากที่สุด
5. ลดการใช้ทรัพยากรและพลังงานในการผลิตทองแดงลงได้
6. ลดปริมาณการทิ้งขยะตะกรันทองแดง
7. นำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์เป็นความรู้พื้นฐาน ในการพัฒนาศักยภาพในการแต่งแร่เพื่อ  
ธุรกิจรีไซเคิลในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 ปฏิกิริยาวัฏจักร

ในกระบวนการถลุงทองแดง จะเกิด ตะกั่วจำนวนมาก และในตะกั่วยังคงมีที่มีปริมาณทองแดงหลงเหลืออยู่จำนวนหนึ่งแต่ไม่เพียงพอที่จะนำกลับเข้ามาถลุงใหม่ได้เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยเกินไป จึงเป็นที่มาของการศึกษาการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกั่ว เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติให้ได้คุ้มค่าที่สุด

### 2.1 กรรมวิธีการผลิตทองแดงบริสุทธิ์ ของบริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

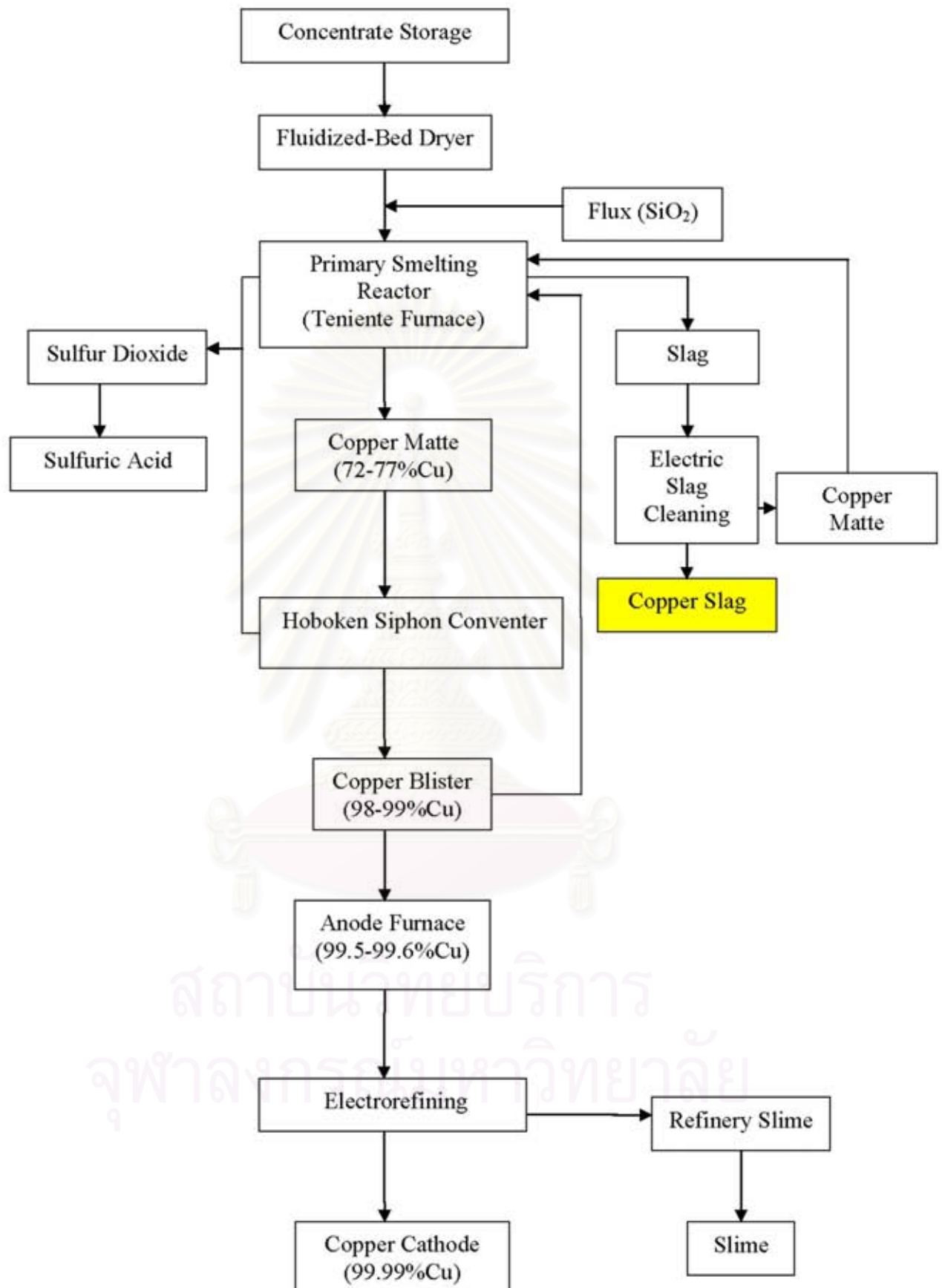
กระบวนการผลิตทองแดงบริสุทธิ์ ของบริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ประกอบด้วยการถลุงสินแร่ทองแดง (Copper Concentrate) ให้บริสุทธิ์ 99.99% นั้นบริษัท จะจัดซื้อสินแร่ทองแดงจากต่างประเทศ เช่น ออสเตรเลีย อินโดนีเซีย และแหล่งแร่ต่างๆ ในอเมริกาใต้ เป็นต้น โดยสินแร่ที่จัดซื้อนี้ปกติมีปริมาณทองแดงเฉลี่ยประมาณ 23-32% โดยการขนส่งทางเรือครั้งละประมาณ 10,000 ถึง 20,000 ตัน [ไทยคอปเปอร์ อินดัสทรี จำกัด (มหาชน) , 2007]

ผลผลิตของโรงงาน คือ ทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ปีละ 165,000 ตัน และกรดกำมะถัน 98.5% ประมาณปีละ 470,00 ตัน มีผลิตภัณฑ์พลอยได้คือ ตะกั่วของ โลหะมีค่า รวมทั้งเงินและทองคำปะปนอยู่ (Refinery Slime) ประมาณปีละ 300 ตัน และตะกั่วทองแดง (Copper Slag) ปีละประมาณ 400,000 ตัน

กระบวนการผลิตทองแดงบริสุทธิ์ของบริษัทสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.1 โดยเริ่มจากการนำสินแร่ที่มีเปอร์เซ็นต์ทองแดงในสัดส่วนสูง หรือหัวแร่ทองแดง(Copper Concentrate) 23-32% ไปถลุงจนได้โลหะทองแดง หลังจากนั้นนำไปผ่านขั้นตอนการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้ทองแดงบริสุทธิ์ประมาณ 99.99% โดยน้ำหนัก ดังมีรายละเอียดการผลิต ดังนี้

- หัวแร่ทองแดง (Copper Concentrate) หัวแร่ทองแดงที่ใช้เป็นวัตถุดิบ นำเข้าจากต่างประเทศโดยทางเรือ โดยมีระวางบรรทุกแต่ละเที่ยวประมาณ 10,000 หรือ 20,000 ตัน เพื่อให้ได้ทองแดงบริสุทธิ์(99.99%)ปีละ 165,000 ตัน จึงมีการนำเข้าหัวแร่ทองแดงประมาณปีละ 600,000 ตัน หัวแร่ทองแดงเหล่านี้เมื่อถึงท่าเรือจะมีการขนถ่ายและบรรทุกโดยรถบรรทุก ลำเลียงมาเก็บใน โกดังเก็บแร่





รูปที่ 2.1 แผนภาพการผลิตทองแดง 99.99% ของ บริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสตรี จำกัด (มหาชน)

- เตาอบแห้ง (Fluidized Bed Dryer) ก่อนส่งหัวแร่ทองแดงนี้เข้ากระบวนการถลุงในเตา ต้องนำมาผ่านกระบวนการอบแห้งก่อนภายในเตาที่เรียกว่า Fluidized Bed Dryer โดยใช้เชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติ
- เตาถลุงเบื้องต้น (Primary Smelting Reactor) ขั้นตอนนี้เป็นการนำสัดส่วนผสมของ หัวแร่ทองแดงที่อบแห้งแล้ว และทราย ( $\text{SiO}_2$ ) ใช้เป็นฟลักซ์ ป้อนเข้าสู่เตาถลุงเบื้องต้น ที่มีชื่อเรียกว่า Teniente Furnace เพื่อทำการถลุงหัวแร่ผสมโดยใช้ความร้อนที่ได้จาก ปฏิกิริยาของออกซิเจนกับสารในสินแร่ที่อุณหภูมิ 1,230-1,250 องศาเซลเซียส ทำให้ หัวแร่ทองแดงหลอมละลายและแยกตัวออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเรียกว่า Copper Matte มีส่วนประกอบของคอปเปอร์ซัลไฟด์ ( $\text{CuS}$ ) เป็นหลัก และส่วนที่สองเรียก Slag ซึ่งประกอบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นหลัก Copper Matte ซึ่งมีทองแดงประมาณ 72-77% จะถูกนำออกทางท้ายเตาด้านล่างเป็นระยะๆ ส่วน Slag ซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบของเหล็ก และซิลิกาจะถูกนำออกเป็นระยะๆเช่นกันจากทางด้านท้ายเตา ในตำแหน่งที่สูงขึ้นไป ทั้งนี้ในกระบวนการถลุงมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดขึ้นจาก ปฏิกิริยาของกำมะถันและออกซิเจน ซึ่งจะถูกดูดออกจาก Hood ส่งต่อไปยังโรงผลิต กรดกำมะถัน
- เตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Slag Cleaning Furnace) ตะกรันที่ได้จากเตา Teniente Furnace ยังคงมีทองแดงหลงเหลืออยู่ จึงนำเข้าสู่เตาอาร์คไฟฟ้า เพื่อหลอมละลาย ตะกรันต่อที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส หลังจากทิ้งให้ทองแดง (Copper Matte) แยกตัวออกจากตะกรันจึงนำทองแดง (Copper Matte) ที่แยกได้จากเตาอาร์คกลับไปยัง เตาถลุงเบื้องต้นอีกครั้ง ส่วนตะกรันที่มีทองแดงเหลืออยู่น้อยมากจะถูกเตาอาร์คไปทำให้เป็นเม็ดเพื่อ จำหน่ายต่อไป
- เตาคอนเวอร์เตอร์ (Hoboken Syphon Converters) Copper Matte ที่นำออกจากเตา ถลุงเบื้องต้น (Teniente Furnace) ซึ่งประกอบด้วยทองแดง 72-77% จะถูกส่งเข้าเตา คอนเวอร์เตอร์ที่มีชื่อเรียกว่า Hoboken Syphon Converters ขั้นตอนนี้มีกำมะถันที่ มีออกซิเจนในปริมาณสูงทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์ซัลไฟด์ ( $\text{CuS}$ ) จนได้น้ำ โลหะทองแดงที่เรียกว่า Copper Blister ซึ่งมีทองแดงประมาณ 98-99% ก่อนนำออก จากเตาไปถลุงต่อที่เตาอาโหนดในขั้นถัดไป นอกจากนี้ในกระบวนการถลุงของเตา คอนเวอร์เตอร์จะมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งจะถูกดูดออกแล้วส่งไปยัง โรงผลิตกรด กำมะถัน เช่นเดียวกัน ในขั้นตอนนี้ จะมี ทองแดงผสมอยู่กับ Copper Slag บ้างส่วน (Copper Revert) ที่เกิดขึ้นจะนำกลับไปถลุงรวมกับแร่ต่อที่เตาถลุงเบื้องต้น

- เตาอาโนด (Anode Furnace) Blister Copper จากเตาคอนเวอร์เตอร์จะถูกทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยอากาศที่มีออกซิเจนสูงอีกระยะหนึ่ง จากนั้นต่อด้วยกระบวนการรีดักชันด้วยก๊าซธรรมชาติ เพื่อกำจัดออกซิเจนส่วนเกินให้หมดไป ทำให้ได้ ทองแดงอาโนดที่มีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.5-99.6%
- เครื่องหล่อแผ่นทองแดงอาโนด (Anode Casting Wheel) ทองแดงอาโนดที่ได้จากเตาอาโนดถูกเทผ่านรางลงในเครื่องหล่อแผ่นทองแดง Casting Wheel ที่ควบคุมการทำงานในระบบอัตโนมัติได้แผ่นทองแดงอาโนด ที่มีขนาดและน้ำหนัก ประมาณ 375 กิโลกรัม ตามที่ความต้องการเพื่อส่งไปทำให้บริสุทธิ์ขั้นตอนสุดท้ายที่โรงแยกด้วยไฟฟ้า (Electrorefining)
- ระบบแยกด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrorefining) ในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดัน 120 โวลต์ 330 แอมป์ต่อตารางเมตร ในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ประกอบด้วยแผ่นขั้วบวกและขั้วลบอยู่ในจำนวนทั้งสิ้น 550 เซลล์ เซลล์ที่ทำด้วยโพลีเมอร์คอนกรีตมีลักษณะเป็นบ่อยาวประมาณ 6 เมตร ในแต่ละบ่อจะมีแผ่นขั้วบวกที่เป็นแผ่นทองแดงอาโนด 61 แผ่น และแผ่นขั้วลบที่เรียกว่า แคโทด ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Sheet) 60 แผ่น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแต่ละเซลล์ จะทำให้อนุภาคทองแดงเลื่อนจากขั้วบวกอาโนด ไปจับที่ขั้วลบแคโทด ทุกๆ 7 วันจะสามารถยกแผ่นแคโทดเพื่อชะทองแดงออกด้วยเครื่องอัตโนมัติ แผ่นแคโทดนี้มีขนาดประมาณ 1x1 เมตร หนาประมาณ 8-9 มิลลิเมตร หนักประมาณ 80 กิโลกรัม เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่าย มีความบริสุทธิ์เป็นทองแดง 99.99% ส่วนแผ่นอาโนดจะสึกกร่อนไปเรื่อยๆ ทั้งนี้ประมาณทุก 21 วันจะมีการยกแผ่นอาโนดขึ้นเพื่อเปลี่ยนแผ่นใหม่เข้าแทนที่ในเซลล์ ส่วนแผ่นที่ใช้แล้วจะถูกนำกลับไปหลอมใหม่ที่เตาคอนเวอร์เตอร์
- ระบบผลิต Refinery Slime (Slime Treatment) Slime คือตะกอนของโลหะมีค่า รวมทั้งเงินและทองคำปะปนอยู่ ทั้งนี้ Slime จะตกตะกอนที่ก้นบ่อเซลล์ Slime จะถูกกวาดออกจากเซลล์ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแผ่นอาโนด จากนั้นนำไปล้างและแยกทองแดงออก พร้อมทั้งทำการอบแห้งก่อนบรรจุในถังเพื่อรอจำหน่ายให้โรงถลุงทองคำในขั้นตอนต่อไป

## 2.2 เทคโนโลยีหลักที่เลือกใช้ในกระบวนการผลิต ของบริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

- เตาถลุงเบื้องต้น ใช้เทคโนโลยีจากบริษัท Codelco ซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจของประเทศชิลี เป็นผู้ผลิตทองแดงรายใหญ่ที่สุดของโลก เรียกเตาถลุงนี้ว่า Teniente Furnace
- เตาคอนเวอร์เตอร์ ใช้เทคโนโลยีจากบริษัท Umicore ของประเทศเบลเยียม เป็นเตาที่ออกแบบดัดแปลงจากเตาคอนเวอร์เตอร์ทั่วไปทำให้สามารถป้องกันการฟุ้งกระจายของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีกว่าเตาคอนเวอร์เตอร์ทั่วไปเรียกเตานี้ว่า Hoboken Converter
- ระบบแยกทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้า ใช้เทคโนโลยีของ Mount ISA จากประเทศออสเตรเลีย ซึ่งจัดเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบัน

## 2.3 การประยุกต์ใช้แร่ทองแดงในปัจจุบัน

ทองแดงสามารถตัดได้ง่าย จึงใช้แพร่หลายในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น

- สายลวดทองแดง
- อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า
- เครื่องจักร ไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- มีการใช้ทองแดงเพิ่มขึ้นในวงจร ไอซีแทนอะลูมิเนียมเนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดีกว่า
- เป็นวัสดุในการผลิตฮีตซิงก์สำหรับคอมพิวเตอร์ เนื่องจากระบายความร้อนได้ดีกว่าอะลูมิเนียม

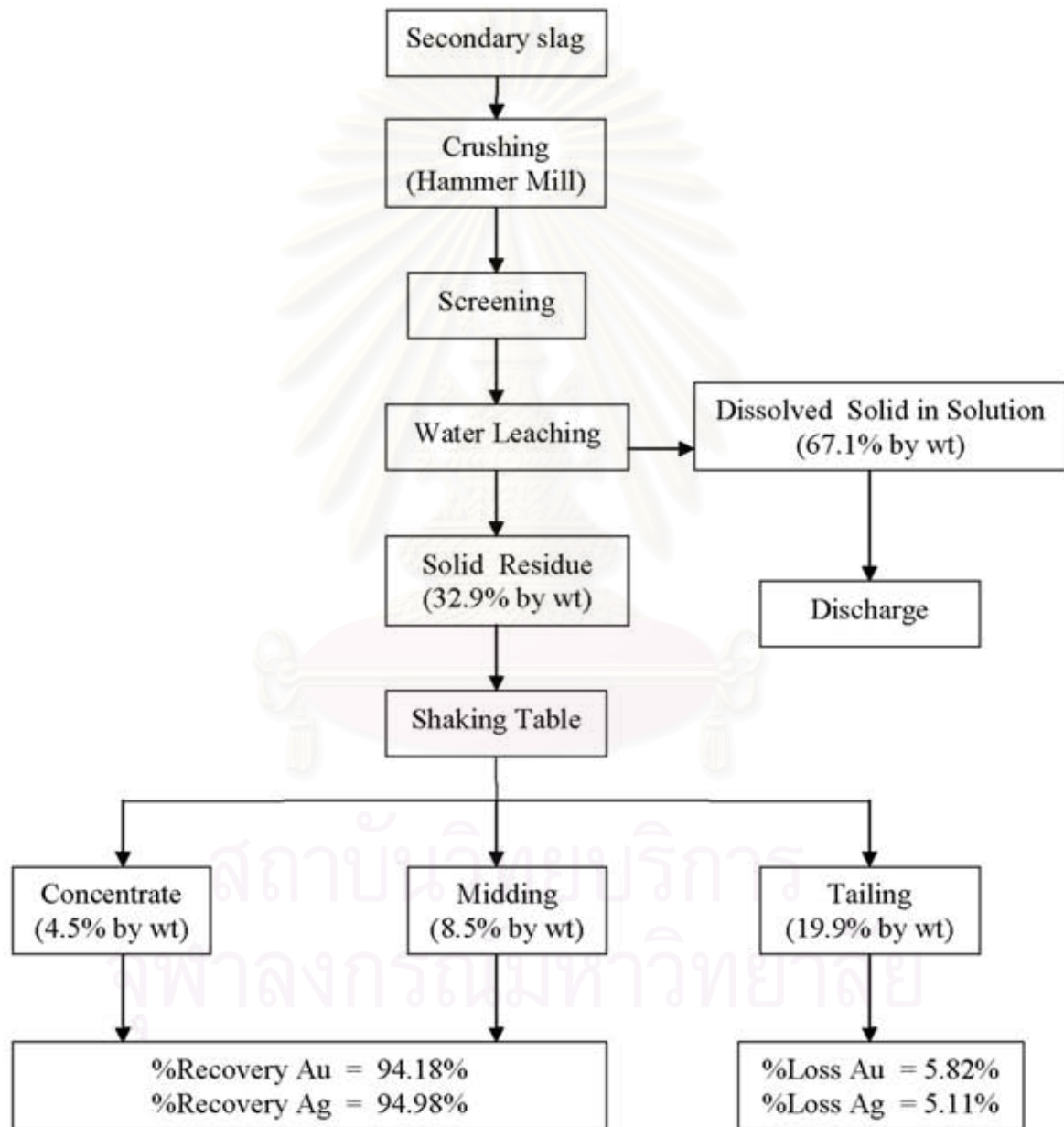
## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่อง การเก็บกลับคืน โลหะทองแดงในตะกรันจากกระบวนการผลิตทองแดงด้วยเทคนิคทางฟิสิกส์ มีดังนี้

### 2.4.1 การศึกษาของ อภิสัทธี น้ำประสานไทย

อภิสัทธี น้ำประสานไทย (2003) ได้ศึกษาการกระจายตัว ลักษณะและองค์ประกอบของโลหะมีค่า ทองคำ เงิน และสารประกอบอื่นในตะกรันทุติยภูมิ ที่ได้จากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์ โดยดำเนินการศึกษาวิจัยปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-Ray Fluorescent Spectroscopy - XRF) ศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและ

องค์ประกอบทางโลหะมีค่าโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy - SEM) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer - XRD) และเครื่องเอนเนอร์ยีดีสเพอร์ซีฟเอกซเรย์ (Energy Dispersive X-Ray -EDX) โดยผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยดังกล่าวสามารถนำวิเคราะห์ และสรุปผลโดยเสนอแนะกระบวนการเก็บคืนของโลหะมีค่าได้โดยใช้โต๊ะสั่น (Shaking Table) ซึ่งสามารถเก็บกลับคืนโลหะมีค่าทองคำได้ 94.18 เปอร์เซ็นต์ และเก็บกลับคืน โลหะเงิน ได้ 94.89 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในแผนภาพ รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแผนผังกระบวนการขั้นตอนของการเก็บกลับคืนโลหะมีค่าในตะกอนทุติยภูมิจากกระบวนการทำเหมืองทองคำบริสุทธิ์ (อภิสิทธิ์ น้าประสานไทย, 2544)

#### 2.4.2 การศึกษาของ A.Sarrati , B.Rahmati,H.R.Hassani and H.H.A. Shirazi

A.Sarrati , B.Rahmati,H.R.Hassani and H.H.A. Shirazi (2003). ได้ศึกษาการแยกทองแดงจาก Reveberatory Slag ที่มีทองแดงอยู่ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้การลอย (Flotation) ซึ่งในการลอยครั้งแรกสามารถเก็บกลับคืนได้ 72 เปอร์เซ็นต์ โดยหัวแร่มีทองแดง (Cu) อยู่ 12.6 เปอร์เซ็นต์ การแยกที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด คือการใช้ยาปรับสภาพผิว คือ R 407 ปริมาณ 30 กรัมต่อดัน และใช้น้ำยาเคลือบฟองคือ MIBC ปริมาณ 35 กรัมต่อดัน จะให้ผลที่ดีกว่าการผสมกับ A65 โดยสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการลอย Reveberatory Furnace Slag ที่ Sarcheshmeh Copper Complex คือ pH = 11.5 , R 407 = 30 g/t , % solid = 30 , MIBC = 35 g/t , เวลาที่ใช้ในการลอยนาน 12.5 นาที โดยการปล่อยให้ Reveberatory Slag เย็นตัวอย่างช้าๆ (ในช่วงประมาณ 1,300-900 องศาเซลเซียส) จะช่วยเพิ่มการเก็บคืนได้ประมาณ 85% และช่วยลด Conditioning Time ให้เหลือน้อยกว่า 30 นาที สรุปได้ตามตาราง ที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สภาวะการลอยแร่ที่ศึกษา โดย A.Sarrati , B.Rahmati,H.R.Hassani and H.H.A. Shirazi (2003).

Parameter studied	Range of application	Best result
Comminution Time (min)	5-70	40
Flotation Time	5-80	12.5
pH	8-12	11.5
Sodium Isopropyl Xanthate , Z11 (g/t)	10-50	30
Mercapto Benzo Thiazole , R 407 (g/t)	20-50	30
Methyl Isobutyl Carbinol , MIBC (g/t)	15-50	35
Propylene Glycol , A65 (g/t)	5-65	50
Solid Content	20-35	30

### 2.4.3 การศึกษาของ W.J. Bruckard ,M. Somerville and F. Hao

W.J. Bruckard ,M. Somerville and F. Hao, (2004). ได้ศึกษาการลอย Calcium-Ferrite Slag โดย Slag ที่ได้ประกอบไปด้วย Low Copper Slag , High Copper Slag ที่เป็น Oxidise มากขึ้น และ Escondida โดย Slag จะแปรผันจำนวนทองแดง (Cu) จาก 5.2%-15.1% ส่วนประกอบหลักของทองแดงใน Slag ทั้งหมด คือ Metallic Copper และใช้กระบวนการ Grinding, Screening และ Flotation ในการศึกษา สำหรับ Slag ที่ใช้ทดสอบสามชนิด Low Copper Slag, High Copper Slag และ Escondida ปริมาณการเก็บกลับคืนของทองแดงทั้งหมดในการทดสอบ Flotation อยู่ระหว่าง 80-87% โดยใช้ Potassium Ethyl Xanthate (KEX) เป็น Flotation Collector ใช้ Sodium Sulphide ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) เป็น Sulphidising Agent ใช้ Analgrade Copper Sulphate ( $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) เป็น Activator โดย Reagent ทั้งสองตัวจะถูกเติมเป็นของแข็งใน Flotation Cell และใช้ Commercial Polypropylene Glycol (Aerofroth 65) เป็น Frother เขียนสรุปได้ดัง ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการศึกษา และหน้าที่ของสารเคมี โดย W.J.Bruckard, M.Somerville and F. Hao, (2004).

Reagent	Use for
Potassium Ethyl Xanthate (KEX)	Flotation Collector
Sodium Sulphide ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )	Sulphidising Agent
Analgrade Copper Sulphate ( $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )	Activator
Commercial Polypropylene Glycol (Aerofroth 65)	Frother

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา เจริญการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อ ศึกษาการเก็บคั้นทองแดง จากตะกั่วทองแดง โดยเปรียบเทียบระหว่างการคัดแยกด้วยวิธี โตะสั่นกับการลอยแยก เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรม โดยการทดลองทั้งหมดทำในห้องปฏิบัติการของ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดย กำหนดลำดับของการทดลองไว้ดังนี้

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยในครั้งนี้ประกอบไปด้วย

- เครื่องบดแบบลูกป็นกลม (Ball Mill) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.)
- ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.)
- เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็ก โดมิเตอร์ (XRD) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค.)
- เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง.)
- เครื่องอินดักทีฟพลาสมาสเปกโตรสโคปี (ICPS) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก จ.)
- โตะสั่นแยกแร่ (Wiffrey) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ฉ.)
- เซลลอยแร่ (Denver) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ช.)

#### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย

- กรดไนตริก (65%  $\text{HNO}_3$ , ผู้ผลิต Carlo Exba)
- น้ำกลั่น
- โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ )
- Aero Promoter 3302 (Alyl Amyl Xanthate Ester)
- Aerofloat 238 (Sodium Di-Sec-Butyl Dithiophosphate)



### 3.4 วัสดุคืบที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุคืบที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือตะกรันทองแดงจากการผลิตทองแดง ด้วยวิธีการถลุงทองแดงของบริษัท ไทยคอปเปอร์อินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ดังรูปที่ 3.1 ส่วนรูปที่ 3.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดง



รูปที่ 3.1 รูปกองตะกรันทองแดงของบริษัท ไทยคอปเปอร์อินดัสทรี จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดงของบริษัท ไทยคอปเปอร์อินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

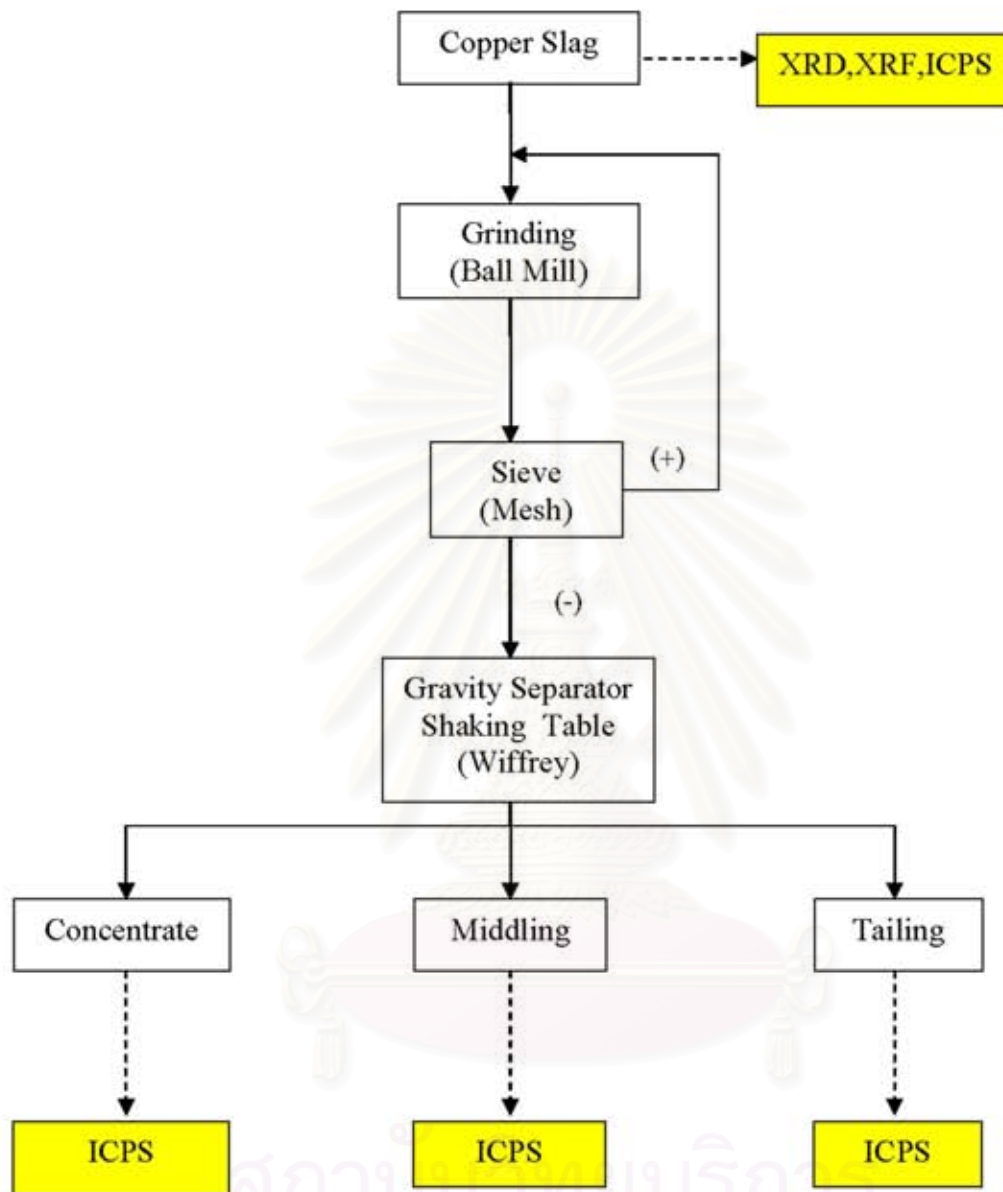
### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองประกอบไปด้วยการเก็บตัวอย่างตะกรันทองแดง (Copper Slag) จากกระบวนการถลุง ที่บริษัท ไทยคอปเปอร์อินดัสทรี จำกัด (มหาชน) นำมาวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี โดยศึกษาปริมาณทองแดง และแร่องค์ประกอบอื่นในตะกรันทองแดง โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) และศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของทองแดง ในตะกรัน โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) จากนั้นนำตัวอย่างตะกรันทองแดงมาแต่งแร่โดยเปรียบเทียบผลของการแต่งแร่ระหว่างวิธีการ โต้ะสั้น กับ ลอยแยก แล้วนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้ ด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมาสเปกโตรสโคปี (ICPS) และดำเนินการศึกษาทบทวนข้อมูลจากรายงานการวิจัยและเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง (หัวข้อ 2.4 ในบทที่ 2) เพื่อศึกษาภูมิหลังและศึกษาสถานภาพ โดยทั่วไปที่จะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ โคนมุงเน้นที่จะเสนอแนะแนวทางการพัฒนาและวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเก็บกลับคืนของ ทองแดงในตะกรันเพื่อให้ได้วิธีที่เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงแผนภาพกระบวนการขั้นตอนการศึกษาการเก็บกลับคืนตะกรันทองแดงด้วยวิธี โต้ะสั้น และในรูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพกระบวนการขั้นตอนการศึกษาเก็บกลับคืนตะกรันทองแดงด้วยวิธีลอยแยก

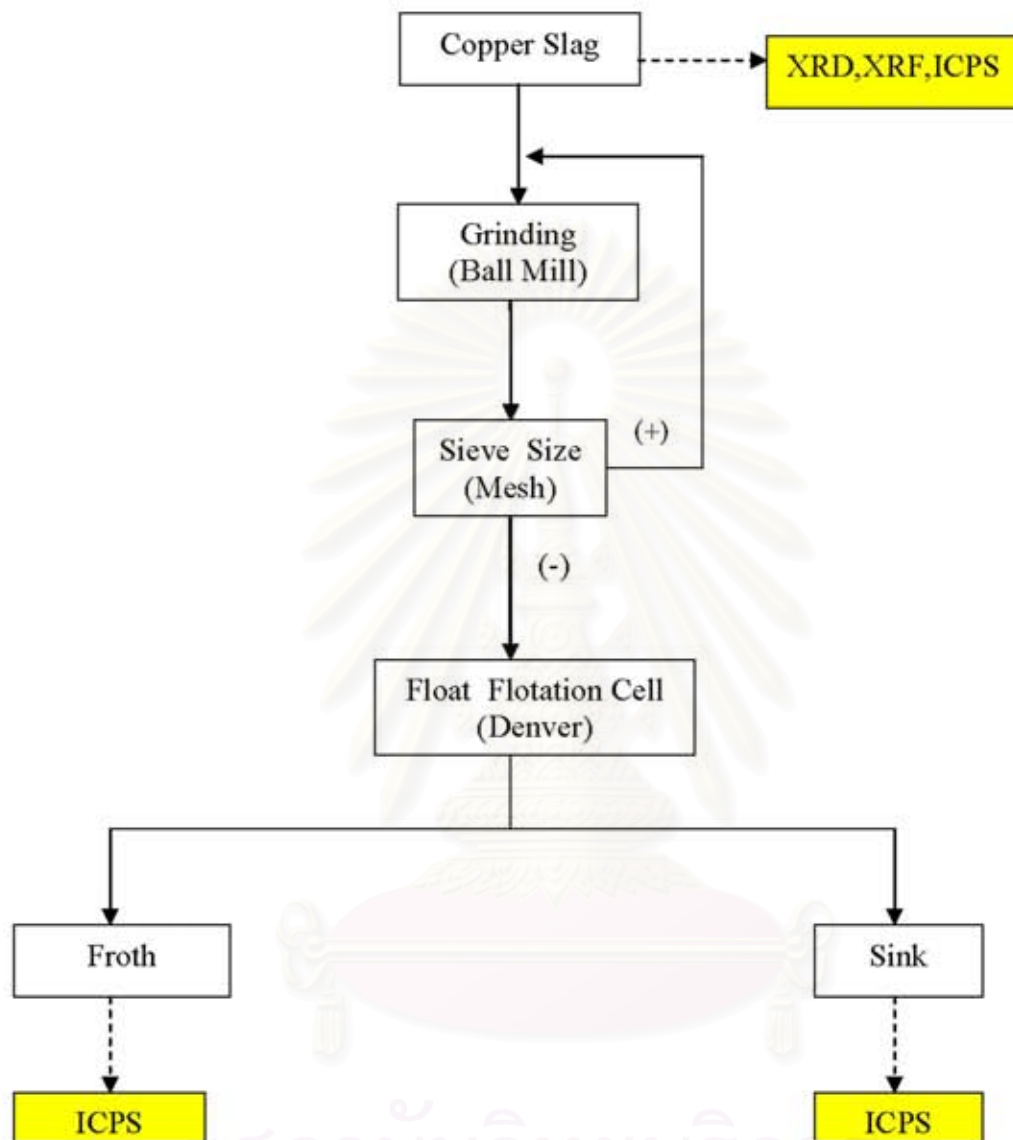
#### ขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกรันทองแดง

- เครื่องมือและอุปกรณ์
  1. เครื่องวัดเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffraction , XRD)
  2. เครื่องวัดเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer , XRF)
  3. เครื่องอินดักทีฟพลาสมาสเปกโตรสโคปี (Induced Coupled Plasma Spectrometer , ICPS)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังกระบวนการศึกษาขั้นตอนการเก็บกลับคืนตะกั่วทองแดงด้วยวิธี โตะต้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 แสดงแผนผังกระบวนการศึกษาขั้นตอนการเก็บกลับคืนตะกั่วทองแดงด้วยวิธีลอยแยก

### 3.5.1 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณทองแดง และธาตุองค์ประกอบอื่นใน ตะกรัน ด้วยเครื่อง เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF)

สำหรับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่เหมาะสมกับตะกรันทองแดง (Copper Slag) นั้นคือวิธีอัดให้เป็นแผ่นหรือเป็นเม็ด (Palletizing)

วิธีนี้จำเป็นจะต้องบดให้ตะกรันละเอียดเพื่อให้ได้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันเมื่ออัดให้เป็นแผ่นจะได้มีผิวหน้าเรียบ

โดยนำตะกรันทองแดงมาบดด้วยเครื่องบดละเอียด (Disk Mill) ประมาณ 5 นาที หรือจนกว่าจะได้ตะกรันทองแดงที่มีความละเอียดประมาณ 200 เมช แล้วชักตัวอย่าง ตะกรัน (Coning and Quartering) แล้วนำไปใส่ในถ้วยอลูมิเนียมเพื่ออัด แล้วนำไปอัดด้วย เครื่อง อัดขนาด 20-30 ตัน เวลา 10-20 วินาที จะได้สารตัวอย่างที่เป็นแผ่นเพื่อวางใน หลุม ใส่ตัวอย่าง แล้วนำไปทำการวิเคราะห์โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) แล้ว บันทึกผลและสรุปผลที่ได้ในรายงานผลการทดลองบทที่ 4

### 3.5.2 ขั้นตอนการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดง (Copper Slag) โดยใช้เครื่อง เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD)

สำหรับวิธีการเตรียมสารตัวอย่างที่เหมาะสมกับตะกรันทองแดง (Copper Slag) นั้น คือวิธีอัดให้เป็นแผ่นหรือเป็นเม็ด (Palletizing)

วิธีนี้จำเป็นจะต้องบดให้ตะกรันทองแดงละเอียดเพื่อให้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่ออัดเป็นเม็ดหรือเป็นแผ่นจะได้มีผิวหน้าเรียบ

โดยนำตะกรันทองแดงมาบดด้วยเครื่องบดละเอียด (Disk Mill) ประมาณ 5 นาที หรือจนกว่าจะได้ตะกรันทองแดงที่มีความละเอียดประมาณ 200 เมช แล้วชักตัวอย่าง ตะกรัน (Coning and Quartering) แล้วนำไปใส่ในหลุมใส่ตัวอย่างแล้วนำไปทำการ วิเคราะห์โดยเครื่อง เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) แล้วบันทึกผลและ สรุปผลที่ได้ ในรายงานผลการทดลองบทที่ 4

### 3.5.3 การเตรียมตัวอย่างโดยการลดขนาดด้วยลูกป็นกลม (Ball Mill)

- เครื่องมือและอุปกรณ์
  1. เครื่องบดลูกป็นกลม (Ball Mill)

- วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างตะกรันทองแดงมาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
2. นำตัวอย่างตะกรันทองแดงที่อบแห้งแล้วมาเข้าเครื่องบดลูกป็นกลมโดยใช้เวลา 30 นาที ต่อตัวอย่าง 5 กิโลกรัม
3. เก็บตัวอย่าง ตามขนาดที่ต้องการแล้วนำตัวอย่างที่ยังไม่ได้ขนาดนำกลับไปบดลูกป็นกลม จน ได้ขนาดตามต้องการทั้งหมด

### 3.5.4 การเตรียมตัวอย่างโดยการคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน (Sieve)

เนื่องจากตัวอย่างตะกรันทองแดงที่ได้หลังจากการเตรียมตัวอย่างโดยการบดนั้นยังมีขนาดไม่เท่ากันจึงต้องมีการคัดขนาดก่อนนำตะกรันทองแดงไปสู่ขั้นตอนต่อไป

- เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Size) 50 เมช
2. ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Size) 100 เมช
3. ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Size) 120 เมช

- วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างตะกรันทองแดงที่ผ่านกระบวนการบดด้วย Ball Mill คัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน ขนาด 50 เมช
2. เก็บตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 50 เมช แล้วนำตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 เมช กลับไปบดในเครื่องบดลูกป็นกลม จนได้ขนาดเล็กกว่า 50 เมชทำซ้ำเช่นนี้หลายครั้งจนตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่า 50 เมช ทั้งหมด
3. นำตัวอย่างตะกรันทองแดงที่ผ่านกระบวนการบดด้วย Ball Mill คัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน ขนาด 100 เมช
4. เก็บตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 100 เมช แล้วนำตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 เมช กลับไปบดในเครื่องบดลูกป็นกลมจนได้ขนาดเล็กกว่า 100 เมชทำซ้ำเช่นนี้หลายครั้งจนตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่า 100 เมช ทั้งหมด
5. นำตัวอย่างตะกรันทองแดงที่ผ่านกระบวนการบดด้วย Ball Mill คัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน ขนาด 120 เมช
6. เก็บตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 120 เมช แล้วนำตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 120 เมช กลับไปบดในเครื่องบดลูกป็นกลมจนได้ขนาดเล็กกว่า 120 เมชทำซ้ำเช่นนี้หลายครั้งจนตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่า 120 เมช ทั้งหมด

### 3.5.5 การแต่งแร่ตะกั่วของแดง โดยอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะด้วยโต๊ะสั่นแยกแร่ (Shaking Table)

- เครื่องมือและอุปกรณ์
  1. โต๊ะสั่นแยกแร่ Shaking Table (Wiffrey)
  2. น้ำ

ตัวแปรสภาวะการทำงานของโต๊ะสั่นแยกแร่แสดงดัง ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรสภาวะการทำงานของโต๊ะสั่นแยกแร่

ตัวแปรสภาวะ	สภาวะที่ใช้
ความลาดเอียงของพื้น โต๊ะ (Slope)	3.5 องศา
อัตราการไหลของปริมาณน้ำ (Flow Rate)	22 ลิตรต่อนาที
ความเร็วของจังหวะชัก (Speed)	220 ครั้งต่อนาที
ความยาวช่วงชัก (Stroke)	1.5 นิ้ว

- วิธีการทดลอง
  1. ทดลองแยกแร่โดยป้อนตัวอย่างตะกั่วของแดง แล้วปรับระดับความลาดเอียงของพื้น โต๊ะ (Slope) วัดอัตราการไหลของปริมาณน้ำ (Flow Rate) ความเร็วของจังหวะชัก (Stroke) จนได้ผลตามที่ต้องการแล้วจึงเริ่มดำเนินการ แต่งแร่ต่อไป
  2. เตรียมตัวอย่างตะกั่วของแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช น้ำหนัก 5,000 กรัม ผสม กับน้ำให้มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์
  3. เก็บตัวอย่าง หัวแร่ (Concentrate) แร่กละ (Middling) และ หางแร่ (Tailing) ใส่ภาชนะที่เตรียมไว้
  4. นำตัวอย่างที่ได้ทั้ง 3 ตัวอย่าง ไปอบแห้งที่ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
  5. เตรียมตัวอย่างตะกั่วของแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช น้ำหนัก 5,000 กรัม ผสม กับน้ำให้มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์
  6. ทำซ้ำในข้อ 3-4
  7. เตรียมตัวอย่างตะกั่วของแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช น้ำหนัก 5,000 กรัม ผสม กับน้ำให้มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์

8. ทำซ้ำในข้อ 3-4
9. บันทึกผลการทดลอง

### 3.5.5 การแต่งแร่ตะกรันทองแดงโดยใช้กระบวนการลอยแร่ (Froth Flotation)

- เครื่องมือและอุปกรณ์
  1. เซลลอยแร่ขนาด 5 ลิตร Flotation Cell (Denver)
  2. น้ำ
  3. Sodium Hydroxide (NaOH)
  4. Sodium Sulphide ( $\text{Na}_2\text{S}$ )
  5. Ayl Amyl Xanthate Ester (Aero Promoter 3302)
  6. Sodium Di-Sec-Butyl Dithiophosphate (Aero Float 238)
  7. ทรายวัดค่าความเป็น กรด ค่าง

ตัวแปรสภาวะการลอยแยกที่ได้ผลดีที่สุดดัง ตารางที่ 3.2

ตารางที่3.2 สภาวะการลอยแยกที่ได้ผลดีที่สุด

Parameter	Condition
Water (ml)	4,500
Copper Slag(g)	500
Comminution Time (min)	45
Flotation Time (min)	35
pH	11.5
Sodium Sulphide (g)	0.2
Ayl Amyl Xanthate Ester, [Aero Promoter 3302] (ml)	30
Sodium Di-Sec-Butyl Dithiophosphate, [Aerofloat 238] (ml)	35
Solid Content (%)	25

- วิธีการทดลอง
  1. เตรียมตัวอย่างตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช 500 กรัม
  2. ใส่ตัวอย่างตะกรันทองแดงในเซลล์ลอยแร่ เติมน้ำให้พอดีกับเซลล์ลอยแร่



3. ใช้ NaOH ปรับ pH เป็น 11.5 โดยใช้กระดาษวัดค่า pH
4. ใช้  $\text{Na}_2\text{S}$  0.2 กรัม เพื่อปรับผิวให้เป็นซัลไฟด์ เปิดเครื่องลอยแร่โดยใช้ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที
5. ใช้ Aero float 3302 ปริมาณ 30 มิลลิลิตร เพื่อเป็น Collectors กวนนาน 35 นาที
6. ใช้ Aero float 238 ปริมาณ 35 มิลลิลิตร เพื่อเป็น Frother จึงเปิดฟอง
7. เก็บตัวอย่างตะกอนทองแดงโดยแบ่งเป็น ส่วนลอย กับส่วนจม
8. นำตัวอย่างที่ได้ล้างด้วยน้ำ รินน้ำออก แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนแห้งแห้ง เก็บตัวอย่าง และบันทึกผล
9. เตรียมตัวอย่างตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช 500 กรัม
10. ทำซ้ำในข้อ 2-8
11. เตรียมตัวอย่างตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช 500 กรัม
12. ทำซ้ำในข้อ 2-8
13. บันทึกผลการทดลอง



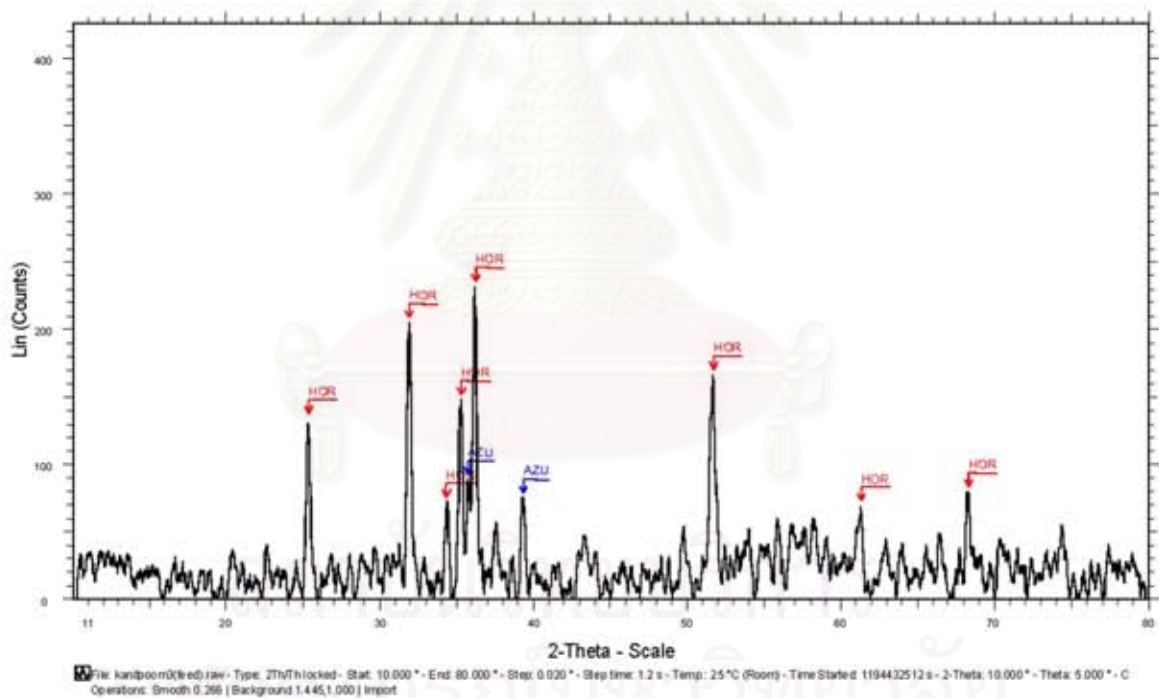
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### รายงานผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในตะกรันทองแดงด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD)

ผลการวิเคราะห์สารประกอบใน ตะกรันทองแดง ด้วยเทคนิค XRD ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะบ่งบอกถึง โครงสร้างขององค์ประกอบของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตะกรันทองแดง ทำให้ทราบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบนั้นอยู่ในรูป ของสารประกอบชนิดใด นับว่าเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญในการพิจารณา เลือกกระบวนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ผลของการวิเคราะห์ตะกรันทองแดงแสดงได้ดัง รูปที่ 4.1



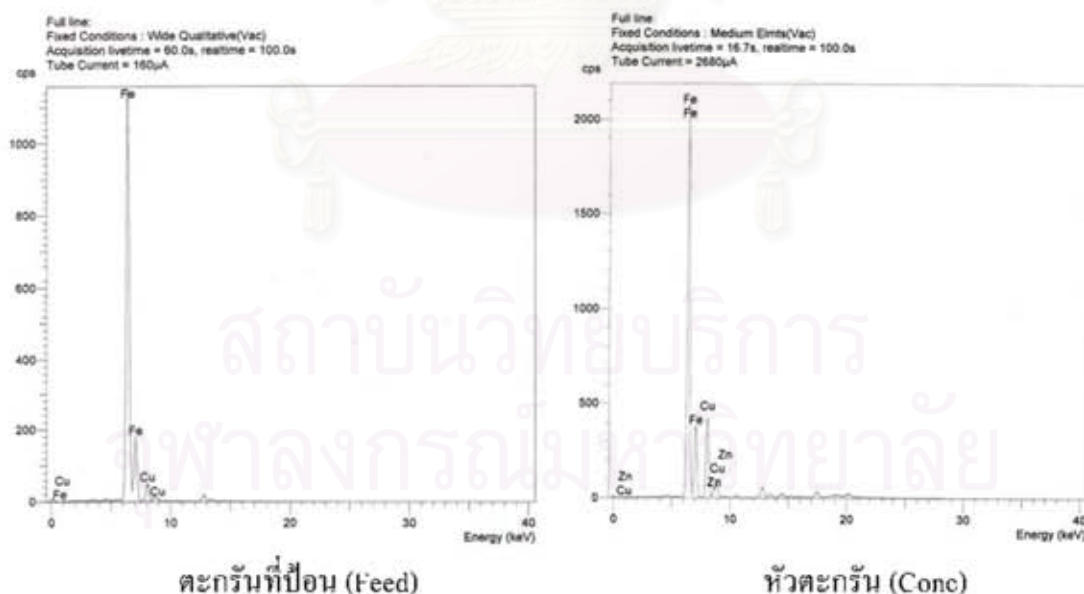
โดยที่ **HOR** : Hortonolite ( $\text{Fe}_3\text{SiO}_4$ )

**AZU** : Azurite ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ )

รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในตะกรันทองแดง (Feed) ด้วยเทคนิค XRD

จากการวิเคราะห์สารประกอบในตะกรันทองแดง โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) พบว่าตะกรันทองแดงมีองค์ประกอบหลักคือเหล็ก ซึ่งเป็นสารประกอบ Hortonolite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) แต่ธาตุที่เราสนใจคือทองแดง (Cu) จากผลวิเคราะห์พบว่าทองแดงอยู่ในรูปของสารประกอบ Azurite [ $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ] ซึ่งทั้งสองนี้มีความถ่วงจำเพาะที่ต่างกันโดย Azurite ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) มีความถ่วงจำเพาะที่ 8.93 และ Hortonolite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) มีความถ่วงจำเพาะที่ 7.85 จึงน่าจะสามารถแยกทองแดงออกจากตะกรันด้วย อาศัยความแตกต่างด้านความถ่วงจำเพาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการศึกษาข้างต้น จึงนำตะกรันทองแดงมาบดด้วย Ball Mill ให้มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอน แล้วนำไปแต่งตะกรัน โดยอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะด้วยโต๊ะสั่นแยกแร่ (Shaking Table) เพื่อทดสอบการแต่งตะกรัน แล้วนำเอาหัวตะกรัน (Concentrate) กลับมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) เพื่อเปรียบเทียบ ปริมาณของธาตุทองแดง ในแร่ (Feed) กับ หัวตะกรัน (Concentrate) จากการเปรียบเทียบพบว่า การแต่งแร่โดยอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะด้วยโต๊ะสั่นสามารถ เก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดงได้โดยความเข้มข้นของทองแดงใน หัวตะกรัน (Concentrate) สูงกว่าความเข้มข้นของทองแดงในตะกรันที่ป้อน (Feed) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงในตะกรันทองแดงเปรียบเทียบระหว่างตะกรันป้อน (Feed) กับ หัวตะกรัน (Concentrate) ที่ผ่านกระบวนการโต๊ะสั่นเบื้องต้น โดยใช้เทคนิค XRF

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ตะกรันทองแดงด้วยเครื่องอินดักทีฟฟลักซ์เฟลพลาสมาสเปกโตรสโคปี (ICPS)

เนื่องจากปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในตะกรันทองแดงนั้นน้อย ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส (XRF) อาจจะทำให้ได้ค่าที่คลาดเคลื่อนได้ จึงตัดสินใจนำตะกรันทองแดงมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟฟลักซ์เฟลพลาสมาสเปกโตรสโคปี (ICPS) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณที่แน่นอนของโลหะทองแดงการวิเคราะห์ในเทคนิคนี้นับว่าเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญในการเลือกพิจารณากระบวนการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงให้ได้ผลที่มีประสิทธิภาพและสมบูรณ์มากที่สุด

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะทองแดงในตะกรันทองแดงโดยใช้เทคนิค ICPS พบว่ามีปริมาณโลหะทองแดงอยู่ 7.82% โดยน้ำหนัก

#### 4.3 ผลการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงด้วยโต๊ะสั่น (Shaking Table)

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD กับ XRF ทำให้ทราบว่าตะกรันทองแดงมีองค์ประกอบหลักอยู่สองส่วนคือเหล็ก Hortonolite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) กับทองแดง Azurite ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งทั้งสองนี้มีความถ่วงจำเพาะที่ต่างกัน โดย Azurite ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) มีความถ่วงจำเพาะที่ 8.93 และ Hortonolite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) มีความถ่วงจำเพาะที่ 7.85 จึงน่าจะแยกทองแดงออกจากตะกรันได้

##### 4.3.1 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ออกจากตะกรัน ด้วยโต๊ะสั่น

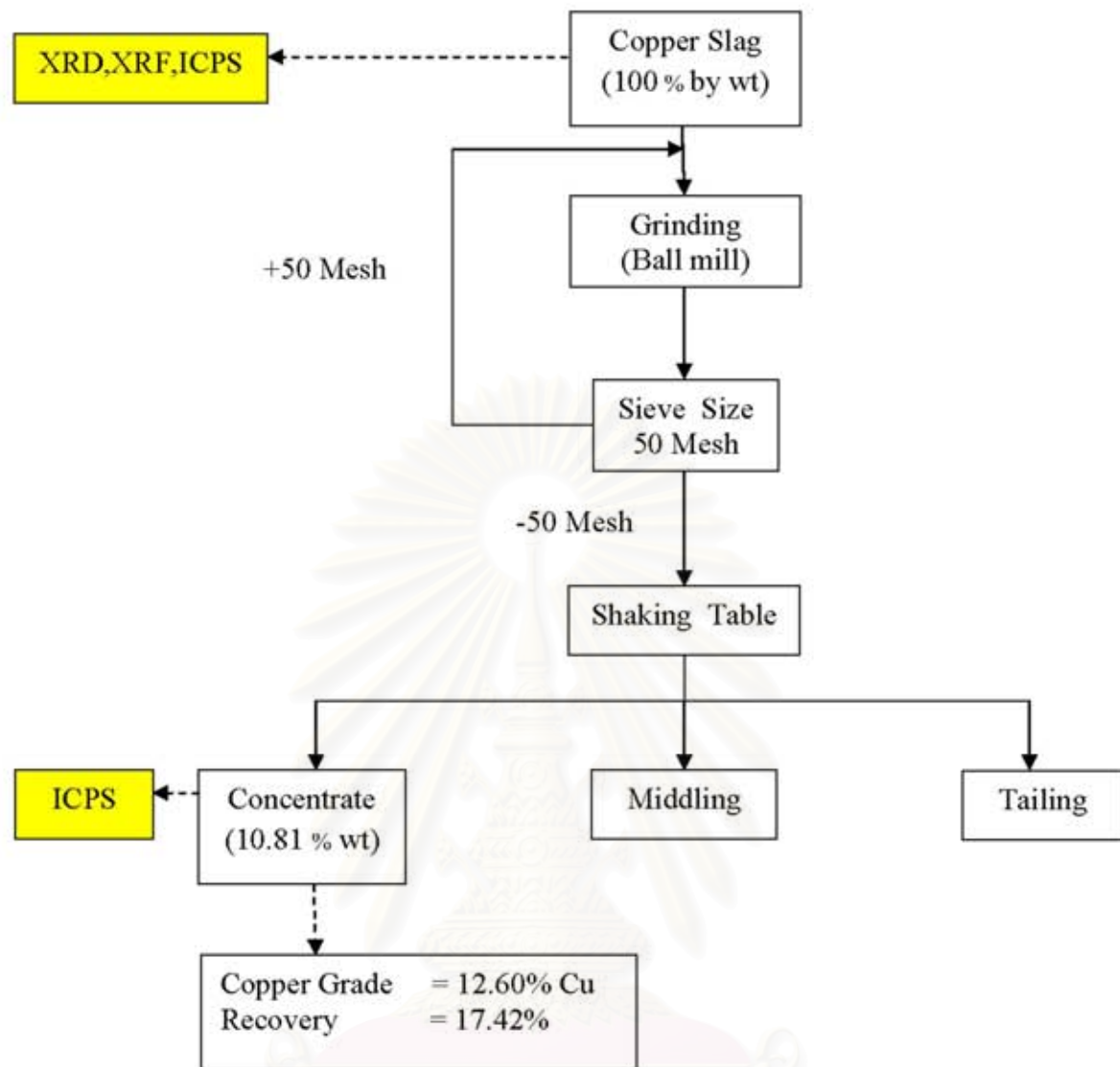
สามารถเพิ่มปริมาณทองแดงในตะกรันป้อน (Feed) จาก 7.82 % เป็น 12.60 % ในหัวตะกรัน(Concentrate) และสามารถเก็บกลับคืนแร่ทองแดงได้ 17.42 %

รูปที่ 4.3 แสดงแผนผังขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยโต๊ะสั่น และ ตารางที่ 4.1 ผลการคัดแยกตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

##### 4.3.2 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ออกจากตะกรัน ด้วยโต๊ะสั่น

สามารถเพิ่มปริมาณทองแดงในตะกรันป้อน (Feed) จาก 7.82 % เป็น 19.63 % ในหัวตะกรัน(Concentrate) และสามารถเก็บกลับคืนแร่ทองแดงได้ 12.37 %

รูปที่ 4.4 แสดงแผนผัง ขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดง จากตะกรัน ทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยโต๊ะสั่น และ ตารางที่ 4.2 ผลการคัดแยกตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

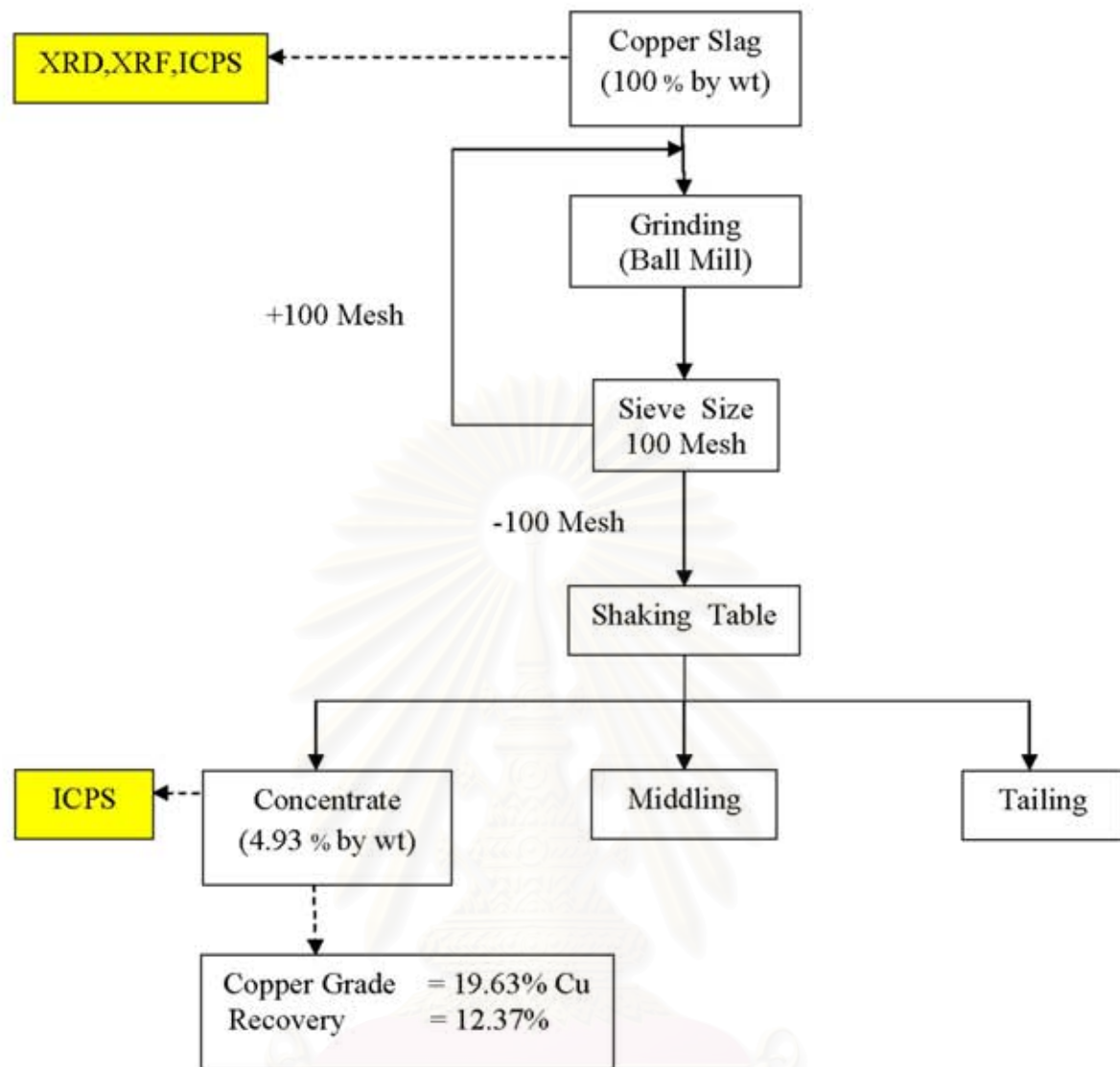


รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดง ขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

ตารางที่ 4.1 ผลการคัดแยกตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

ขนาด (-50 เมช)	น้ำหนัก		เปอร์เซ็นต์ ทองแดง	เปอร์เซ็นต์ การกระจายตัว
	กรัม	เปอร์เซ็นต์		
หัวแร่	540.50	10.81	12.60	17.42
แร่คละ	380.40	7.61*	8.49	8.26
หางแร่	4,079.10	81.58*	7.12	74.32
แร่ป้อน	5,000	100	7.82	100.00

\* คำนวณโดยวิธีสมดุลของมวล (Mass Balance)



รูปที่ 4.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกั่วทองแดง ขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

ตารางที่ 4.2 ผลการคัดแยกตะกั่วทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

ขนาด (-100 เมช)	น้ำหนัก		เปอร์เซ็นต์ ทองแดง	เปอร์เซ็นต์ การกระจายตัว
	กรัม	เปอร์เซ็นต์		
หัวแร่	246.50	4.93	19.63	12.37
แร่ละเอียด	163.30	3.27*	11.74	4.90
หางแร่	4,590.20	91.80*	7.05	82.72
แร่ป้อน	5,000	100	7.82	100.00

\* คำนวณโดยวิธีสมดุลของมวล (Mass Balance)

#### 4.3.3 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กลงกว่า 120 เมช ออกจากตะกรัน ด้วยโต๊ะสั่น

สามารถเพิ่มปริมาณทองแดงในตะกรันป้อน (Feed) จาก 7.82 % เป็น 25.68 % ในหัวตะกรัน(Concentrate) และสามารถเก็บกลับคืนแร่ทองแดงได้ 12.97 %

รูปที่ 4.5 แสดงแผนผังขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดงขนาด เล็กลงกว่า 120 เมช ด้วยโต๊ะสั่น และ ตารางที่ 4.3 ผลการคัดแยกตะกรันทองแดงขนาดเล็กลงกว่า 120 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

#### 4.3.4 วิจารณ์ผลการแยกทองแดงด้วยโต๊ะสั่น

ผลของการแยกหัวทองแดงออกจากตะกรันตามหัวข้อ 4.3.1 , 4.3.2 และ 4.3.3 พบว่าการแยกด้วยโต๊ะสั่นสามารถแยกหัวตะกรันทองแดง โดยพบว่าการบดตะกรันทองแดงให้มีขนาด เล็กลงกว่า 120 เมช ทั้งหมด สามารถแยกหัวตะกรันทองแดงที่มีปริมาณของทองแดงอยู่ 25.61 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถเก็บกลับคืนทองแดงได้ 12.97 เปอร์เซ็นต์ โดยหัวตะกรันทองแดงสามารถ นำกลับเข้าสู่กระบวนการถลุงใหม่ได้ (เนื่องจากหัวตะกรันมีทองแดงมากกว่า 23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็น ข้อกำหนดของโรงถลุงทองแดง สามารถป้อนกลับเข้าโรงถลุงทองแดงได้) แต่ไม่เหมาะสมที่จะใช้ ในระดับอุตสาหกรรมเพราะอัตราการเก็บกลับคืนของทองแดงนั้นน้อยเกินไป จึงควรหาวิธีการอื่น ในการแยกหัวตะกรันทองแดงออกจากตะกรันทองแดงต่อไป

#### 4.4 ผลการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากตะกรันด้วยกระบวนการลอยแยก (Froth Flotation)

จากการศึกษาการวิจัยที่เกี่ยวข้องจากต่างประเทศ (ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4.2 และ 2.4.3) พบว่ามี กระบวนการเก็บกลับคืนแร่ตะกรันทองแดงด้วยกรรมวิธี ลอยแยก จึงนำมาใช้กับตัวอย่าง ตะกรันทองแดงที่กำลังศึกษาอยู่ ในเบื้องต้นพบว่าสามารถ เก็บกลับคืนทองแดงได้จากตะกรันทองแดง โดย สังกัดจากสีของตะกรันที่ลอยขึ้นมา เมื่อแร่ทองแดงสามารถลอย ขึ้นมาจากตะกรันทองแดงได้ จึง ได้ลองปรับสภาวะในการลอยต่างๆ ทั้งในด้านของ ปริมาณสารเคมี และระยะเวลาในขั้นตอนของ การลอย เพื่อที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมกับการลอยตะกรันทองแดงที่ศึกษา ซึ่งได้ผลของสภาวะ ดังนี้โดยใช้ เซลลอยแร่ขนาด 5,000 cc ของ Denver ใช้น้ำ 4,500 cc ใช้แร่ 500 g Comminution Time 45 min Flotation Time 35 min ปรับค่า pH เป็น 11.5 โดยใช้ NaOH เป็นตัวปรับสภาพ ใช้  $\text{Na}_2\text{S}$  ปริมาณ 0.2 g เพื่อปรับควให้เป็นซัลไฟด์ ใช้ความเร็วรอบของใบพัด 1,200 รอบต่อนาที ใช้ Aero Promoter 3302 เป็น Collector ใช้ Aerofloat 238 เป็น Frother

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD , XRF และ ICPS ทำให้ทราบว่าตะกรันทองแดงมีองค์ประกอบหลักอยู่สองส่วนคือเหล็ก Hortonolite ( $\text{Fe}_3\text{SiO}_4$ ) กับทองแดง Azurite ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) น่าจะสามารถแยกทองแดงออกจากตะกรันได้ โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนสภาพผิวสัมผัส ทำให้เกิดการจมกับลอยแยกออกจากกันได้ด้วยกระบวนการลอยแยก

จึงเป็นที่มาของการศึกษาทดลองการเก็บกลับคืนตะกรันทองแดงด้วยกระบวนการลอยแยก (Froth Flotation) ดังต่อไปนี้

#### 4.4.1 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยการลอยแยก

สามารถเพิ่มคุณภาพแร่ป้อน จาก 7.82 % เป็น 27.80 % และสามารถเก็บกลับคืนแร่ทองแดงได้ 61.21 %

รูปที่ 4.6 แสดงแผนผังขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยการลอยแยก และ ตารางที่ 4.4 ผลการคัดแยกตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยการลอยแยก

#### 4.4.2 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยการลอยแยก

สามารถเพิ่มคุณภาพแร่ป้อน จาก 7.82 % เป็น 25.91 % และสามารถเก็บกลับคืนแร่ทองแดงได้ 91.44 %

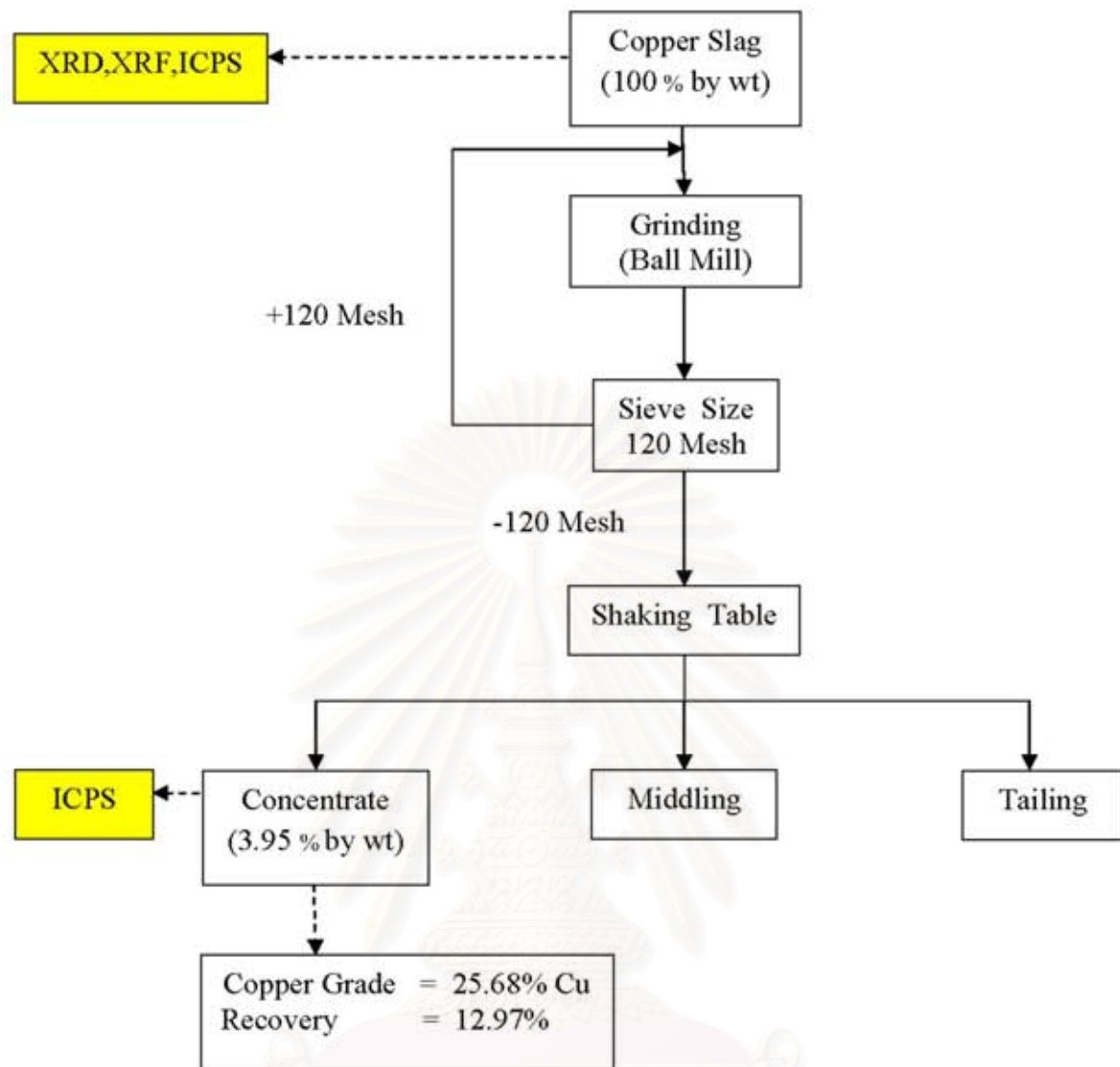
รูปที่ 4.7 แสดงแผนผังขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยการลอยแยก และ ตารางที่ 4.5 ผลการคัดแยกตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยการลอยแยก

#### 4.4.3 ผลของการแยกทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยการลอยแยก

สามารถเพิ่มคุณภาพแร่ป้อน จาก 7.82 % เป็น 18.08 % และสามารถเก็บกลับคืนแร่ทองแดงได้ 65.77 %

รูปที่ 4.8 แสดงแผนผังขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยการลอยแยก และ ตารางที่ 4.6 ผลการคัดแยกตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยการลอยแยก



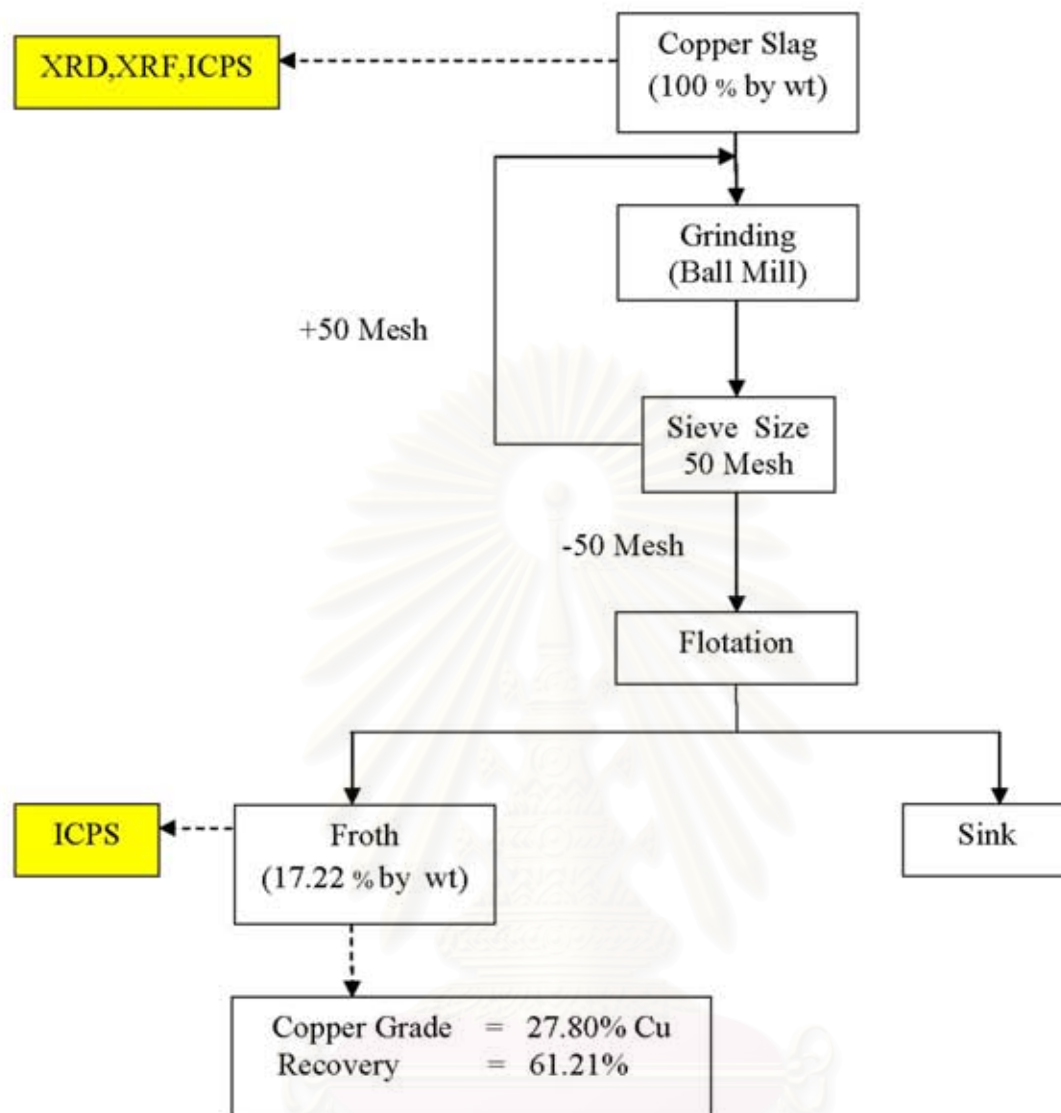


รูปที่ 4.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บกลับคืนทองแดงจากตะกั่วทองแดง ขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

ตารางที่ 4.3 ผลการคัดแยกตะกั่วทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยโต๊ะสั่น

ขนาด (-120 เมช)	น้ำหนัก		เปอร์เซ็นต์ ทองแดง	เปอร์เซ็นต์ การกระจายตัว
	กรัม	เปอร์เซ็นต์		
หัวแร่	197.30	3.95	25.68	12.97
แร่คละ	108.70	2.17*	12.38	3.43
หางแร่	4,694.00	93.88*	6.96	83.59
แร่ป้อน	5,000	100	7.82	100.00

\* คำนวณโดยวิธีสมดุลของมวล (Mass Balance)

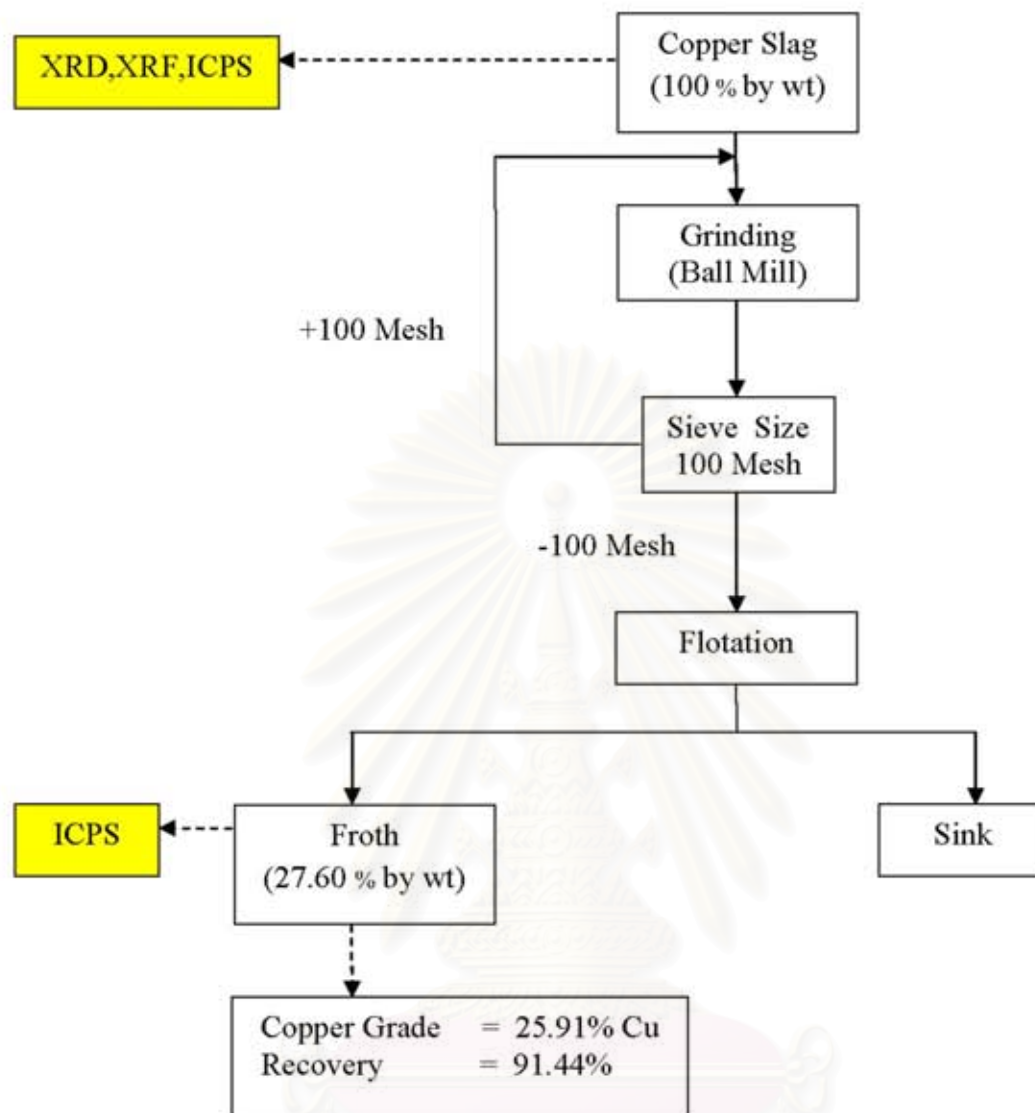


รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงจากตะกอนขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วยกระบวนการลอยแยก

ตารางที่ 4.4 ผลการเก็บกลับคืนตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 50 เมช ด้วย การลอยแยก

ขนาด (-50 เมช)	น้ำหนัก		เปอร์เซ็นต์ ทองแดง	เปอร์เซ็นต์ การกระจายตัว
	กรัม	เปอร์เซ็นต์		
แร่จม	86.10	17.22	27.80	61.21
แร่ลอย	413.90	82.78	3.66*	38.78
แร่ป้อน	500	100	7.82	100.00

\* คำนวณด้วยวิธีสมดุลของมวล (Mass Balance)

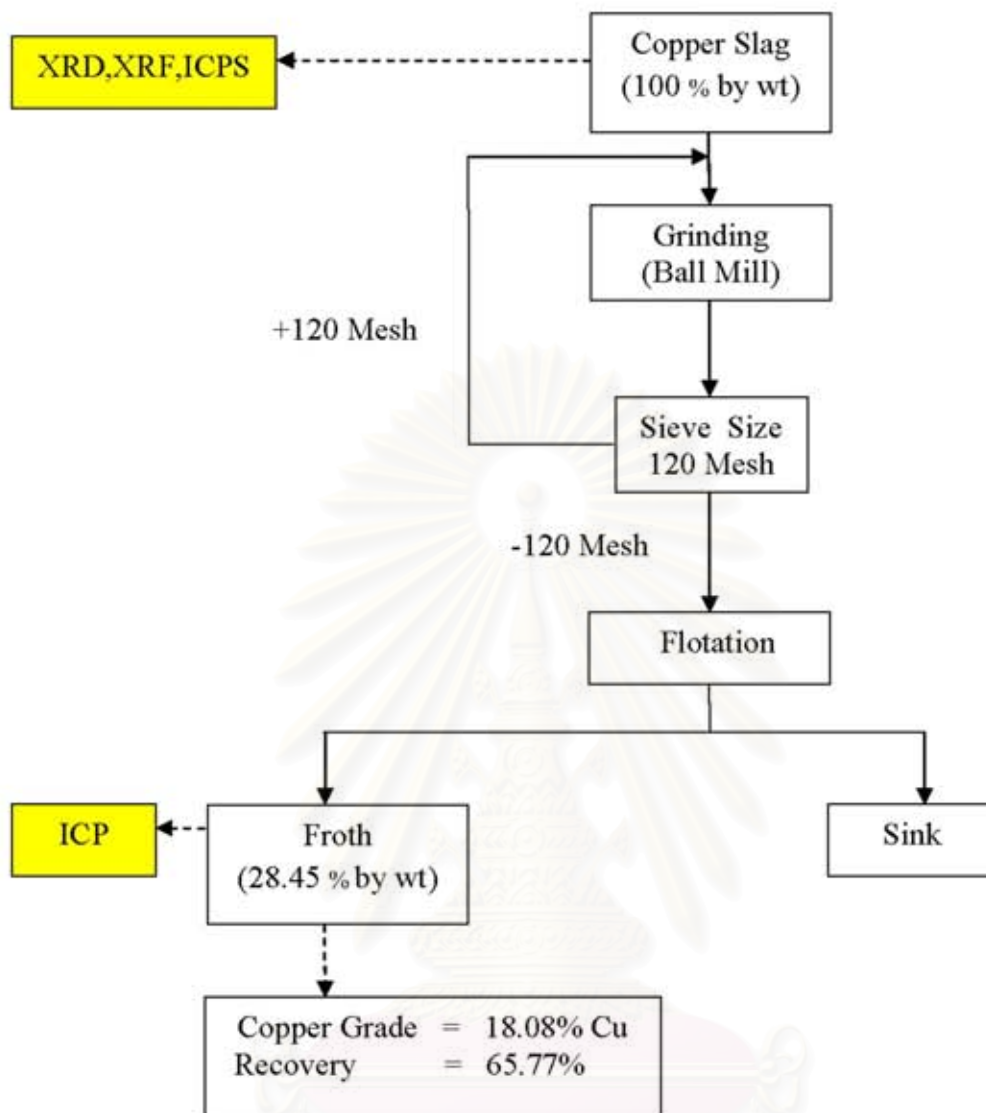


รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงจากตะกอนขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยกระบวนการลอยแยก

ตารางที่ 4.5 ผลการเก็บกลับคืนตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยการลอยแยก

ขนาด (-100 เมช)	น้ำหนัก		เปอร์เซ็นต์ ทองแดง	เปอร์เซ็นต์ การกระจายตัว
	กรัม	เปอร์เซ็นต์		
แระจุม	138.00	27.60	25.91	91.44
แระลอย	362.00	72.40	0.92*	8.56
แระป้อน	500	100	7.82	100.00

\*คำนวณด้วยวิธีสมดุลของมวล (Mass Balance)



รูปที่ 4.8 แผนผังแสดงขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงจากตะกอนขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยกระบวนการลอยแยก

ตารางที่ 4.6 ผลการเก็บกลับคืนตะกอนทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยการลอยแยก

ขนาด (-100 เมช)	น้ำหนัก		เปอร์เซ็นต์ ทองแดง	เปอร์เซ็นต์ การกระจายตัว
	กรัม	เปอร์เซ็นต์		
แร่จม	142.25	28.45	18.08	65.77
แร่ลอย	357.75	71.55	3.74*	34.23
แร่ป้อน	500	100	7.82	100.00

\* คำนวณด้วยวิธีสมดุลของมวล (Mass Balance)

#### 4.4.4 วิจัยณ์ผลการแยกทองแดงด้วยการลอยแยก

ผลของการศึกษาการเก็บกลับคืนตะกั่ว ด้วยกระบวนการลอยแยก เพื่อนำกลับเข้าสู่กระบวนการถลุงใหม่นั้น เพื่อให้ได้หัวตะกั่วทองแดงที่มีปริมาณทองแดงมากกว่า 23 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ขนาดของตะกั่วที่สามารถนำเข้าสู่กระบวนการเพื่อแยกทองแดงด้วยการลอยแยกคือที่ขนาดตะกั่วเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร และที่ขนาดตะกั่วเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร ซึ่งที่ขนาดตะกั่วเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร หลังผ่านกระบวนการลอยแยกแล้วในส่วนแร่วัตถุมีทองแดง 27.80 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเก็บกลับคืนได้ 61.21 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ขนาดตะกั่วเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร หลังผ่านกระบวนการลอยแยกแล้วในส่วนแร่วัตถุมีทองแดง 25.91 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเก็บกลับคืนได้ถึง 91.44 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่ขนาดทั้งสองสามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการถลุงใหม่ได้ แต่ที่ขนาดตะกั่วเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร สามารถเก็บกลับคืนทองแดงได้ดีกว่าที่ขนาดตะกั่วเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในลำดับอุตสาหกรรมต่อไป ส่วนในตะกั่วที่มีขนาดเล็กกว่า 120 ไมโครเมตร หลังผ่านกระบวนการลอยแยกแล้ว ในส่วนแร่วัตถุมีทองแดงผสมอยู่ 18.08 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่สามารถ นำกลับเข้าสู่กระบวนการถลุงใหม่ได้ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะขนาดของตะกั่วละเอียดเกินไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

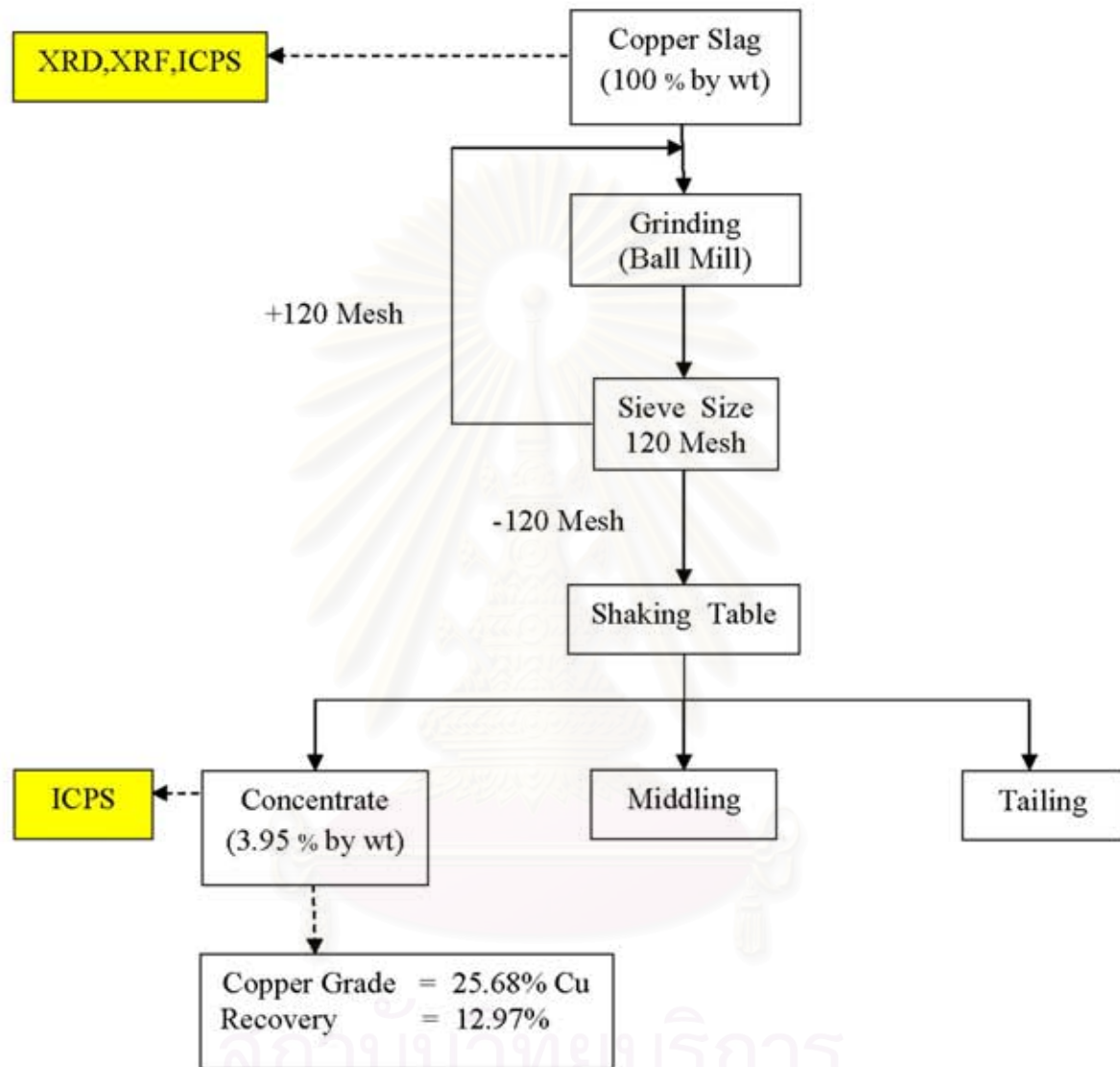
ตะกรันทองแดงจาก บริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาองค์ประกอบโดย เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) พบว่าประกอบไปด้วยสารประกอบสำคัญ 2 ชนิดคือสารประกอบ Horttonolite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) และสารประกอบ Azurite [ $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ] และผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงด้วยเครื่อง วิเคราะห์อินดักทีฟลิคัทเพิลพลาสมาสเปกโตรสโคปี (ICPS) พบว่ามีปริมาณทองแดงอยู่ในตะกรันทองแดงที่ 7.82 % Cu

##### 5.1.1 ผลการทดลองการแต่งตะกรันทองแดงด้วยโต๊ะสัน

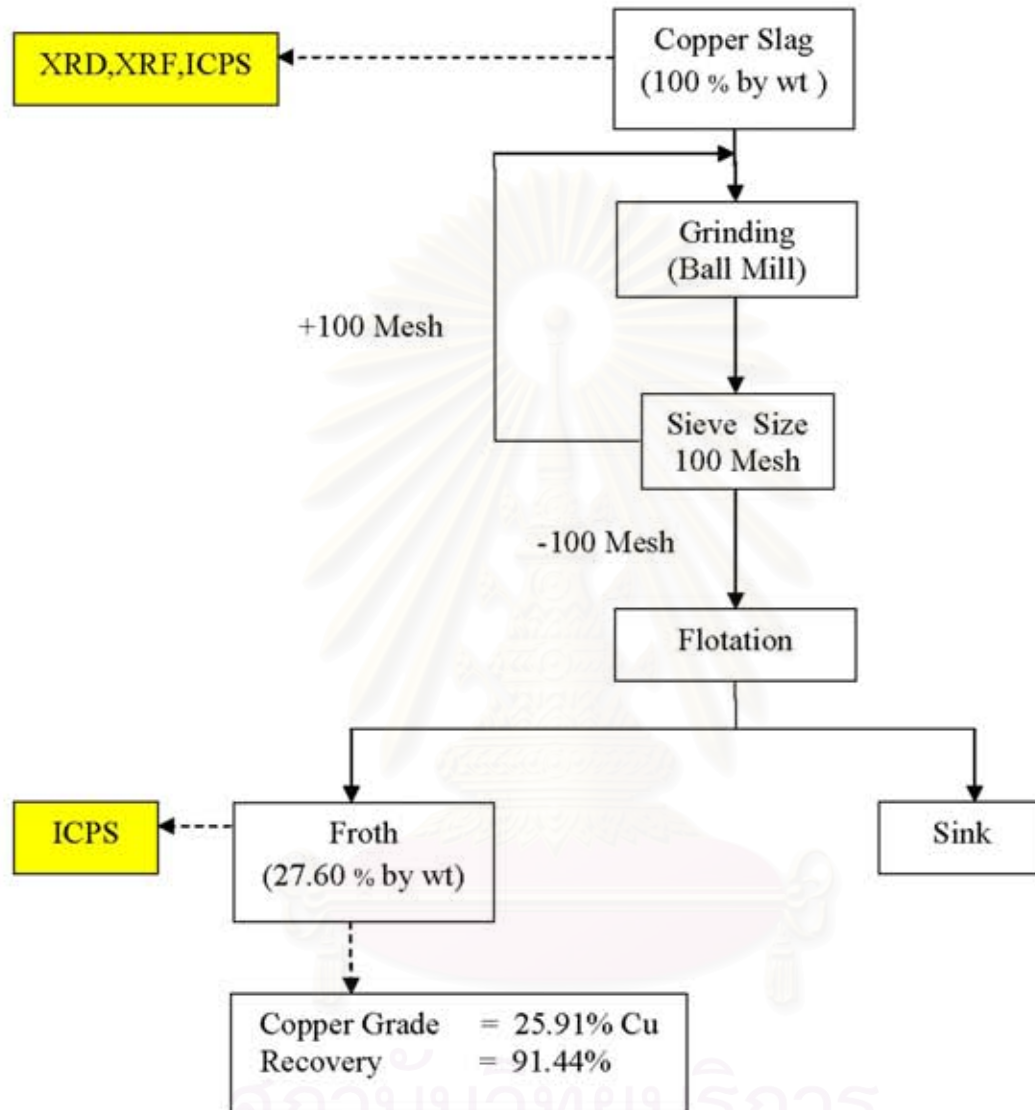
จากการนำทองแดงไปบดด้วยเครื่องบดลูกป็นกลมจนมีขนาดเล็กกว่า 50 , 100 และ 120 เมช ทั้งหมดแล้วป้อนเข้าโต๊ะสันพบว่าการบดตะกรันทองแดงขนาดเล็กกว่า 120 เมช ทั้งหมดสามารถแยกหัวตะกรันที่มีปริมาณทองแดง 25.61 เปอร์เซ็นต์ (สูงกว่า 23 เปอร์เซ็นต์ซึ่งสามารถป้อนกลับเข้าโรงถลุงได้) อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราการเก็บกลับคืนทองแดงค่อนข้างต่ำคือ 12.97 เปอร์เซ็นต์ (ดูรูปที่ 5.1 ประกอบ) ดังนั้นขบวนการแต่งแร่ตะกรันทองแดงด้วยโต๊ะสันจึงไม่เหมาะสม

##### 5.1.2 ผลการทดลองแต่งตะกรันทองแดงด้วยกระบวนการลอยแยก

จากการนำตะกรันทองแดงไปบดด้วยเครื่องบดลูกป็นกลมจนมีขนาดเล็กกว่า 50 , 100 และ 120 เมช ทั้งหมดแล้วทำการทดลองแต่งตะกรันด้วยวิธีการลอยแยกพบว่า เพื่อที่จะให้ได้หัวตะกรันทองแดงที่มีปริมาณทองแดงมากกว่า 23 เปอร์เซ็นต์ ควรบดตะกรันทองแดงให้มีขนาดเล็กกว่า 100 เมช ทั้งหมด สามารถแยกหัวตะกรันทองแดงได้ที่มีปริมาณทองแดงอยู่ 25.91 เปอร์เซ็นต์ (มากกว่า 23 เปอร์เซ็นต์) และสามารถเก็บกลับคืนได้ถึง 91.44 เปอร์เซ็นต์ (ดูรูปที่ 5.2 ประกอบ)



รูปที่ 5.1 แผนผังแสดงกระบวนการขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงในตระกรันทองแดง ขนาดเล็กกว่า 120 เมช ด้วยโต๊ะสั่น



รูปที่ 5.2 แผนผังแสดงขั้นตอนของการเก็บกลับคืน ทองแดงจากตะกอนทองแดง ขนาดเล็กกว่า 100 เมช ด้วยการลอยแยก



จากการศึกษาทดลองสามารถนำผลของการคัดแยกทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลของการแต่งแร่ ที่ได้ผลโดยรวมที่ดีที่สุดของวิธี โตะสั้น (Shaking Table) กับวิธี ลอยแยก (Froth Flotation)

Product	Yield (%)	% Cu	% Recovery
หัวแร่จาก โตะสั้น -120 เมช	3.95	25.68	12.97
แร่ลอยจากลอยแร่ -100 เมช	27.60	25.91	91.44

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากตะกรันทองแดง ยังสามารถ ทำการศึกษาวิจัยต่อไปได้อีก โดยการศึกษา ครั้งต่อไปอาจจะใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อสกัดเอาโลหะทองแดงออกจากตะกรันทองแดง

สำหรับการนำผลการศึกษาวิจัย ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมนั้น ควรมีการ พิจารณาศึกษาตัวแปรต่างๆ โดยละเอียด เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้เป็น การทดลองในห้องทดลอง จึงควรปรับตัวแปรต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ ใช้ได้อย่างเหมาะสมในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์, การเก็บกลับคืนทรัพยากรและการนำกลับมาใช้ใหม่, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549

ไทยคอปเปอร์ อินดัสทรี จำกัด (มหาชน) , กรรมวิธีการผลิตทองแดงบริสุทธิ์ ของบริษัท ไทยคอปเปอร์ อินดัสทรี จำกัด (มหาชน). [2007]

อภิสิทธิ์ น้ำประสานไทย, การกระจายตัวของโลหะมีค่าในตระกรันทุติยภูมิจากกระบวนการทำให้ทองคำบริสุทธิ์. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546

### ภาษาอังกฤษ

Sarrafi, B. Rahmati, H.R. Hassani and H.H.A. Shirazi Recovery of copper from reverberatory furnace slag by flotation. Shahid Bahonar University, 2003

W. J. Bruckard , M. Somerville and F. Hao The recovery of copper by Flotation from calcium ferrite based slags made in continuous pilot plant smelting trials, Clayton South, Vic., 3169, Australia  
Received 23 October 2003. Available online 1 February 2004.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

## เครื่องบดแร่แบบบดด้วยลูกปืนกลม (Ball Mill)



ออกแบบเพื่อที่จะใช้บดแร่และสารแข็งอื่นๆให้ละเอียด สามารถบดให้ละเอียดได้ 200-325 เมช และอาจทำได้ถึง 5 ไมครอน (microns) อย่างเช่นการบดแร่ Feldspar ด้วยเครื่องบดลูกปืนกลม (Ball Mill) ขนาดกระบอก 7.5 ฟุต x 10 ฟุต ที่ต้องการกำลัง 85 แรงม้า และแร่ป้อนขนาด 0.75 นิ้ว ทำงานได้ 1 ตัน ต่อ 1 ชม. จะได้แร่ขนาด 325 เมช ออกมามากกว่า 90%

การบดเกิดขึ้นได้จากแรง 2 แรง คือ แรงเหวี่ยง (Centrifugal Force) ทำให้สารที่อยู่ภายในกึ่งตัวเกาะติดกับผนังของรูปทรงกระบอก แต่เนื่องจากแรงดึงดูดของโลกทำให้ตกลงมาตรงส่วนล่างต่ำสุดของทรงกระบอก อีกแรงหนึ่งเกิดขึ้นจากการเกิด Cascading ของลูกปืนกลม ซึ่งจะควบคุมได้โดยการปรับความเร็วของการหมุนของทรงกระบอก ถ้าหมุนเร็วจะทำให้เกิดการบดได้ในอัตรา ส่วนสูงจากแรง Shear Impact โดยการตกตัวของลูกปืนที่อยู่ภายใน แต่ถ้าการหมุนของหม้อบดช้าเกินไป ก็เกิดเฉพาะการขีดถู เช่น การกึ่งตัว การสั่น โกลของสารที่จะบดทำให้แร่ที่ถูกบดมีส่วนละเอียดมากขึ้นไป ตามทางทฤษฎีแล้ว ความเร็วของการบดแร่จะต้องเป็นความเร็ววิกฤต (Critical Speed) ซึ่งกำหนดว่ามักใช้สำหรับบดสารหรือแร่ให้ละเอียดมาก เช่น การแยกแร่ด้วยวิธีลอยแร่ (Flotation) หรือ Cyanidation เป็นต้น

ลูกบดชนิดกลม (Ball) ตามปกติทำด้วย Chilled Cast Iron หรือเหล็กหล่อ เหล็กชุบแข็ง หรือเหล็กผสมแข็ง ขนาดของลูกบดแล้วแต่ขนาดของแร่ที่จะนำมาบด และขึ้นอยู่กับขนาดที่ต้องการจะบดสำหรับการบดขนาดหยาบ ลูกบดขนาดใหญ่ดี ส่วนลูกบดขนาดเล็กเหมาะสำหรับบดสารขนาดเล็กๆ เพราะเนื้อที่ในการบด (Grinding Area) มาก

ที่มา : ฝ่ายสารสนเทศและวิเทศสัมพันธ์กองส่งเสริมธุรกิจและเผยแพร่กรมทรัพยากรธรณี,คู่มือการแต่งแร่  
พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: ฝ่ายสารสนเทศกองส่งเสริมธุรกิจและเผยแพร่ กรมทรัพยากรธรณี, 2527

## ภาคผนวก ข.

## ตะแกรงมาตรฐาน (SLEVE)



การวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเป็นวิธีที่นิยมกันมาก ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยเส้นลวดนำมาสานกันทำให้เกิดเป็นช่องสี่เหลี่ยมและมีขนาดเป็นเมช (Mesh) ตะแกรงขนาด 10 เมช ซึ่งหมายถึงระยะความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องรูตะแกรงจำนวน 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกเสียจากเส้นผ่าศูนย์กลางของลวด คำนวณค่าว่าเมช ซึ่งยังไม่ได้ออกขนาดที่แท้จริงของอนุภาคที่ผ่านลวดตะแกรง จนกว่าจะทราบขนาดเส้นลวดที่โรงงานต่างๆ นำมาใช้สานทำตะแกรง วิธีง่ายๆ อีกวิธีหนึ่งจะทราบขนาดช่องตะแกรงเป็นเมช ก็คือเมื่อทราบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดและช่องว่าง (หน่วยเป็นนิ้ว) แล้วนำตัวเลขทั้งสองไปรวมกันแล้วหาร 1 ผลลัพธ์ที่ออกมาจะเป็นเมช เช่น ตะแกรงมีช่องว่าง 0.0015 นิ้ว และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดเท่ากับ 0.0010 นิ้ว เมื่อนำมารวมกันจะได้ 0.0025 นิ้ว เมื่อนำไปหาร 1 จะได้เท่ากับ 400 คือขนาดของตะแกรงนั้นเป็น 400 เมช

ตะแกรงชุดหนึ่งๆ มันจะมีกฎเกณฑ์ขนาดของรูลดหลั่นไป ถ้าจะใช้หลักการก้าวหน้าทางเลขคณิต (Arithmetic Series) อย่างง่ายๆ คือ 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 และ 1 นิ้วตามลำดับ จะเห็นว่าหลักนี้ไม่เหมาะสม เพราะว่าอนุภาคขนาด 1 นิ้ว และ 10 นิ้ว ซึ่งคูแล้วเกือบจะไม่เห็นความแตกต่าง คำนวณจึงมีผู้คิดค้นขึ้นใหม่โดยหาตัวคูณที่มาจาก เช่น ใช้ 2 เป็นตัวคูณ ตัวเลขจะออกมา 8, 4, 2 และ 1.5 นิ้ว เป็นต้น ซึ่งอยู่ในระบบความก้าวหน้าทางเรขาคณิต (Geometric Series) แต่ต่อมาได้มีการแก้ไข  $\sqrt{2}$  เป็นตัวคูณ และได้กลายเป็นมาตรฐานของตะแกรงที่ใช้กันในประเทศสหรัฐอเมริกาในปัจจุบัน ในงานค้นคว้าบางงานใช้  $\sqrt[4]{2}$  เป็นตัวคูณและทางบริษัทผู้ผลิตได้ยึดเอาตะแกรงขนาด 200 เมชเป็นมาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ 75 ไมครอน หรือ 0.0075 มิลลิเมตร

ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในงานคัดขนาดทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 3 ถึง 400 เมชเป็นส่วนใหญ่ โดยขนาด 400เมช เท่ากับขนาดของรูตะแกรง 38 ไมครอน (1 ไมครอน = 1/1,000 มิลลิเมตร) สำหรับการคัดขนาดด้วยตะแกรงที่มีรูขนาดเล็กกว่านี้ จะใช้ตะแกรง Micromesh ซึ่งสามารถคัดขนาดได้เล็กถึง 5-10 ไมครอน

การคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานนี้ ทำได้โดยการนำเอาอนุภาคของแข็งไปผ่านบนตะแกรงที่มีขนาดต่างๆ แต่หากต้องการคัดขนาดออกมาหลายๆขนาดก็ต้องวางชุดตะแกรง (Stack of Sieves) เป็นหลายๆชั้น ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้คัดขนาดติดอยู่กับส่วนล่างของโลหะทองเหลืองรูปกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 นิ้ว สูงประมาณ 2 นิ้ว ตะแกรงชุดหนึ่งจะประกอบไปด้วยตะแกรงขนาดต่างๆมีฝาครอบที่ตะแกรงชั้นบนสุดและล่างสุดจะมี Pan รองรับ Pan มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับตะแกรงทุกๆ ไป แต่ข้างล่างแทนที่จะมีลวดเป็นตะแกรงกลับเป็นโลหะทึบสำหรับรองรับอนุภาคที่ผ่านตะแกรงชั้นที่เหนือกว่าไว้ หลังจากการคัดขนาดจะมีอนุภาคค้างอยู่บนตะแกรงเรียกว่า อนุภาคขนาดเกิน (Oversize)

สิ่งที่ควรระวังในการคัดขนาดก็คือ อย่าใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่งๆ เพราะอนุภาคจะเกิดการอุดตันในรูตะแกรงมาก และอาจจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะทำให้อนุภาคเม็ดเล็กๆ เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ผิดไป นอกจากนี้ความชื้นจะต้องมีน้อยที่สุด

ที่มา : ฝ่ายสนเทศและวิเทศสัมพันธ์กองเสริมธุรกิจและเผยแพร่กรมทรัพยากรธรณี, คู่มือการแต่งแร่ พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: ฝ่ายสนเทศกองเสริมธุรกิจและเผยแพร่ กรมทรัพยากรธรณี, 2527

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค.

## เครื่องเอกซเรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ X-Ray Diffractometer (XRD)



เอกซเรย์ ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุ ในรูปของสารประกอบซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย เครื่องเอกซเรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ถูกนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ในการค้นคว้าวิจัยสำหรับวิทยาศาสตร์ พื้นฐานรวมทั้งในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ โดยทั่วไปสามารถประยุกต์ใช้ในด้านของธรณีวิทยา ในด้านของเคมีเกี่ยวกับอนินทรีย์สาร ในด้านของฟิสิกส์ ในด้านของการค้นคว้าวิจัยอุปกรณ์เครื่องมือ และในด้านของอุตสาหกรรมแร่ธาตุต่างๆ เป็นต้น หลักการการทำงานในด้านของธรณีวิทยา ในด้านของเคมีเกี่ยวกับอนินทรีย์สาร ในด้านของฟิสิกส์ ในด้านของการค้นคว้าวิจัยอุปกรณ์เครื่องมือ และในด้านของอุตสาหกรรมแร่ธาตุต่างๆ เป็นต้น หลักการการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) สามารถอธิบายได้ คือ ในอะตอมหนึ่งๆของธาตุใดๆ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ นิวเคลียสและอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนซึ่งเป็น Primary Electron ถูกยิงเข้าสู่ตัววัตถุก็จะเคลื่อนที่ไปชนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่รอบนิวเคลียสของอนุภาคแล้วสะท้อนกลับออกมา อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับออกมานี้เรียกว่า Backscatter Electron ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกชนได้รับการถ่ายเทพลังงาน Backscatter Electron ทำให้มีพลังงานสูงกว่าแรงดึงดูดจากนิวเคลียส จึงเคลื่อนที่หลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนตัวนี้เรียกว่า Secondary Electron หาก Secondary Electron เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรชั้นในแล้ว อิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอกที่มีพลังงานจลน์สูงกว่า ก็จะกระโดดเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะถูกรวบรวมโดยเครื่องตรวจจับสัญญาณและเนื่องจากว่าค่าพลังงานในแต่ละชั้น วงโคจรของในแต่ละธาตุ จะมีค่า

เฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับขนาดและรัศมีของวงโคจรจึงสามารถทราบได้ว่าเป็นธาตุใด ในขณะที่เดียวกันก็มี Primary Electron บางส่วน ที่ไม่ชน แนวการเคลื่อนที่ให้อิเล็กตรอนกลับขึ้นมา อิเล็กตรอนส่วนนี้ เรียกว่า Auger Electron

จากสูตร  $n\lambda = 2d \sin \theta$  ( $\theta$  คือมุมที่กวาดคอนำ XRD)

ค่าที่สนใจคือค่า  $d$  ซึ่งคือ ระยะระหว่างอะตอมในผลึก อันเกิดจากการเชื่อมพันธะ ค่า  $d$  เป็นค่าเฉพาะในแต่ละธาตุ หากทราบค่านี้ก็จะทราบโครงสร้างของธาตุ ทำให้ทราบว่าธาตุที่วิเคราะห์เป็นธาตุใด และ จาก  $d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$  ก็จะสามารถบอกชนิดโครงสร้างของสารประกอบได้ ในการทำ XRD ดังนั้น เมื่อรังสีกระทบตัวอย่าง รังสีจะเกิดการกระจาย จึงต้องใช้ Collimator และ Crystal มาจับให้รวมกัน เครื่องตรวจจับจึงสามารถตรวจจับและแปลข้อมูลออกเป็นกราฟได้

ที่มา : Buhrke, E.V. & Jerhins, h & 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, 1998



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ง.

## เครื่องเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรโกปี X-Ray Fluorescence spectroscopy(XRF)



เมื่อปี ค.ศ. 1895 W.C. Rontgen ได้ค้นพบรังสีเอกซ์ (X-Ray) ซึ่งเป็นสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่ง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.1-100 อังสตรอม ( $\text{\AA}$ ) หรือ 0.1-10 nm แต่ที่ใช้ในทางเคมีวิเคราะห์จะอยู่ในช่วง 0.07-0.2 nm รังสีเอกซ์จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์หลายอย่าง ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรโกปี เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีเป็นแบบไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive Analysis) สามารถทำได้ทั้งวิเคราะห์ธาตุเดี่ยว ทีละธาตุ (Sequential) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (Simultaneous) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ทันสมัย มีความสามารถสูง ได้นำมาใช้ในระบบข้อมูลด้วย ช่วยให้เทคนิคนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย เพราะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นสูงไปจนถึงความเข้มข้นต่ำ บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับ Trace Analysis (ppm) ซึ่งวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง XRF มีอยู่ 2 ระบบ คือระบบที่วัดความยาวคลื่น (Wavelength Dispersion System) และระบบที่วัดเป็นพลังงาน (Kev) (Energy Dispersion System)

โดยในการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคทาง XRF นั้นมีหลักการและขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการดังนี้ คือ ลำรังสีเอกซ์ที่ได้จากเครื่อง X-Ray Generator (ซึ่งมีหลอดรังสีเอกซ์อยู่) จะถูกส่งไปยังสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่างๆ ในสารตัวอย่าง แล้วเกิดเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์เป็นลำขนานและไปในทิศทางที่ต้องการ คือ ไปกระทบกับ Analysis Crystal ซึ่งอยู่ในสเปกโตรมิเตอร์ที่ทำให้เป็นสูญญากาศหรือความกดดันต่ำมากๆ Analysis Crystal นี้จะทำหน้าที่

กระจายหรือแยกรังสีเอกซ์ออกไปให้มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน คล้ายกับเกรตติงทำหน้าที่แยกแสงในเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโกปี รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันจะถูกวัดความเข้มหรือกำลัง (Power) ด้วยการสแกน (Scan) ของดีเทคเตอร์ สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูล แล้วถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัมด้วยเครื่อง Printer หรือ Recorder จากข้อมูลที่เก็บได้ทั้งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้

ที่มา : Buhrke, E. V. & Jerhins, h & 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, 1998



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ.

## เครื่องวิเคราะห์อินดักทีฟพลาสมาตามาตาปกโรจโคปี (ICPS)



เป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตพลาสมาโดยไม่ต้องมีขั้วไฟฟ้าให้ Ar ไหลผ่านท่อหรือคอบ (Torch) ซึ่งทำด้วย Quartz ซ้อนกัน 3 ชั้น ที่ปลายด้านบนพันด้วยขดลวดตัวนำทำด้วยโลหะทองแดง (Cu Load Coil) ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องส่งความถี่วิทยุ (RF Generator) เมื่อปล่อย RF Power (นิยมใช้ 700-1500 วัตต์) เข้าไปใน Load Coil จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เคลื่อนที่ไปมาใน Load Coil จะทำให้เกิดคลื่นวิทยุ (ใน ICP นิยมใช้ 27 หรือ 40 MHz) ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายคอบแล้วทำให้เกิดการชักนำให้มีกระแสไฟฟ้า (Eddy Current) ไหลผ่านตัวนำ ทำให้ตัวนำมีความร้อนเกิดขึ้น

ก๊าซ Ar จะถูกทำให้เป็นตัวนำ (แตกตัวเป็นไอออน) โดยทำให้เกิดสปาร์ก หรือปล่อยประจุไฟฟ้าจาก Tesla Discharge ให้ผ่านก๊าซ Ar เมื่อทำให้ Ar แตกตัว ได้อิเล็กตรอนเกิดขึ้น ประกอบกับถูกเร่งด้วยสนามแม่เหล็ก ทำให้  $e^-$  มีพลังงานเพิ่มขึ้น เกิด Inductive Coupling

โดย  $e^-$  ที่มีพลังงานสูงนี้จะชนกับ Ar ทำให้เกิด  $Ar^+$  และ  $e^-$  มากขึ้นเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ กลายเป็นพลาสมาเมื่อสารตัวอย่าง (ที่ถูกทำให้เป็นฝอย) ได้รับความร้อนจะระเหยเป็นไอ อยู่ในสภาพอะตอมอิสระที่สภาวะกระตุ้น ซึ่งในที่สุดจะคายพลังงานเพื่อกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำลง ความเข้มของคลื่นแสงที่คายออกมาจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์, 2535

## ภาคผนวก ฉ.

เครื่องแยกโดยการเคลื่อนที่ในของเหลวหรือน้ำเป็นชั้นบางและมีการเคลื่อนที่ในแนวราบ (Shaking Table)



วิธีการแยกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของเม็ด วัสดุ ในของเหลวและมีการเคลื่อนที่ในแนวราบ เป็นหลักการของ โด๊ะสันแยกแร่และวัสดุ การแยกวิธีนี้ใช้กับเม็ดวัสดุขนาดละเอียด ข้อเสียที่เห็นได้ชัดเจนของการแยกด้วยวิธีการนี้ได้แก่ การมีอัตราการทำงานที่ต่ำ ต้องการพื้นที่ในการทำงานมาก จึงมัก ใช้กับแร่ หรือ วัสดุที่มีราคาสูง โดยโด๊ะสันจะมีการทำงานโดยการสั่นหรือเขย่าในทิศทางตั้งฉากกับทิศทาง การไหลของน้ำที่เป็นตัวกลางที่มีวัสดุป้อน พื้นโด๊ะสันมีร่องกันตลอดแนวยาวของ โด๊ะ ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของน้ำและวัสดุป้อนกลไกที่ทำให้มีการสั่นประกอบด้วยเพลาลูกเบี้ยว และแกนเหล็กยึดที่ให้ตัว ได้โดยให้การเคลื่อนที่หยุดลงอย่างทันทีทันใดที่ทำให้เกิดการเขย่าทั้ง โด๊ะ วัสดุถูกป้อนเข้าที่ด้านบนของ โด๊ะและกระจายไปตามร่อง วัสดุขนาดละเอียดและเบาจะเดินข้าม โด๊ะลงไปอย่างรวดเร็วและออกไปทางด้านหัว โด๊ะ ในขณะที่วัสดุขนาดหยาบจะเดินทางไปตามร่องด้วยการเขย่าหรือสั่นตามแนวยาวของ โด๊ะและออกไปทางด้านท้ายโด๊ะ

แรงที่กระทำต่อเม็ดวัสดุบนพื้นโด๊ะเกิดขึ้นใน 2 ทิศทาง คือ แรงเนื่องจากการไหลของน้ำ และแรงสั่นของ โด๊ะ ทั้งสองแรงจะกระทำในทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกันและเป็นตัวแปรที่สำคัญ ในการแยกวัสดุ การเคลื่อนที่ของเม็ด วัสดุ ในขณะที่น้ำไหลเป็นชั้นบางนั้น เม็ด วัสดุหนักจะเคลื่อนที่ไปตามน้ำได้ช้ากว่าเม็ด วัสดุเบาและเม็ดขนาดเล็กจะช้ากว่าเม็ดขนาดใหญ่ โด๊ะสันมีส่วนประกอบสำคัญได้แก่

1. พื้นโด๊ะที่อาจทำด้วยไม้หรือไฟเบอร์หรือบุด้วยยาง และมีไม้ลูกระนาดวางกันเป็นรอยตามแนวยาวของ โด๊ะโดยมีความหนาตอนช่วงแรกทางด้านที่ป้อนวัสดุเข้ามาแล้วค่อยๆ บาลง

ตอนปลายโตะและอาจจะใช้แผ่นทองแดงบางแทน ลูกชิ้นทำให้เม็ดวัสดุถูกกักและแยกตัวตามความหนาแน่นตามร่องระหว่างลูกชิ้น

2. กลไกในการขับเคลื่อนและทำให้สั้นในแนวราบ บางแบบอาจออกแบบให้สั้นในแนวระนาบและในขณะเดียวกันมีการสับัดเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งมีผลดีในการแยกโดยทำให้เม็ดหยาบถูก โยนตัวให้เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและชั้นเม็ดวัสดุที่คกอยู่ในร่องหุนตัว เกิดการแยกกันเด่นชัดมากขึ้น การเคลื่อนที่ของกลไกของ โตะทำให้เม็ดวัสดุเคลื่อนที่ไปตามแนวยาวของโตะตามร่องลูกชิ้น โดยเม็ดที่หนักจะเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าเม็ดที่เบาว่า
3. โครงเหล็ก ทำหน้าที่รองรับพื้น โตะและปรับความลาดเอียงของพื้น โตะขนาดของเม็ดวัสดุและแร่ที่แยกได้ผลคืออยู่ที่ประมาณ 20 เมช ลงไปถึงประมาณ 450 เมชหรือละเอียดกว่าโตะสั้นแบบออกได้เป็น 2 แบบตามขนาดของเม็ดวัสดุที่จะแยก คือโตะสั้นแยกขนาดเม็ดทรายและ โตะสั้นแยกขนาดตะกอน ซึ่งเหมาะสำหรับแยกขนาดประมาณ 200-300 เมช ลงไป การแยกโดย โตะสั้น นอกจากความแตกต่างของความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะแล้วจะขึ้นอยู่กับลักษณะและปริมาณการไหลของน้ำหรือของเหลวบนพื้นเอียง ความหนืดของของเหลว และรูปทรงของเม็ดวัสดุ เช่น เม็ดรูปทรงกลมจะไหลไปได้ไกลกว่ารูปทรงแบนหรือเหลี่ยมเป็นต้น

ประสิทธิภาพในการทำงานของ โตะสั้นขึ้นกับตัวแปรหลายตัวแปร โดยแบ่งเป็น 2 ตัวแปรหลักได้แก่

#### 1 ตัวแปรออกแบบ

- รูปทรงของโตะ
- วัสดุพื้น โตะ
- รูปทรงและการจัดวางของลูกชิ้น
- ความถี่ช่วงชัก
- ความยาวช่วงชัก
- ทิศทางเคลื่อนที่ของโตะ

#### 2. ตัวแปรการทำงาน

- ความเอียงของพื้น โตะ
- การกระจายของขนาดวัสดุป้อน
- ความหนาแน่นของของผสมที่ป้อน
- ปริมาณน้ำ
- การจัดวางช่องรับผลผลิตที่ได้จาก โตะ

ในการทำงานโดยทั่วไปนั้น การแยกชิ้นต้นหรือการแยกวัสดุขนาดหยาบจะใช้ปริมาณน้ำมาก อัตราการป้อนวัสดุมาก ปรับไต้ะให้มีความลาดเอียงมาก ตั้งความถี่ช้าและช่วงชักยาว แต่ถ้าวัสดุป้อนมีขนาดละเอียดมาก ควรจะใช้ปริมาณน้ำน้อย อัตราการป้อนน้อย มีความถี่ช่วงชักมากและความยาวช่วงชักสั้น และถ้าวัสดุป้อนมีขนาดหยาบขึ้น ควรใช้ความถี่ช่วงชักช้าลงและความยาวช่วงชักมากขึ้น

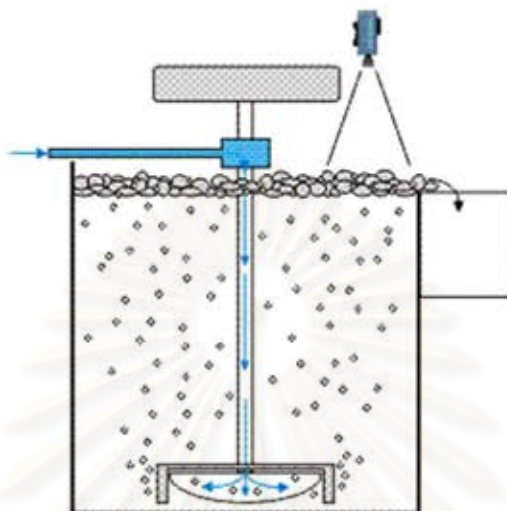
ความเข้มข้นของของผสมวัสดุป้อน โดยปกติจะใช้สัดส่วนปริมาณของแข็งร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก วัสดุป้อนควรผ่านการคัดขนาดมาก่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกซึ่งจะต่ำลงถ้าวัสดุมีขนาดหยาบมาก การแยกด้วยไต้ะสั้นจึงเหมาะกับวัสดุเบาที่มีขนาดหยาบแยกออกจากวัสดุหนักที่ละเอียดกว่า และวัสดุหรือแร่ที่ผ่านการคัดขนาดด้วยน้ำโดยการตกตัวในอุปกรณ์คัดพวกมาก่อนแล้วเช่น ไฮโดรไซโคลอนหรืออุปกรณ์คัดพวกแบบรวงวนจึงเหมาะสำหรับการคัดแยกในตอนต่อไปด้วยไต้ะสั้น

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือพิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์, 2535

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ๕.

## การคัดแยกด้วยการลอย (Flotation)



## 1. พื้นฐานการลอยแร่และวัสดุ

กระบวนการลอยแร่และวัสดุเป็นกระบวนการที่ทำให้เม็ดแร่ และ วัสดุเลือกเกาะตัวกับน้ำหรืออากาศ ซึ่งสามารถทำให้เกิดการแยกแหว่งระหว่างเม็ดแร่และวัสดุสองชนิดที่มีคุณสมบัติ ในการเกาะตัวกับน้ำหรืออากาศต่างกัน ได้กระบวนการลอยอาศัยคุณสมบัติทางเคมีพื้นผิวของแร่ และวัสดุและการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในของเหลวเป็นหลักในการทำงานและเป็นกระบวนการดั้งเดิม ที่มีการพัฒนาและใช้แพร่หลายในการคัดแยกและปรับปรุงคุณภาพแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กลุ่มแร่ซัลไฟด์ และได้ประยุกต์ใช้ในการคัดแยกประเภทอื่นรวมทั้งการแยกสิ่งเจือปนในน้ำ เช่น การใช้กระบวนการลอยแบบละลายอากาศ (Dissolved Air Flotation, DAF) ในการลอยแยกตะกอนแขวนลอยและสารอินทรีย์ออกจากน้ำเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค น้ำใช้ในอุตสาหกรรมและน้ำเสียอุตสาหกรรมบางประเภท เสียก่อนปล่อยทิ้งออกมาสู่สิ่งแวดล้อม

## 1.1 คุณสมบัติของแร่และวัสดุในการลอย

แร่และวัสดุซึ่งเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วย โมเลกุลอยู่เป็นจำนวนมาก แขนของโมเลกุลซึ่งอยู่ภายในจะมีการจับกันอย่างสมดุลแต่ โมเลกุลที่ผิวนอกสุดจะมีแขนเหลืออยู่ที่มีพลังงานสามารถจับกับ โมเลกุลอื่นที่มาสัมผัสได้แขนหรือพลังงานนี้เรียกว่าพลังงาน

พลังงานผิวอิสระ (Free Surface Energy) หรือของเหลวเรียกว่าแรงตึงผิว (Surface Tension)

พลังงานที่ผิวของสารประกอบแต่ละชนิดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ชนิด และวิธีการจับของแขนโมเลกุลด้วย การบดแร่และวัสดุให้แตกจะทำให้แขนของการจับแตกออกจากกัน เกิดแขนอิสระซึ่งสามารถจับกับโมเลกุลอื่นที่มาสัมผัสได้ ถ้าแต่เดิมเป็นการจับที่มีพลังงานสูงหรือการจับด้วยทางเคมี (Chemical Bond) การที่จะทำให้แขนของการจับนี้แตกออกจากกันก็ต้องใช้พลังงานที่สูงกว่า และแขนอิสระที่จะเกิดขึ้นใหม่ก็จะมีพลังงานสูง เช่นเดียวกัน ถ้านำแร่หรือ สารประกอบวัสดุ ที่มีพลังงาน สูงเช่นนี้ใส่ลงในของเหลวเช่นน้ำ แร่และวัสดุประเภทนี้ ได้แก่ แก้ว ควอตซ์ ซิลิกา แร่และสารประกอบออกไซด์ต่างๆเป็นต้น สารประกอบบางชนิดมีการจับกันระหว่างโมเลกุลอย่างเบาบางเมื่อเทียบกับชนิดแรก การทำให้หลุดจากกันก็อาจทำได้โดยง่ายใช้แรงเพียงเล็กน้อย โดยมากเป็นวัสดุที่เปราะและมักแตกตามรอยสลัก แขนของการจับกันแบบนี้เป็นการจับทางกายภาพ (Physical Bond) เมื่อนำแร่และวัสดุเช่นนี้ใส่ลงในน้ำจะเปียกน้ำได้ยากกว่าแร่และวัสดุประเภทแรกและ การลอยได้ดี ตัวอย่างของแร่และวัสดุประเภทนี้ ได้แก่ แกรไฟต์ ถ่านหินแร่ซัลไฟด์ต่างๆและพลาสติกเป็นต้น

พลังงานที่ผิวนอกจากขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและวิธีการจับของแขน โมเลกุลแล้วยังขึ้นอยู่กับสภาพการเกิดทางธรณีวิทยาของแร่และแหล่งที่มาของวัสดุอีกด้วย นอกจากนั้นสภาพแวดล้อมอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารละลาย น้ำ ก๊าซ หรืออากาศที่สัมผัสอยู่โดยรอบก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติในการตอบสนองต่อการลอย เป็นอย่างมากเช่นเดียวกับชนิดและปริมาณสารเคลือบผิวที่ใช้จึงอาจแตกต่างกัน ได้มาก เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวมานี้

การลอยแร่และวัสดุแบ่งออกตามประเภทวัสดุเป็นประเภทใหญ่ๆ คือ การลอยแร่กลุ่มซัลไฟด์และการลอยกลุ่มไม่ใช่ซัลไฟด์ ซึ่งส่วนใหญ่ก็คือ แร่และวัสดุออกไซด์และอื่น ในทางปฏิบัติ อาจแบ่งแร่และสาร ประกอบออกเป็น 6 จำพวกคือ

1. แร่และวัสดุซัลไฟด์ของโลหะ ได้แก่ แร่และวัสดุซัลไฟด์ของทองแดง เหล็ก ตะกั่ว สังกะสี ตะกั่ว พลวง และ บิสมัท เป็นต้น แร่และวัสดุพวกนี้สามารถแยกแต่ละประเภทออกจากกัน ได้ผลดีด้วยวิธีการลอย
2. แร่และวัสดุโลหะซึ่งมีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำโดยธรรมชาติ ได้แก่ แร่หินสบู่ ถ่านหิน แกรไฟต์ กำมะถัน โมลิบดีนัม และพลาสติก แร่และวัสดุพวกนี้ปกคิลอยได้ง่ายด้วยตัวเองอยู่แล้วเพียงแค่ทำฟองก็สามารถ แยกออกจากแร่และวัสดุประเภทอื่นๆได้



3. แร่และสารประกอบคาร์บอนेटและซัลเฟตของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น แร่และสารประกอบคาร์บอนेटและซัลเฟตของทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น การลอยแร่และวัสดุประเภทนี้ต้องปรับผิวให้เป็นซัลไฟด์เสียก่อน
4. เกลือของแคลเซียม แมกนีเซียม แบริียม และสตรอนเซียม ได้แก่ แร่ซีไลต์ โทเวลโลท์ อะพาไทต์ ฟลูออไรต์ แคลไซต์ แบไรต์ แมกนีไซต์ โดโลไมต์ แร่และวัสดุพวกนี้สามารถลอยได้ผลค่อนข้างดี แต่ต้องเลือกน้ำยาเคลือบผิว และควบคุมสภาพการลอยให้เหมาะสม
5. แร่และวัสดุออกไซด์ซิลิเกต และอลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ แก้ว ทราช กอ รันคัม ฮิปซัม เซอร์คอน รูไทล์ อิลเมไนต์ โมลิบดีไนต์ ซิมาไทต์ แมกนีไทต์ คีบุก ไพโรลูไซต์ ไคยาไนต์ เฟลด์สปาร์ ดินขาว ไยหิน เป็นต้น การลอยแร่แล้ววัสดุประเภทนี้ไม่ค่อยได้ผลดีเนื่องจากธรรมชาติเป็นแร่ที่เปียกน้ำง่ายไม่เหมาะกับการลอย สารเคมีที่ใช้ในการลอยเหล่านี้ต้องเป็นสารเคมีชนิดแรง สารเคมีที่มักใช้เป็นสารเคลือบผิวได้แก่พวกไขมันต่างๆ ซึ่งไม่ได้มีปฏิกิริยาเฉพาะเจาะจง และเนื่องจากแร่และวัสดุเหล่านี้มักเกิดปนกันอยู่หลายชนิดทำให้การแยกไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร
6. เกลือซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ได้แก่ เฮไลต์ ซิลไวต์ คานาลไลต์ เป็นต้น การลอยเกลือเหล่านี้ต้องทำงานในสารละลายอิมดัวและใช้สารเคมีเคลือบผิวที่เหมาะสม

## 1.2 พฤติกรรมของผิวสัมผัส

เพื่อจะเข้าใจถึงกลไกการลอย จำเป็นต้องศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพฟิสิกส์และเคมีของพื้นผิวให้เข้าใจ ถึง ผลที่เกิดขึ้น จาก การเปลี่ยนแปลง ส่วนประกอบทางเคมีของสภาพแวดล้อมที่มีต่อพื้นที่ผิวสัมผัสในระบบ 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ วัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ จะมีพื้นที่ผิวที่ส่วนมาก จะสามารถให้น้ำปกคลุมให้เปียกได้ โดยสมบูรณ์ได้ การที่จะทำให้ลอยบรรลุผลได้จำเป็นจะต้องทดแทนที่พื้นที่ผิวสัมผัส ของแข็ง ของเหลว ด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสของแข็ง ก๊าซ โดยสมบูรณ์การแทนที่ของ ก๊าซ หรือ อากาศในน้ำสามารถทำได้โดยใช้สารเคมีที่มีปฏิกิริยา ทำให้ผิวหน้าของแข็งเปลี่ยนคุณสมบัติไปโดยจะถูกปกคลุมด้วยชั้นบางๆ ของโมเลกุลของสารเคลือบผิวที่ไม่ชอบน้ำหรือ ไม่เปียกน้ำมาก

ไกในการลอยจึงอยู่บนพื้นฐานของปฏิกิริยาบนผิวหน้าวัสดุที่เป็นของแข็งทำให้อากาศเข้าแทนที่น้ำเพื่อให้เม็ดวัสดุสามารถเกาะติดกับฟองอากาศได้ถ้ามีการชนกับฟอง

### 1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิวและสถานะของพื้นผิว (Surface Reactivity and Conditions)

เมื่อเกิดพื้นผิวใหม่ขึ้นมาโดยการบดลดขนาดพื้นที่ผิวนี้มักจะทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม เช่น น้ำ ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอออนที่อยู่ในระบบนั้นๆ ปฏิกิริยาเหล่านี้อาจจะเป็นปฏิกิริยาทางเคมีหรือการดูดซึมทางกายภาพก็ได้ โดยอาจจะเกิดเป็นชั้นบางๆ โดยรอบผิว ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยา ทำให้พื้นที่ผิวเดิมของเม็ดอนุภาคนั้นๆ เปลี่ยนไป ส่งผลให้พฤติกรรมของการดูดซึมสารเคลือบผิวเปลี่ยนแปลงไปได้ ดังนั้นคุณสมบัติของเม็ดแร่และวัสดุแต่ละชนิดก็ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมก่อนการลอย

## 2. สารเคมีปรับสภาพในการลอย

ขั้นตอนหลักในกระบวนการลอย คือ

1. ทำให้ผิวเม็ดแร่และวัสดุที่ต้องการแยกออกมาไม่เปียกน้ำ (ในบางกรณีอาจทำให้เม็ดแร่หรือวัสดุที่ไม่ต้องการ ไม่เปียกน้ำ เพราะจะลอยเอามลทินหรือเม็ดแร่ หรือวัสดุปนเปื้อนที่เป็นส่วนน้อยออกมาแทน)
2. ทำให้เกิดการผสมผสานกระจาย และ ให้พลังงานแก่เม็ดอนุภาคโดยสม่ำเสมอ และ ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กละเอียดจำนวนมากในเวลาเดียวกัน
3. ทำให้เกิดการแยกระหว่าง เม็ดอนุภาค ที่ไม่เปียกน้ำ และที่เปียกน้ำและการถ่ายเทมวลสารเอามวลส่วนที่ลอยขึ้นออก

โดยมีเงื่อนไขสำคัญในการทำงานอยู่ 2 ประการ คือ

1. ฟองอากาศจะต้องสามารถเกาะกับผิวหน้าเม็ดอนุภาคได้โดยต้องมีการชนกันระหว่างฟองอากาศและเม็ดอนุภาคเกิดขึ้นและฟองอากาศสามารถขับน้ำออกไปจากผิวน้ำนั้น และจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อผิวน้ำนั้นๆ ถูกปรับสภาพให้มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ
2. ฟองอากาศซึ่งลอยขึ้นมาสู่ผิวหน้าของของผสมในถังลอยจะต้องสามารถพุงเอาเม็ดอนุภาคไว้ได้โดยมีเสถียรภาพเพียงพอที่จะไม่แตกก่อน

เนื่องจากจุดประสงค์เหล่านี้ ทำให้มีการใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ช่วยในการลอยโดยมีหน้าที่หลักคือ

1. ทำให้ผิวหน้าของเม็ดอนุภาคที่จะลอยขึ้นมาไม่เปียกน้ำ
2. ป้องกันไม่ให้ผิวหน้าของเม็ดอนุภาคที่ไม่ต้องการให้ลอยขึ้นมาไม่เปียกน้ำ
3. สร้างชั้นบางของฟองอากาศให้มีเสถียรภาพเพียงพอที่จะลอยขึ้นมาสู่ผิวน้ำได้

สารเคมีที่สำคัญ มี 3 ประเภทคือ

### 1. สารเคลือบผิว (Collector)

สารเคมีที่เคลือบผิวเป็นอไอออนหรือโมเลกุลอินทรีย์ที่ถูกดูดซึมเคลือบบนผิวหน้าเม็ดอนุภาคอย่างเฉพาะเจาะจงและทำให้ผิวหน้าไม่เปียกน้ำ สารเคลือบผิวส่วนใหญ่เป็นกรดอ่อน ค่าง หรือเกลือ และเป็นสารขั้วผสม(Hetero-Polar) มีสองขั้ว(Functional Ends) ได้แก่

- ขั้วที่มีประจุที่สามารถถูกดูดซึมเกาะติดบนผิวหน้าเม็ดอนุภาคโดยปฏิกิริยาทางเคมีกับไอออนบนผิวหน้า หรือ โดยแรงยึดทางไฟฟ้าสถิต หรือโดยแรงยึดทางกายภาพ
- ขั้วที่เป็นแขนหรือกลุ่มของโมเลกุลอินทรีย์ที่สัมผัสกับสารละลายรอบข้างและให้ผิวหน้าที่ไม่เปียกน้ำแก่ผิวหน้าเม็ดอนุภาค

สารเคลือบผิวบางชนิดเป็นสารประกอบที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนในน้ำ แต่เมื่อถูกดูดซึมเกาะติดบนผิวหน้าเม็ดอนุภาคแล้วจะทำให้ไม่เปียกน้ำได้เหมือนกัน ได้แก่ สารประกอบที่เป็นกลาง เช่น น้ำมัน ดังนั้น สารเคลือบผิว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้

1. สารเคลือบผิวที่ให้ประจุลบเมื่อละลายแตกตัวในน้ำ (Anionic Collector)  
เป็นสารเคลือบผิวที่มีขั้วที่มีประจุลบอยู่ข้างหนึ่งและมีแขนหรือกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นกลุ่มไม่เปียกน้ำอยู่อีกข้างหนึ่ง สารเคลือบผิวประเภทนี้ใช้มากที่สุดในการลอยมี สูตรทางเคมีทั่วไป คือ RAH โดย R เป็นกลุ่มอนุมูลอินทรีย์ และ AH เป็นกลุ่มอนุมูลประจุลบซึ่งเมื่อละลายในน้ำจะเปลี่ยนเป็นเกลือต่างซึ่งจะแตกตัวให้ประจุลบ
2. สารเคลือบผิวที่ให้ประจุบวกเมื่อละลายแตกตัวในน้ำ (Cationic Collector)  
สารเคลือบผิวกลุ่มนี้ เป็นสารเคมี ที่มีขั้วที่มีประจุเป็นประจุบวกอยู่ข้างหนึ่งและมีแขนหรือกลุ่มของไฮโดรคาร์บอน ที่เป็นกลุ่มที่ไม่เปียกน้ำ อยู่อีกปลายหนึ่ง ได้แก่ สารประกอบ อามีน ซึ่งส่วนใหญ่จะสกัดมาจากไขมันธรรมชาติเรียกชื่อตามไขมันที่ใช้ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนมีทั้ง อัลคิล และ เอริล

และความยาวของแขนถูกจำกัดความสามารถในการละลายของอามีน โดย อาจอยู่ในรูปของ กลอไรด์ หรือ อะซิเตท เพื่อให้ละลายดีขึ้น

### 3. สารเคลือบผิวกลุ่มแบบชนิดประเภที่ไม่มีประจุ (Non-Ionic Collectors)

สารเคลือบผิวประเภทนี้ เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อให้เคลือบบน ผิวหน้าที่มีสารเคลือบผิวเคลือบ อยู่แล้ว หรือบน ผิวหน้า ของ เม็ด วัสดุ ที่ไม่มี ประจุ ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มความไม่เปียกน้ำของเม็ดอนุภาค แต่ไม่สามารถเลือก ทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะเจาะจงได้ สารเคลือบผิวประเภทนี้เป็นน้ำมันต่างๆ เช่น น้ำมันเครื่อง ครีโอสต เป็นต้น สารพวกนี้จะเคลือบผิวโดยทั่วไปไม่ เฉพาะเจาะจง จึงใช้ในการลอยในบางกรณีเท่านั้นที่มีแร่หรือวัสดุไม่มีประจุ เช่น ถ่านหิน เป็นต้น

## 2. สารเคลือบฟอง(Frothers)

สารเคลือบฟองเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้และถูกดูดซึมผิวสัมผัสระหว่างอากาศ และน้ำ เป็นสาร โมเลกุลที่มีหลายขั้ว โดยมี ขั้วที่มีประจุละลายน้ำได้และขั้วที่ไม่มีประจุ เป็นกลุ่มไฮโดรคาร์บอน

สารเคลือบฟอง มีหน้าที่สร้างฟองที่มีเสถียรภาพเพียงพอที่จะพุงเม็ดวัสดุเอาไว้ได้ แต่ไม่เหนียวเกินไปและแตกพอสื่อเมื่อเอาวัสดุออกจากการลอย และไม่ควรจะถูกดูดซึมหรือ เคลือบบนผิวหน้าสารเคมีในกลุ่มนี้ได้แก่ กลุ่มอัลกอฮอล์ ไกลคอลอีเธอร์ น้ำมันสน กรด กรีซิลิก เมซิล ไอโซบิวทิลคาร์บีนอล และ โพลีโพรพิลีนไกลคอลอีเธอร์ เป็นต้น

สารเคมีที่ใช้เป็นสารเคลือบฟองส่วนใหญ่จะมีสารสูตรทางเคมีทั่วไปคือ R-OH เช่น น้ำมันสน ครีโอสต และ MIBC แต่สารเคลือบผิวบางชนิดทำหน้าที่เป็นสารเคลือบ ฟองด้วยเหมือนกัน เช่น กรดโอลีอิก ซึ่งถ้าใช้เป็นสารเคลือบฟองโดยตรงจะทำให้มี เสถียรภาพมากเกินไปจนทำให้การไหลหรือการเคลื่อนย้ายถ่ายเททำได้ลำบาก สารเคลือบ ฟองที่ดีควรมีอำนาจการเคลือบผิวน้อยที่สุดและทำให้ ฟองมีเสถียรภาพพอที่จะพุงเม็ด แร่และวัสดุลอยขึ้นมาได้ แต่ไม่เหนียวเกินไปจนยากแก่การเคลื่อนย้ายถ่ายเท

## 3. สารเคมีปรับสภาพ

นอกเหนือจากการปรับสภาพผิวหน้าเม็ดอนุภาคโดยตรง โดยการใช้สารเคลือบผิว แล้ว การควบคุมปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายให้เหมาะสมกับสภาพผิวหน้าเม็ดอนุภาค

และ การละลายแตกตัวของสารเคลือบผิวในระบบของ การลอยทำได้โดยการเติมสารเคมีบางชนิด ได้แก่

- สารเคมีปรับสภาพผิว (Activator)

สารเคมีชนิดนี้ใช้เปลี่ยนหรือปรับสภาพผิวแร่และวัสดุให้เหมาะแก่การทำปฏิกิริยากับสารเคลือบผิว เพื่อเพิ่มความเฉพาะเจาะจง ในการดูดซึม บนผิวหน้าโดยเสริมสมรรถนะของสารเคมีเคลือบผิวแล้ว

- สารเคมีกดเม็ดคอนุภาค (Depressant)

สารเคมีชนิดนี้จะทำให้ผิวของเม็ดคอนุภาคไม่ทำปฏิกิริยา หรือชะลอการดูดซึมสารเคลือบผิวที่แตกตัวอยู่ในน้ำ หรือประจุของสารเคลือบผิวที่เคลือบอยู่ก่อนแล้วหมดประสิทธิภาพ

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือพิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์, 2535

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคณิตภูมิ พิบูลนุรักษ์ เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2524 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ในปีการศึกษา 2545 คณะวิทยาศาสตร์ สาขา วิชาวัสดุศาสตร์ (อัญมณีและเครื่องประดับ) มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒประสมมิตร เข้าศึกษาปริญญาโท สาขา ภาควิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี และ ปีเตอร์เลียม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย