

การเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ของแหล่งแร่ภูทับฟ้า



นายพีท หอมชื่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

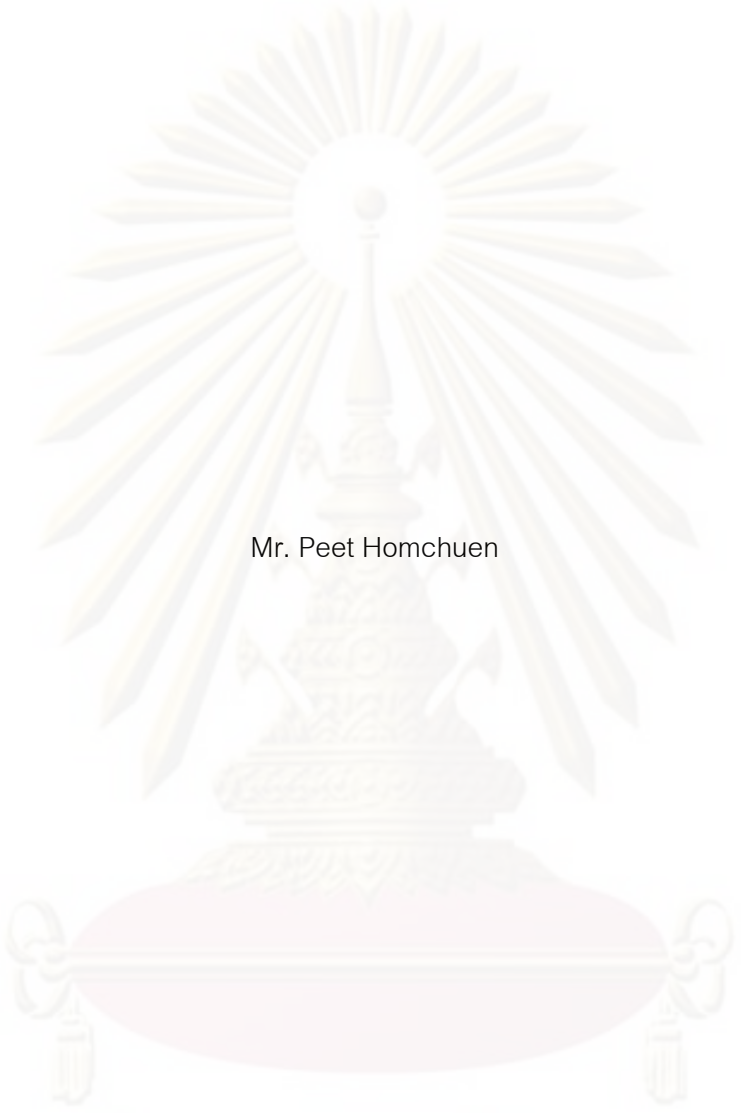
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECOVERY OF GOLD AND COPPER FROM SULPHIDE ORES
IN PHU THAP FAH DEPOSITS



Mr. Peet Homchuen

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ของแหล่งแร่
ภูทับฟ้า

โดย

นายพิท หอมชื่น

สาขาวิชา

วิศวกรรมทรัพยากรธรณี

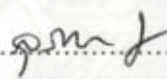
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

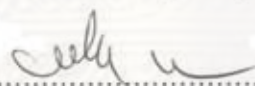
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิฎก โฉมงาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภูวิจิตร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิฎก โฉมงาม)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวลัย วิวรรณเดชะ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทียนไชย ต้นไทย)

ศูนย์วิจัยทรัพยากรธรณี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พีท หอมชื่น: การเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ของแหล่งแร่ภูทับฟ้า. (RECOVERY OF GOLD AND COPPER FROM SULPHIDE ORES IN PHU THAP FAH DEPOSITS)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ภิญโญ มีชำนะ, 139 หน้า.

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ของแหล่งแร่ภูทับฟ้า โดยนำตัวอย่างสินแร่กลุ่มซัลไฟด์ จากเหมืองแร่ทองคำภูทับฟ้า บริษัท ทุ่งคำ จำกัด อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

จากการศึกษาทางด้านแร่วิทยา โดยการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ การศึกษาวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยวิธี Electron Probe Micro-Analysis (EPMA) และการศึกษาจำแนกชนิดของแร่ โดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-ray Diffraction: XRD) พบว่าสินแร่ในกลุ่มซัลไฟด์นี้ ส่วนใหญ่จะมีแร่เหล็กซัลไฟด์ หรือแร่พิริโรไทต์ เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแร่คาลโคไพไรต์ซึ่งมีโลหะทองแดง ซึ่งเกิดจากการ Exsolution ขึ้นจากแร่ไพไรต์ (FeS_2) ที่อุณหภูมิสูง โดยมีไอออนของ Cu เข้าไปแทนที่ไอออนของโครงสร้างของแร่ไพไรต์เดิมที่เรียกว่า Solid-Solution (สารละลายของแข็ง) และจากการทำภาพทับซ้อน (Mapping) ของทองคำ ทองแดง และเหล็ก พบว่าโลหะทองคำนั้นเกิดร่วมกับเหล็ก และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกิดร่วมกับทองแดง

ในการเก็บกลับคืนโลหะทองคำและทองแดงด้วยวิธีการลอยแร่ พบว่าหัวแร่ทองแดงที่ได้จากกระบวนการลอยแร่จะเป็นแร่ทองแดง เหล็ก ซัลไฟด์ (Cu-Fe-S) ซึ่งเป็นแร่คาลโคไพไรต์ โดยยังมีเหล็กซัลไฟด์ (Fe-S) ซึ่งเป็นแร่พิริโรไทต์ปนอยู่

ผลการทดลองลอยแร่ในกลุ่มซัลไฟด์นี้ จะสามารถเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงได้ โดยหัวแร่ทองแดงที่ลอยขึ้นมา จะมีปริมาณของโลหะทองคำจากสินแร่ป้อนเพิ่มจาก 2 ppm Au เป็น 35 ppm Au ที่ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนมากกว่า 65% และปริมาณโลหะทองแดงจาก 0.7% Cu เพิ่มขึ้นมากกว่า 15% Cu ที่ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนมากกว่า 90%

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต..... พีท หอมชื่น
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Sella U*

5070379821 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEY WORD: GOLD / COPPER / RECOVERY / SULPHIDE ORE / FLOTATION / PHU THAP FAH

PEET HOMCHUEN: RECOVERY OF GOLD AND COPPER FROM SULPHIDE ORES IN PHUTHAP FAH DEPOSITS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. PINYO MEECHUMNA, Ph.D., 139 pp.

The purpose of this research is to recovery of gold and copper from sulphide ores of Phu Thap Fah deposits, Thug khum Limited in Loei province, Thailand.

The mineralogical study of the ores using microscope, Electron Probe Micro- Analyzer (EPMA) and X-Ray Diffractometer (XRD) indicates that the sulphide ores contain high iron mineral as pyrrhotite and copper mineral as chalcopyrite which is formed from the exsolution of pyrite (FeS_2) at high temperature. The mapping of gold, copper and iron reveal that gold associated with iron as (pyrrhotite) rather than copper (chalcopyrite).

In recovery of gold and copper by froth flotation technique, copper concentrate has found to be the mixture of Cu-Fe-S as chalcopyrite and Fe-S as pyrrhothite.

The flotation test show that gold and copper can be recovered as copper concentrate. The 2 ppm of Au in the feed can be upgraded to be 35 ppm Au in the copper concentrate with 65 % recovery. The 0.7 % Cu in the feed can also be upgraded to 15 % Cu in the copper concentrate at 90 % recovery.

Department of Mining and Petroleum Engineering.

Field of study Georesources Engineering.

Academic year 2009

Student's signature..... Peet Homchuen...

Advisor's signature..... Pinyo Meechumna

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความ รั้วและคำแนะนำที่มีประโยชน์ยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร .ภิญโญ มีชำนะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร .สุรพล ภูวิจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำด้านแร่วิทยาและเทคโนโลยีการแต่งแร่ ตลอดจนคำแนะนำจากคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตั้งแต่การนำเสนอโครงร่างวิทยานิพนธ์จนกระทั่งวิทยานิพนธ์แล้วเสร็จ

นอกจากนี้ยังได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จาก คุณธีรยุทธ ว่องวิริยะสกุล วิศวกร และพนักงาน บริษัท หุ่นคำ จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการเตรียมตัวอย่างแร่ การทดลองลอยแร่ และการวิเคราะห์ตัวอย่าง คุณ อุทิศ ทองกลิ้ง ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRD คุณไศภิต พุ่มพวง เจ้าหน้าที่บริการวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณี วิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ ให้ความช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์ตัวอย่างแร่และการศึกษาทางแร่วิทยา

รวมทั้งคุณสุทธิณี ชัยกวิน คุณสิริลักษณ์ แสงลออ อธิการภาควิชาฯ และท่านอื่นๆ ที่มีได้เอ่ยนามที่มีส่วนช่วย และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	3
1.6 แนวเหตุผลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	3
2 ธรรมชาติของ แร่ทองคำ แร่ทองแดง และแร่เหล็ก	
2.1 ทองคำ.....	7
2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์.....	8
2.1.2 สมบัติทางเคมี.....	9
2.1.3 การเกิด.....	9
2.1.4 แหล่งแร่ทองคำ.....	9
2.1.5 แหล่งแร่ทองคำในประเทศไทย.....	10
2.1.6 การใช้ประโยชน์.....	11

2.2	ทองแดง.....	12
2.2.1	สมบัติทางฟิสิกส์.....	12
2.2.2	สมบัติทางเคมี.....	13
2.2.3	การเกิด.....	14
2.2.4	แหล่งแร่ทองแดง.....	14
2.2.5	แหล่งแร่ทองแดงในประเทศไทย.....	19
2.2.6	การใช้ประโยชน์.....	19
2.3	เหล็ก.....	20
2.3.1	การเกิด.....	20
2.3.2	แหล่งแร่เหล็กในประเทศไทย.....	21
2.3.3	ชนิดของแร่เหล็ก.....	22
3	ธรณีวิทยาแหล่งแร่ทองคำทับฟ้า	
3.1	พื้นที่แหล่งแร่.....	25
3.2	ลักษณะภูมิประเทศและตำแหน่งแหล่งแร่.....	25
3.3	ลักษณะธรณีวิทยาโดยทั่วไปและธรณีโครงสร้าง.....	26
3.3.1	หินตะกอน.....	29
3.3.2	หินอัคนี.....	29
3.3.3	หินแปร.....	29
3.3.4	หินกอสแซน และ Massive sulphide.....	31
3.4	ธรณีวิทยาโครงสร้าง.....	33
3.5	ลักษณะธรณีวิทยาของแหล่งแร่ทองคำ.....	33
3.5.1	การกำเนิดของแหล่งแร่.....	35
3.5.2	ชนิดของแร่.....	36
4	การศึกษาลักษณะทางแร่วิทยา	
4.1	ตัวอย่างแร่ที่นำมาวิจัย.....	40
4.2	การศึกษาตัวอย่างชัดเจนภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา.....	44

4.3	การศึกษาลักษณะ ชนิด และส่วนประกอบทางเคมีของแร่ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธี EPMA.....	59
4.3.1	ผลการศึกษา.....	87
4.4	การศึกษาจำแนกชนิดแร่โดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน.....	87
4.4.1	ตัวอย่างแร่ที่นำมาศึกษาโดย XRD.....	87
4.4.2	ผลการศึกษาแร่ตัวอย่างโดย XRD.....	89
4.5	สรุปผล และข้อคิดเห็นในการศึกษาทางแร่วิทยา.....	109
5	การศึกษากារเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์โดยกระบวนการลอยแร่	
5.1	การศึกษาหลักการลอยแร่.....	112
5.1.1	หลักการลอยแร่.....	113
5.1.2	ข้อมูลพื้นฐาน.....	114
5.1.3	สารที่ใช้ในการลอยแร่.....	115
5.1.4	การออกแบบวงจรเซลล์ลอยแร่.....	117
5.2	การทดลองลอยแร่.....	119
5.2.1	การทดลองลอยแร่ซัลไฟด์ครั้งที่ 1 เพื่อศึกษาทางด้านแร่วิทยา.....	120
5.2.2	การทดลองลอยแร่ซัลไฟด์ ครั้งที่ 2 และ 3.....	126
5.2.3	การทดลองลอยแร่ซัลไฟด์ ครั้งที่ 4 หลังจากศึกษาด้านแร่วิทยา.....	126
5.2.4	การทดลองลอยหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์จากกระบวนการผลิต.....	131
5.3	สรุป และอภิปรายผลการวิจัย.....	132
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	134
	รายการอ้างอิง.....	136
	ประวัติผู้เขียน.....	139

สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณทองแดงในหินชนิดต่างๆ.....	14
ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบและสภาพการกำเนิดของแร่ทองแดงชนิดต่างๆ.....	15
ตารางที่ 2.3 ปริมาณทรัพยากรแร่เหล็กจำแนกตามแหล่งแร่ที่สำคัญ.....	23
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของพื้นที่ประทานบัตรของโครงการ.....	25
ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณโลหะทองคำ ทองแดง เหล็ก ซัลเฟอร์ และเงิน ของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองลอยแร่.....	42



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงจุดที่ตั้งพื้นที่กลุ่มประทานบัตรที่ 26968/15574, 26969/15575, 26970/15576, 26971/15558, 26972/15559.....	26
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายแสดงลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปของพื้นที่โครงการ (มองไปทางทิศใต้).....	28
รูปที่ 3.3 แผนที่ธรณีวิทยาแหล่งแร่บริเวณพื้นที่ประทานบัตรที่ 26968/15574, 26969/15575, 26970/15576, 26971/15558 และ 26972/15559.....	30
รูปที่ 3.4 แสดงหินตะกอนซึ่งแสดงชั้นและไม่แสดงชั้นชัดเจน และการวางตัวของชั้นหิน	31
รูปที่ 3.5 แสดงหินแกรนิตไฮโดรไธต์ที่พบในหลุมเจาะสำรวจ TDH 109 และหินแกรนิตไฮโดรไธต์ที่ผ่านการผุพัง.....	31
รูปที่ 3.6 แสดงหินเนื้อดอกที่แทรกตัดอยู่ในหินตะกอน (ซ้าย) และแสดงลักษณะหินเนื้อดอก สดที่พบในหลุมเจาะสำรวจ TDH 27 (ขวา).....	32
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของหินสการ์นชนิดเนื้อละเอียดในหลุมเจาะสำรวจ TDH 27 (ซ้าย) และแสดงผลึกการ์เนตที่เกิดร่วมกับไพรอกซีนในหลุมเจาะสำรวจ TDH 20 (ขวา).....	32
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของหินกอสแซนชนิดเนื้อพรุน (ซ้าย) และชนิดเนื้อละเอียดแน่น (ขวา)..	33
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของหิน Massive Sulphide เกิดร่วมกับ Chalcopyrite และ Magnetite.....	33
รูปที่ 3.10 แผนที่แสดงลักษณะธรณีวิทยาและธรณีโครงสร้าง ของพื้นที่ประทานบัตร พื้นที่ประทานบัตรใกล้เคียง และพื้นที่ใกล้เคียง ของโครงการเหมืองแร่ทองคำทับฟ้า บริษัท ฟุงคำ จำกัด.....	35
รูปที่ 3.11 ภาพจำลองลักษณะการกำเนิดของแหล่งแร่ทองคำระยะที่ 1 (A) และที่ 2 (B).....	37
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของหิน Pyrrhotite Skarn (ซ้าย) และสายแร่ควอตซ์ (Quartz vein) ที่แทรกตัดอยู่ในหินทรายแป้ง (ขวา)	38
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะแร่ออกไซด์ (หินกอสแซน) บริเวณประทานบัตรที่ 26972/15559 (ซ้าย) และชั้นเศษหินควอตซ์บริเวณประทานบัตรที่ 26970/15576 (ขวา).....	39
รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะ Sulphide Ore (ซ้าย) และ Transition Ore (ขวา) บริเวณประทานบัตรที่ 26971/15558 และ 26972/15559.....	40
รูปที่ 4.1 หน้าเหมืองบริเวณที่เก็บตัวอย่างแร่ก้อน (Lump).....	43

ภาพประกอบ

รูปที่ 4.2 ลานทองสีนแร่ (ROM Pad) จากหน้าเหมืองก่อนป้อนเข้าสู่
กระบวนการแต่งแร่..... 43

รูปที่ 4.3 สีนแร่ที่คัดเลือกเพื่อทำตัวอย่างขัดมัน..... 44

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างแร่ที่นำมาทำ Polished Section..... 44

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างขัดมัน (Polished Section) ที่จะทำการศึกษา..... 45

รูปที่ 4.6 กล้องจุลทรรศน์แบบสองตาที่ใช้ในการศึกษา..... 46

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างหมายเลข 1-01 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา..... 46

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างหมายเลข 1-02 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา..... 47

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างหมายเลข 1-03 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา..... 47

รูปที่ 4.10 ตัวอย่างหมายเลข 1-04 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา..... 48

รูปที่ 4.11 ตัวอย่างหมายเลข 1-05 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา..... 48

รูปที่ 4.12 ตัวอย่างหมายเลข 1-06 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา..... 49

รูปที่ 4.13 ตัวอย่างหมายเลข 2-03 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา..... 49

รูปที่ 4.14 ตัวอย่างหมายเลข 2-03 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา..... 50

รูปที่ 4.15 ภาพรวมการกระจายตัวของซิลเฟออร์ ทองคำ เหล็ก และทองแดง
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 51

รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของซิลเฟออร์ จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 51

รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของทองคำจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 52

รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของเหล็กจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 52

รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของทองแดงจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 53

รูปที่ 4.20 ภาพจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 53

รูปที่ 4.21 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและซิลเฟออร์จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 54

รูปที่ 4.22 การทำภาพทับซ้อนของเหล็กและซิลเฟออร์จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 54

รูปที่ 4.23 การทำภาพทับซ้อนของทองแดงและซิลเฟออร์จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 55

รูปที่ 4.24 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและเหล็กจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 55

รูปที่ 4.25 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและทองแดงจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 56

รูปที่ 4.26 การทำภาพทับซ้อนของเหล็กและทองแดงจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA..... 56

รูปที่ 4.27 การทำภาพทับซ้อนของทองคำ ทองแดง และเหล็ก จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA.... 57

ภาพประกอบ

รูปที่ 4.28 ผลการศึกษาจำแนกชนิดแร่โดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน ของตัวอย่างหัวแร่ เหล็กซัลไฟด์ (1-02).....	59
รูปที่ 4.29 ผลการศึกษาจำแนกชนิดแร่โดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน ของตัวอย่างหัวแร่ ทองแดงซัลไฟด์ (1-04).....	60
รูปที่ 5.1 ที่เก็บกองแร่ (ROM Pad).....	61
รูปที่ 5.2 แสดงเครื่องย่อยและบดสินแร่ของบริษัท ทุ่งคำ จำกัด.....	62



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ทองคำ เป็นโลหะที่มีค่า สวยงาม และเป็นที่ยอมรับของคนทั่วโลกและมีอิทธิพลต่อผู้คนมาทุกยุคทุกสมัย ทองคำยังเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงความมั่งมี ฐานะ และความมั่นคงของมนุษยชาติ อีกทั้งสามารถใช้ในการแลกเปลี่ยนในเชิงพาณิชย์มานานหลายศตวรรษก่อนที่จะมีการผลิตเงินตรามาใช้แทน อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีการสะสมทองคำแทนเงินตรามาจนทุกวันนี้ ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากทองคำ ส่วนใหญ่ใช้ในการทำเครื่องประดับ เหยียบ เหยียบทองคำ ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมักใช้ทองคำในรูปโลหะเจือ หรือใช้ในงานทันตกรรม เป็นต้น

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้ทองคำในแต่ละปีในปริมาณมาก โดยที่ประเทศไทยมีเหมืองแร่ทองคำที่เปิดดำเนินการอยู่เพียง 2 แห่งเท่านั้นคือ แหืองแร่ทองคำภูทับฟ้าที่อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ของบริษัท ทุ่งคำ จำกัด และ แหืองแร่ทองคำชาติรี ที่บริเวณรอยต่อของอำเภอทับคล้อ จังหวัดพิจิตร กับอำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งเป็นของบริษัท อัคราไมนิ่ง จำกัด ซึ่งเหมืองแร่ทองคำของประเทศไทยที่พบ ว่าที่มีศักยภาพในเชิงพาณิชย์ในขนาดการลงทุนของบริษัทจากต่างประเทศนั้น เป็นเหมืองแร่ทองคำปฐมภูมิ โดยที่การผลิตทองคำจากแหล่งแร่แบบนี้จะเริ่มต้นจากการทำเหมืองโดยใช้เครื่องมือเครื่องจักรในการขุด “สินแร่” ซึ่งเป็นหินหรือแร่ที่มีทองคำปะปนอยู่ นำไปบดย่อยให้ละเอียดแล้วนำไปผ่านสารเคมีเพื่อละลายทองคำออกมา จากนั้นจะนำสารละลายที่มีทองคำไปผ่านกระบวนการแยกโลหะทองคำออกมาอีกครั้งหนึ่ง และในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทำให้ทองคำบริสุทธิ์โดยการหลอมและแยกเอาโลหะตัวอื่นออกเหลือแต่โลหะทองคำ โดยในขั้นตอนสุดท้ายนี้จะทำในต่างประเทศซึ่งเป็นที่ยอมรับของทั่วโลก

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในขั้นตอนการละลายทองคำ วิธีไซยาไนด์ เดชันเป็นวิธีการแต่งแร่ทองคำที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ประหยัด สามารถเก็บแร่ได้สูง สามารถใช้กับแหล่งแร่เกรดต่ำ ซึ่งใช้วิธีอื่นไม่คุ้มค่า นอกจากนี้ยังใช้กับแหล่งแร่ที่มีแร่ทองคำละเอียดมาก ไม่สามารถแต่งด้วยวิธีการลอยแร่ (Flotation) หรือโดยวิธีกราวิต (Gravity method) หรือแยกด้วยปรอท (Amalgamation) ได้ วิธีไซยาไนด์เดชัน (Cyanidation) อาศัยหลักที่ว่า โลหะทองคำสามารถละลายได้ในสารละลายเจือจางของไซเดียมไซยาไนด์ หรือโปแตสเซียมไซยาไนด์ ซึ่งเหมืองแร่ทั้ง 2 แห่งของประเทศไทย ได้นำวิธีการแต่งแร่ทองคำด้วยสารละลายไซเดียมไซยาไนด์ มาใช้ในกระบวนการละลายทองคำ สำหรับแหล่งแร่ภูทับฟ้าที่อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ของบริษัท ทุ่งคำ

จำกัด นั้น เมื่อดำเนินการทำเหมืองลงไปลึกๆ แล้ว จะพบสินแร่ในกลุ่มซัลไฟด์ ซึ่งอยู่ด้านล่างต่อจากชั้นทรานซิชัน (Transition) ที่มีส่วนประกอบระหว่างซัลไฟด์และออกไซด์ และต่อจากชั้นสินแร่ออกไซด์ตามลำดับ สินแร่ในกลุ่มซัลไฟด์นี้ จะมีส่วนประกอบของแร่โลหะบางชนิด ได้แก่ ทองแดง และเหล็ก ซึ่งเข้าไปแย่งสารละลายไซยาไนด์ ทำให้แร่ทองคำทำการละลายได้ยาก ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนโลหะทองคำจึงลดลงอย่างมาก จากที่เคยใช้สินแร่ออกไซด์ จะมีประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนโลหะทองคำคืนได้ถึง 80–90% แต่เมื่อนำสินแร่กลุ่มทรานซิชัน และกลุ่มซัลไฟด์มาเข้ากระบวนการ ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนโลหะทองคำ จะลดลงเหลือเพียง 40-50% เท่านั้น ฉะนั้นการแยกทองคำและทองแดงออกจากสินแร่ซัลไฟด์ จะเป็นแนวทางหนึ่งของการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนโลหะทองคำจากแหล่งแร่

เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ของแหล่งแร่ภูทับฟ้า ในการศึกษาจะเริ่มจากการศึกษาทางด้านแร่วิทยา (Mineralogy) เพื่อคัดเลือกวิธีการกำจัดสินแร่ซัลไฟด์ออกจากทองคำและทองแดงได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนทองคำและทองแดง และยังช่วยลดปัญหาการทิ้งโลหะทองคำที่ไม่สามารถละลายได้ไปโดยเปล่าประโยชน์ ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้ปริมาณสารโซเดียมไซยาไนด์ ปริมาณออกซิเจน และปูนขาว ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จุดประสงค์ของการวิจัยและประโยชน์ที่ได้รับ จากโครงการวิจัยในครั้งนี้ คือ จะได้รับทราบถึงแร่วิทยา (Mineralogy) แหล่งแร่ทองคำภูทับฟ้า ของบริษัท หุ่นคำ จำกัด ซึ่งสามารถอธิบายการเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนโลหะทองคำและทองแดงในแหล่งนี้ได้ หรือแหล่งแร่อื่นๆ ที่มีลักษณะการเกิดแบบเดียวกันนี้ได้ด้วย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ ไปปรับปรุงประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนโลหะทองคำและทองแดงจากสินแร่กลุ่มซัลไฟด์ ของแหล่งแร่ภูทับฟ้า จังหวัดเลย และแหล่งแร่อื่นๆ ที่มีสภาพทางธรณีวิทยาใกล้เคียงกันได้

1.4 ขอบเขตวิธีการวิจัย

เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนโลหะทองคำและทองแดงจากสินแร่กลุ่มซัลไฟด์ ซึ่งอยู่ในขั้นตอนการเตรียมแร่ขั้นต้น (Pretreatment) ก่อนเข้าสู่กระบวนการละลายโลหะทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์ โดยเริ่มจากการศึกษาแร่วิทยาของสินแร่กลุ่มซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองลอยแร่ในห้องปฏิบัติการ เพื่อที่จะได้ตัวอย่างแร่ที่นำมาศึกษาที่มีปริมาณโลหะ

ทองคำและทองแดงมากพอที่เครื่องมือวิเคราะห์สามารถตรวจพบได้ มาศึกษาภายใต้กล้องขยายสองตา ศึกษาจำแนกชนิดของแร่ โดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน และวิเคราะห์หาการกระจายตัวของธาตุทองคำ (Au) ทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe) ด้วยเครื่อง Electron Probe Micro Analyser (EPMA) ผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นของการปรับปรุงประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนโลหะทองคำและทองแดงจากสินแร่กลุ่มซัลไฟด์ต่อไป

1.5 ระเบียบวิธีการวิจัย

1. เก็บตัวอย่าง วิเคราะห์เพื่อศึกษาแร่วิทยา (Mineralogy) และองค์ประกอบของแร่ทองคำและทองแดง จากแหล่งแร่ภูทับฟ้า จังหวัดเลย ซึ่งเป็นสินแร่กลุ่มซัลไฟด์

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) โดยจะต้องมีการเตรียมตัวอย่างการวิเคราะห์ โดย วิธีการวิเคราะห์ด้วย Fire Assay การ Digest ด้วยกรด และเครื่องมือวิเคราะห์ซัลเฟอร์ (Sulfur Analysis)

เครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ ที่ใช้ในการ ศึกษาได้แก่ XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometer), XRD (X-Ray Diffractometer), SEM-EDX (Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-Ray Analyzer), EPMA (Electron Probe Micro Analyser)

2. ศึกษาตัวแปรที่จะลดประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนทองคำจากสินแร่ซัลไฟด์

3. ศึกษาวิธีการลอยแร่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนทองคำ โดยคาดหวังว่าจะแยกแร่มลทินกลุ่มซัลไฟด์ออกไปได้

4. นำตัวอย่างจากการทดลองลอยแร่มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบ และปริมาณโลหะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดลองลอยแร่

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.6 แนวเหตุผลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

แร่ธาตุมลทินชนิดต่างๆ ที่เกิดร่วมกับทองคำ เช่น Pyrrhotite, Pyrite, Marcasite, Arsenic compound, Stibnite Sulphide ion, Copper mineral, Zinc mineral, Lead mineral และ Telluride มีผลต่อการละลายของทองคำ โดยส่วนใหญ่มักแย่งทำปฏิกิริยากับ CN^- ทำให้อัตราการละลายของทองคำช้าลง เรียกพวกนี้ว่า “Cyanocide” หรือ “Cyanicide” (Cyanide consumer) บางส่วนจะแย่งก๊าซออกซิเจน หรือทำให้สารละลายมีสภาวะเป็นกรด ทำให้สิ้นเปลืองปูนขาวในการปรับค่า pH นอกจากนี้หากแร่ทองคำมีสารจำพวก Carbonaceous organic matter รวมอยู่ด้วยกันจะทำความยุ่งยากในการทำไซยาไนด์ชันยิ่งขึ้น เนื่องจากสารเหล่านี้มีคาร์บอนเป็น

องค์ประกอบหลัก จะดึงทองคำที่อยู่ในสารละลายออกบางส่วนโดยกระบวนการ Adsorption ทำให้สูญเสียปริมาณทองคำบางส่วนไป

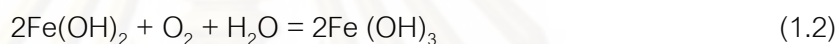
ปฏิกิริยาของแร่ลพิษดังกล่าวสรุปได้ดังนี้

1. แร่พิริโรไทต์ (Pyrrhotite) (Fe_{1-x}S ($x=0-0.2$))

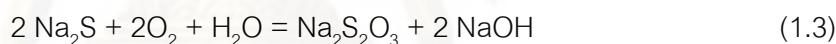
หากแร่ป้อนที่จะป้อนเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่ทองคำโดยไซยาไนด์ เซชันมีแร่พิริโรไทต์เกิดร่วมกับทองคำ แร่พิริโรไทต์ จะดึงออกซิเจนออกจากระบบตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



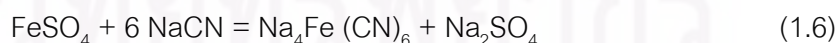
ในระบบที่มีการให้ออกซิเจนแก่ระบบ Ferrous hydroxide ที่ได้จากปฏิกิริยาที่ (1.1) จะถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) กลายเป็น Ferric hydroxide ได้ง่าย ตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



ส่วน Sulphide ion จากปฏิกิริยาที่ (1.1) ก็จะถูก ออกซิไดซ์ (Oxidized) กลายเป็น Thiosulphate บางส่วนตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



Hedley และ Tabachnick (1958) ได้แสดงปฏิกิริยาเคมีให้เห็นว่า แร่พิริโรไทต์ได้ดึงเอาปริมาณของไซยาไนด์และออกซิเจนออกจากระบบในกระบวนการแต่งแร่ทองคำโดยไซยาไนด์ เซชัน ตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

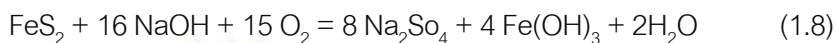


2. แร่ไพไรต์ และแร่มาร์คาไซต์ (Pyrite and Marcasite) (FeS_2)

แร่ไพไรต์และแร่มาร์คาไซต์ปกติแล้วมักจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายไซยาไนด์ อย่างไรก็ตามแร่พิริโรไทต์ อาจเกิดขึ้นในชั้นตอนบดละเอียด โดยเกิดจากผิวของแร่ไพไรต์ สัมผัสกับผิวของ Grinding media (ลูกบด) ที่เป็นเหล็ก (T.K. Rose and W.A.C. Newman, 1937) ตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

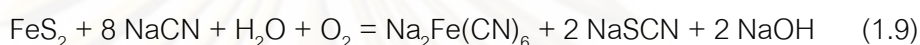


ปฏิกิริยา Oxidation ของแร่ไพไรต์ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยานี้ถูกควบคุมด้วยการตกตะกอนของ Fe(OH)_3 และพบว่าแร่ไพไรต์ เพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่จะถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) (Stenhouse และ Armstrong, 1952)

Filmer (1984) ได้แสดงปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง แร่ไพไรต์ และไซยาไนด์ ดังต่อไปนี้

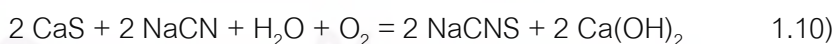


ค่าคงที่สมดุลในการเกิด Iron cyanide เท่ากับ 10 ในสารละลายที่มีออกซิเจนปนอยู่และเท่ากับ $10^{23.7}$ ในสารละลายที่ไม่มีออกซิเจน (Reynolds, 1945) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เหล็กสามารถละลายในไซยาไนด์ที่มีออกซิเจนปนอยู่ได้

3. แร่ที่มีอาร์เซนิก เป็นส่วนประกอบ (Arsenic (As) – containing mineral)

มักจะพบ แร่อาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite) (FeAsS) แร่รีอัลการ์ (Realgar) (As_2S_2) และแร่ออร์พิเมนต์ (Orpiment) (As_2S_3) เป็นแร่มลทินที่เกิดร่วมกับทองคำ และแร่เหล่านี้จะมีผลทำให้การละลายทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์เป็นไปได้ช้า โดยที่แร่อาร์เซนไพไรต์ มีผลน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแร่รีอัลการ์และแร่ออร์พิเมนต์ และพบว่า แร่อาร์เซนไพไรต์ สามารถละลายได้ในสารละลายไซยาไนด์บางส่วนเท่านั้น

Sulphide ion จะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์โดยปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



Hedley and Tabacknick (1958) ได้เสนอว่า ตัวการที่ขัดขวาง เป็นผลให้กระบวนการไซยาไนด์ชันเป็นไปได้ช้า คือ Sulphide และ Thio-arsenate ion ซึ่งมักจะไปดูดซับ ที่ผิวของทองคำมากกว่าที่จะแย่งเอาออกซิเจนในกระบวนการเสีย ยกอีก ซึ่งสามารถกำจัด Sulphide และ Thio-arsenate ion ออกจากกระบวนการไซยาไนด์ชัน โดย Lead ion ซึ่งอาจได้จากการเติม Lead nitrate ลงไปโดยที่ Lead ion จะทำการเปลี่ยนพวก Sulphide ion ให้เป็น Lead sulphide และจะทำการเร่งปฏิกิริยา Oxidation ของ Thio-arsenite นอกจากนี้ยังสามารถกำจัด อาร์เซนิก ออกไปก่อนได้ด้วยการเผาไลนเตาอย่างแรวก่อนป้อนแร่เข้าสู่กระบวนการไซยาไนด์ชัน

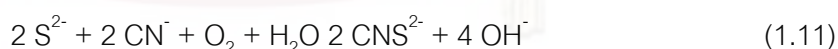
Espiell (1986) ได้ทำการศึกษาหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ทำการละลายแร่ทองคำที่เกิดร่วมกับ แร่อาร์เซนไพไรต์ ด้วยวิธีไซยาไนด์ชัน จากการศึกษาทางด้าน แร่วิทยาผ่านกล้องจุลทรรศน์ (Ore microscopy) พบว่า แร่ดังกล่าวประกอบด้วย 21% As , 17.5% Fe , 74 g/k Au และ 125 g/k Ag เงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการละลายแร่คือ ขนาดแร่บดต้องเล็กกว่า 36 ไมครอน อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลว เป็น 1:4 และความเข้มข้นของโซเดียมไซยาไนด์เท่ากับ 2 gm/litre ซึ่งตามเงื่อนไขทองคำสามารถละลายได้ 92% ส่วนเงินสามารถละลายได้ 55%

4. แร่สติบไนต์ (Stibnite) (Sb_2S_3)

แร่สติบไนต์ที่เกิดร่วมกับแร่ทองคำจะมีผลทำให้การละลายทองคำด้วยไซยาไนด์ชันเป็นไปได้ช้า Hedley และ Tabadunick (1958) คิดว่ากระบวนการที่ขัดขวางการละลายทองคำของแร่สติบไนต์ก็เหมือนกับกระบวนการของแร่อาร์ไพเมนต์ในสารละลายที่เป็นต่าง แร่สติบไนต์จะถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) กลายเป็น Antimonate และ Sulphate ในเวลาต่อมา เช่นเดียวกับในแร่ที่มีอาร์เซนิก เป็นส่วนประกอบ (Arsenic-containing mineral) ตัวการที่ขัดขวางเป็นผลให้กระบวนการไซยาไนด์ชันเป็นไปได้ช้า ก็คือ การกระทำของ Sulphide และ Thioantimonite ion วิธีการกำจัดการกระทำของ Sulphide และ Thioantimonate ออกไปก็โดยการเติม Lead salt ลงไปเช่นเดียวกัน

5. Sulphide ion

Sulphide ion เป็นตัวสำคัญที่จะลดประสิทธิภาพการละลายทองคำด้วยไซยาไนด์ชันมากที่สุด และจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะที่เป็นต่างอย่างรวดเร็วทำให้เกิดเป็น Oxysulphur compound และ Thiocyanate ตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



Sulphide ion จะถูกดูดซับเข้าไปบนผิวของทองคำ เมื่อ Adsorption density เพิ่มขึ้น การละลายของทองคำในสารละลายไซยาไนด์จะลดลง ก็เช่นเดียวกับในแร่ ที่มีอาร์เซนิกเป็นส่วนประกอบ (Arsenic – containing mineral) และแร่สติบไนต์ การเติม Lead Salt ลงไปเพื่อที่จะเปลี่ยน Sulphide Ion ให้เป็น Lead sulphide ที่ไม่ละลายน้ำ

บทที่ 2

ธรรมชาติของแร่ทองคำ แร่ทองแดง และแร่เหล็ก

2.1 ทองคำ (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

ทองเป็นโลหะชนิดแรกที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์เมื่อหลายศตวรรษมาแล้ว ประเทศต่างๆ ได้ใช้ทองเป็นของแลกเปลี่ยนแทนเงินตรา ใช้ประกอบทำเครื่องประดับเพชรพลอย เป็นรูปแบบต่างๆ เช่น ทำแหวน ต่างหู เข็มขัด สร้อยคอ เป็นต้น การขุดทองได้มีมาอย่างน้อยที่สุดไม่ต่ำกว่า 6,000 ปีมาแล้ว ครั้งแรกสุดดูเหมือนจะพบทางแถบเอเชียตะวันตก โดยเฉพาะในประเทศอียิปต์ เป็นประเทศที่มีสิ่งของเครื่องทองปรากฏให้เห็นตั้งแต่ประมาณ 4,000 ปี ก่อนพุทธศักราช ต่อมา จึงมีการค้นพบอีกที่มาเซโดเนีย (Macedonia) อิตาลี ฝรั่งเศส สเปน สหรัฐอเมริกา แอฟริกา และออสเตรเลีย การขุดหาทองเพิ่มมากขึ้นหลังจากที่มีการค้นพบที่ปออเมริกาแล้ว ซึ่งเป็นระยะเวลาเดียวกันกับกลุ่มประเทศเม็กซิโก เปรู โบลิเวีย และชิลี มีการส่งเงินและทองเข้า สู่ตลาดยุโรปมากที่สุด เงินทองดังกล่าวส่วนหนึ่งได้มาจากการปล้น สะดมชาวอินเดียแดง และอีกส่วนหนึ่งได้มาจากหมู่เหมืองในประเทศเม็กซิโกและโคลัมเบีย

ในสหรัฐอเมริกาได้ค้นพบทองที่รัฐคาโรไลนาเหนือเมื่อปี พ.ศ.2344 ต่อมาในปี พ.ศ.2372 ได้มีการพบทองในรัฐจอร์เจีย จนกระทั่งปี พ.ศ.2392 ได้พบลานแร่ทองในรัฐแคลิฟอร์เนีย เป็นผลให้เกิดการแตกตื่นทองอย่างรุนแรงในปี พ.ศ.2393 (The Great Gold Rush of 1851) และทำให้ผลผลิตทองเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมถึงสิบเท่า จนกระทั่งปี พ.ศ.2396 สหรัฐอเมริกาได้กลายเป็นประเทศผู้นำในการผลิตทองของโลก และคงอยู่เช่นนี้นับเป็นเวลานานถึงประมาณ 50 ปี

ในประเทศออสเตรเลีย ได้มีการค้นพบทองและเป็นที่แตกตื่นทองในลักษณะเดียวกันเมื่อปี พ.ศ.2394 และเป็นผลทำให้ผลผลิตทองของโลกมีมากเกินกว่า 6 ล้านออนซ์ ในช่วงระหว่างปี พ.ศ.2393 – 2403 หลังจากนั้นผลผลิตก็เริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันทางแถบตะวันตกของสหรัฐอเมริกาก็ได้ค้นพบทองแหล่งใหม่อีกหลายแหล่ง โดยเฉพาะที่ Cripple Creek ในรัฐโคโลราโด เมื่อปี พ.ศ.2434 ทำให้ผลผลิตทองของสหรัฐอเมริกาสำหรับตลาดโลกกระเตื้องขึ้นหลังจากที่ตกต่ำไปเมื่อมีการค้นพบทองครั้งใหญ่ในปี พ.ศ.2429 บริเวณ “Rand” ในแอฟริกาใต้

ในปี พ.ศ.2439 มีการแตกตื่นทองครั้งใหญ่ที่ Klondike เมือง Yukon ประเทศแคนาดา เป็นผลให้ผลผลิตทองของโลกในช่วงปี พ.ศ.2433 – 2443 มีเพิ่มมากขึ้นและเกินกว่า 15 ล้านออนซ์ต่อปี ในปี พ.ศ.2458 ผลผลิตขึ้นสูงสุดถึงเกือบ 23 ล้านออนซ์ต่อปี และเป็นเช่นนี้เรื่อยมาโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งราคาทองเปลี่ยนแปลงไป

นับตั้งแต่ปี พ.ศ.2448 แอฟริกาใต้เป็นแหล่งผลิตทองคำอันดับหนึ่งของโลก สหรัฐอเมริกาเป็นอันดับสอง จนกระทั่งถึงปี พ.ศ.2475 ผลผลิตทองคำของสหรัฐอเมริกาจึงตกเป็นรอง ผลผลิตทองคำจากประเทศรัสเซียและแคนาดา

สำหรับในประเทศไทย เมื่อนับย้อนหลังไปสู่อดีตกาลสมัยเชียงแสนและสุโขทัย ชนชาติที่อาศัยอยู่บนแผ่นดินสุวรรณภูมิได้รู้จักการใช้ประโยชน์แร่ทองคำโดยนำมาทำเป็น เครื่องประดับ และหลอมหุ้มพระพุทธรูปองค์ใหญ่ๆ เป็นจำนวนมาก จึงคาดว่าทองคำจำนวนมาก ดังกล่าวจะต้องได้มาจากแหล่งแร่ในบริเวณหนึ่งบริเวณใดในภาคเหนือใกล้ๆ กับราชธานีทั้ง 2 แห่ง อย่างแน่นอน ส่วนในภาคกลางและภาคตะวันตกนั้น ได้มีการพบแร่ทองคำที่บ้านบ่อทอง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครสวรรค์ และบ้านวังกะ อำเภอกองคาจันทบุรี ซึ่งมีประวัติการขุด ร่อนหาทองคำมาช้านานแล้ว เช่นเดียวกัน สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือก็พบว่ามีแหล่งแร่ ทองคำหลายแห่งในบริเวณจังหวัดเลย หนองคาย และอุดรธานี ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือก็รู้กันทั่วไป ว่ามีเหมืองแร่ทองคำแห่งแรกในประเทศไทยที่บ้านบ่อทอง อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี ซึ่ง ได้ทำการผลิตแร่ตั้งแต่สมัยตอนต้นรัชกาลพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 5 และในปัจจุบันนี้ได้พบแหล่งแร่ทองคำอีก 13 แห่ง ในบริเวณใกล้เคียงกัน และยังพบแหล่งแร่ใน เขตพื้นที่ของจังหวัดฉะเชิงเทรา ชลบุรี และระยอง อีกด้วย ส่วนในภาคใต้เริ่มพบและทำกันที่ ตำบลร่อนทอง อำเภอบางสะพานใหญ่ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พบในคลองบางชันจังหวัด ระนอง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่กิ่งอำเภอสูคีริน จังหวัดนราธิวาส ก็เคยมีการทำเหมืองแร่ทองคำ ที่แหล่งแร่โต๊ะโม๊ะใกล้บริเวณเขตแดนประเทศไทย – มาเลเซีย ดำเนินการโดยชาวฝรั่งเศส ในช่วง ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 เล็กน้อย นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วนี้ ยังพบว่ามีแหล่งแร่ทองคำอยู่ในพื้นที่ บางส่วนของจังหวัดเชียงราย พะเยา เชียงใหม่ ลำปาง ลำพูน แพร่ สุโขทัย เพชรบูรณ์ ลพบุรี จันทบุรี สระบุรี ราชบุรี สุราษฎร์ธานี พังงาน และภูเก็ตอีกด้วย จำอาจกล่าวได้ว่า แผ่นดิน สุวรรณภูมิหรือประเทศไทยในปัจจุบันนี้เป็นแผ่นดินทองคำโดยแท้จริง

2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

ลักษณะที่พบโดยทั่วไปนั้นเป็นเกล็ด เม็ดกลม – แบน หรือมีลักษณะเป็น ก้อน มีเนื้อแน่น อาจมีรูปร่างยาวแตกกิ่งก้านสาขาล้ายกิ่งไม้ (Dendritic gold) ชนิดที่เป็นรูป ผลึกนั้นหาได้ยากและมักมีหน้าผลึกไม่สมบูรณ์ รูปผลึกจัดอยู่ในระบบไอโซเมตริก (Isometric system) แบบออกตะฮีดรอล (Octahedral) แบบลูกเต๋า (Cubic) หรือแบบโดเดคาฮีดรอล (Dodecahedral) มีสีเหลืองเข้มหรืออ่อนจาง มีความวาวแบบโลหะ สีผงละเอียด (Streak) เหมือน สีตัว มีความแข็งตามมาตรฐานของโมห์ 2.5 – 3 ค่าความถ่วงจำเพาะถ้าบริสุทธิ์จะมีค่า 19.3 โดย ปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 15.6 – 19.3 แล้วแต่มลทินปะปน ทองมีเนื้ออ่อนสามารถดึงและตีแผ่นให้

เป็นแผ่นบางๆ หรือเป็นรูปต่างๆ ได้ง่าย ความบริสุทธิ์ของทองคำคิดเป็นกะรัตหรือไฟน์เนส (Karat or Fineness) ทองคำบริสุทธิ์จะเท่ากับ 24 กะรัต หรือ 1,000 ไฟน์ ทอง 14 กะรัต (14K) คือโลหะผสมที่มีทองคำ 14 ส่วน อีก 10 ส่วน เป็นโลหะชนิดอื่นๆ เช่น เงิน ทองแดง นิกเกิล ทองผสมด้วยโลหะอื่นแล้วจะทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น

2.1.2 สมบัติทางเคมี (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

มีสูตรทางเคมีคือ Au เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) ลำดับที่ 79 น้ำหนักอะตอม (Atomic weight) 196.967 อุณหภูมิของจุดเดือด (Boiling point) 1,970 °C จุดหลอมเหลว 1,063 °C พบเกิดเป็นโลหะธาตุธรรมชาติเกิดผสมกับธาตุเงินหรือธาตุนั้นๆ เช่น ทองแดง เหล็ก และเทลลูเรียม (Te) ละลายได้ในกรดกัดทอง (Aquaregia) ถ้ามีเงินปนมากจะเกิดซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ค้างอยู่ ชนิดที่มีเงินปนเกินกว่า 20% เรียก อีเลกตรัม (Electrum)

โดยปกติเนื้อทองบริสุทธิ์นั้นอ่อน ทองที่ใช้ทำเครื่องประดับจึงมักมีเงิน ทองแดง เหล็ก ฯลฯ ผสมเข้าไปด้วย เพื่อให้แข็งขึ้น เปอร์เซ็นต์ของโลหะต่างๆ ที่ใช้ผสมในวงการเพชรพลอยนั้น (Gregorietti, 1996) มีดังต่อไปนี้ ทองผสมเงิน 25% เป็นพวก Green Gold ทองผสมเงิน 30% เป็นพวกแผ่นทองคำเปลว (Gold leaf) ทองที่มี พาลาเดียม (Palladium) และนิกเกิล (Nickel) ผสมไม่เกิน 75% เป็นพวก White gold ทองที่มีเหล็กผสม 15 – 20 % เป็น Grey gold และถ้ามีเหล็กผสม 25% เป็น Blue gold

2.1.3 การเกิด (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ [กพร.], 2550)

แหล่งแร่ทองคำปกติพบอยู่ในหินชนิดต่างๆ มากมายหลายชนิด อย่างไรก็ตาม แหล่งแร่ทองคำที่พบในประเทศไทยมักจะพบเกิดร่วมกับหินอัคนีที่มีความเป็นกรดมากกว่าชนิดที่เป็นด่าง หรือในหินอัคนีที่มีส่วนประกอบอยู่ระหว่างกลางของหินทั้งสองชนิด (Intermediate igneous rock) อาทิ เช่น หินแกรนิต (Granite) หินควอตซ์มอนโซไนต์ (Quartz monzonite) หินแกรนิตไดออไรต์ (Granodiorite) และหินแอนดีไซต์ (Andesite) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถพบได้ในหินชั้นและหินแปร ชนิดที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นส่วนประกอบมากกว่าที่จะพบในหินชนิดที่มีคาร์บอนเนตเป็นส่วนประกอบ

2.1.4 แหล่งแร่ทองคำ (กพร., 2550)

แหล่งแร่ทองคำจัดแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. แหล่งแร่ปฐมภูมิ (Primary deposit)

แบบที่แร่ทองคำสะสมตัวอยู่ในหินต้นกำเนิดเดิม สามารถแบ่งออกเป็น ดังนี้ คือ

- (1) แหล่งแร่ทองคำแบบสายแร่ร้อน (Hydrothermal deposit)
 - สายแร่ร้อนอุณหภูมิต่ำ (Epithermal deposit)
 - สายแร่ร้อนอุณหภูมี่ปานกลาง (Mesothermal deposit)
 - สายแร่ร้อนอุณหภูมิต่ำ (Epithermal deposit)
- (2) แหล่งแร่ทองคำแบบแปรสัมผัส (Contact metamorphic deposit)
- (3) แหล่งแร่ทองคำแบบฝังประในหิน (Deposits of disseminated)

2. แหล่งแร่ทุติยภูมิ (Secondary deposit)

แบบที่แร่ทองคำหลุดออกจากหินเดิมไปสะสมตัวใหม่ แบ่งออกได้ดังนี้ คือ

- (1) ลานแร่พัดสะสมตัวในแอ่งที่ราบกว้างที่พบ ลานแร่บนบก (Placer deposit)
- (2) ลานแร่ในทะเล (Marine deposit)

2.1.5 แหล่งแร่ทองคำในประเทศไทย (กพร., 2550)

แหล่งแร่ทองคำในประเทศไทยมีความสัมพันธ์กับหินชนิดต่างๆ หลายชนิด แหล่งแร่ทองคำที่พบมักพบเกิดร่วมกับหินอัคนีที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นกรด (Acid) หรือเป็นกลาง (Inter-mediate) มากกว่าหินอัคนีชนิดเบส (Basic) อาทิ หินแกรนิต ควอตซ์มอนโซไนต์ (Quartz monzonite) แกรโนไดออไรต์ (Granodiorite) และแอนดีไซต์ (Andesite) เป็นต้น สำหรับในหินชั้นหรือหินแปร แหล่งแร่ทองคำส่วนใหญ่มักเกิดในหินที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นส่วนประกอบ แต่อาจพบในหินที่มีคาร์บอนเนตเป็นส่วนประกอบได้เช่นกัน เช่นเดียวกับแหล่งแร่ทองคำทั่วโลก แหล่งแร่ทองคำในประเทศไทยจำแนกตามลักษณะการเกิดได้ 2 แบบ คือ แบบปฐมภูมิและแบบทุติยภูมิ

1. แหล่งแร่ปฐมภูมิ (Primary deposit) (กพร., 2550)

เป็นแหล่งแร่ทองคำที่มีแร่ทองคำเกิดร่วมกับหินต้นกำเนิด ซึ่งมีทั้งหินอัคนี หินชั้น และหินแปร โดยอาศัยขบวนการทางธรณีวิทยาที่ทำให้เกิดการสะสมตัวของแร่ทองคำ อาทิ ขบวนการสายน้ำแร่ร้อน (Hydrothermal) ขบวนการแปรสัมผัส (Contact metamorphic) และขบวนการเติมสารละลายซิลิกา (Silicification) เป็นต้น ทองคำมักจะเกิดอยู่ในหินหรือสายแร่ที่แทรกในหิน ขนาดของแร่ทองคำมีตั้งแต่ขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จนถึงขนาดใหญ่ที่มองเห็นได้ชัดเจน บริเวณที่พบแหล่งแร่ทองคำ แบบนี้ ได้แก่ บ้านป่อทอง บ้านหนองกระดี่ บ้านหนองสน ม บ้านหนองโดน บ้านบุเดี่ยว เขาสามช้อ อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี บ้านนาล้อม บ้านหนองแสง อำเภอมือง จังหวัดสระแก้ว แหล่งทองโตะโมะ อำเภอสุรินทร์ จังหวัดนราธิวาส บ้านป่อทอง อำเภอดอกคำใต้ จังหวัดลพบุรี ห้วยคำอ่อน อำเภอรังษี

จังหวัดแพร่ บ้านผาศี ดอยตุง อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ภูเก้าพระ บ้านห้วยโตก อำเภอเมือง ภูทับฟ้า อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย บ้านซำเจียง อำเภอสังขม จังหวัดหนองคาย บ้านเทพ ประทาน อำเภอโนนสะอาด จังหวัดอุดรธานี เขาโป่ง บริเวณรอยต่ออำเภอทับคล้อ จังหวัดพิจิตร กับ อำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์ บ้านน้ำก้อ อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ เขาดินและเขาแดงยาง อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นต้น แหล่งแร่ทองคำปฐมภูมิส่วนใหญ่มีแร่ทองคำ ทุกติภูมิเกิดร่วมในบริเวณใกล้เคียงเสมอ

2. แหล่งแร่ทุติยภูมิ (Secondary deposit) (กพร., 2550)

หรือเรียกอีกอย่างว่า แหล่งลานแร่ มักพบใกล้เคียงกับแหล่งแร่แบบปฐมภูมิ เกิดจากการฟุ้งของหินที่มีแร่ทองคำแบบปฐมภูมิ แล้วสะสมตัวในที่เดิมหรือถูกน้ำชะล้างพัดพาไปอยู่ตามบริเวณต่างๆ ที่เหมาะสม เช่น เขิงเขา ธารน้ำ หรือลำห้วย เป็นต้น ส่วนใหญ่แร่ทองคำที่พบจะมีขนาดใหญ่ มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า บริเวณที่พบแหล่งแร่ทองคำแบบนี้ที่รู้จักดี ได้แก่ บ้านป่าร้อน อำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ บริเวณลานแร่ตีนภูในเขตอำเภอตะกั่วทุ่ง อำเภอเมือง จังหวัดพังงา และอำเภอถลาง จังหวัดภูเก็ต บ้างทุ่งฮั่ว อำเภอเถิน จังหวัดลำปาง ห้วยหลวง อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย เขาพนมพา อำเภอวังทรายพูน จังหวัดพิจิตร ห้วยน้ำลาย บ้านน่าน้ำมัน ห้วยน้ำคิ้ว บ้านป่าซ่าวหลาม อำเภอเมือง จังหวัดเลย ถึงอำเภอสังขม จังหวัดหนองคาย บ้างคลองอุดมสุข บ้านสระพระเนตร อำเภอเมือง และบ้านบ่อนางชิง บ้านสี่แยก บ้านโนน อำเภอวัฒนานคร จังหวัดสระแก้ว บ้านทับร้าง ตำบลบ่อทอง อำเภอบ่อทอง จังหวัดชลบุรี คลองตะเกรา อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา เขาทับกลาง อำเภอแก่ง จังหวัดระยอง เป็นต้น

2.1.6 การใช้ประโยชน์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

ทองคำที่บริสุทธิ์ที่สุดและถือเป็นเกณฑ์มาตรฐาน (Proof gold) นั้นมีทองคำมากกว่า 99.99 เปอร์เซ็นต์ ทองคำที่ผ่านการทำความสะอาดและใช้ประโยชน์กันโดยทั่วไปรวมทั้งที่ใช้ในวงการเพชรพลอยและวงการทันตกรรม จะมีทองคำ 99.95 – 99.98 เปอร์เซ็นต์ การใช้ทองคำในการซื้อขายแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศนั้นถือเอาทองคำ 99.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเกณฑ์ ส่วนเงินตราที่เป็นเหรียญทองคำ ซึ่งจะมีเฉพาะทองแดงเป็นส่วนประกอบร่วมสำหรับทำให้เหรียญนั้นแข็งขึ้น อาจประกอบด้วยทองคำเพียง 89.9 – 91.7 เปอร์เซ็นต์

ทองคำที่มีความบริสุทธิ์สูงใช้ทำเป็นเครื่องประดับและเครื่องมือทางทันตกรรม มีการใช้ทองคำเพื่อการครอบฟัน เชื่อมฟัน หรือการเชื่อมทอง และยังมีใช้ในการผลิตฟันปลอมด้วย เนื่องจากทองคำมีความคงทนต่อการกัดกร่อน การหมองคล้ำ และยังมีความแข็งแรงอีกด้วย

โดยจะใช้ทองคำผสมกับธาตุอื่น เช่น แพลตินัม

ใช้หุ้มเครื่องเคลือบและเครื่องแก้ว ใช้เป็นส่วนประกอบ บินเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ เช่น ทำฟิวส์ความร้อนในเตาไฟฟ้า (Electric furnace) เป็นแผ่นเป้าในเครื่องเอ็กซ์เรย์ ใช้เป็นตัวอย่างมาตรฐาน จุดเยือกแข็ง ใช้เดินเส้นเครื่องมือทางเคมี และหุ้ม Phosphor bronze หรือ นิกเกิล - เงิน ที่ใช้เป็นสปริงในวงจรความถี่คลื่นวิทยุ

ในทางอวกาศได้มีการนำทองคำมาใช้เป็นชุดนักบินอวกาศและแคปซูล เพื่อป้องกันไม่ให้นักบินอวกาศกระทบกับรังสีในอวกาศที่มีพลังงานสูง นอกจากนี้ยังมีการใช้ทองคำบริสุทธิ์เคลือบกับเครื่องยนต์ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ หมวกเหล็ก เกราะบังหน้า และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในอวกาศ เนื่องจากทองคำที่มีความหนา 0.000006 นิ้ว จะมีคุณสมบัติช่วยสะท้อนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่ให้ทำลาย หรือลดประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้

ด้านอิเล็กทรอนิกส์ มีการนำทองคำมาใช้เป็นวัสดุที่ หน้าที่สัมผัสในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น เครื่องคิดเลข โทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ หรือโทรศัพท์มือถือ เนื่องจากทองคำมีค่าการนำไฟฟ้าสูง และมีความคงทนต่อการกัดกร่อน จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของเครื่องไฟฟ้าเหล่านั้น

2.2 ทองแดง (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5,000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองคำคือมนุษย์รู้จักทองคำ เมื่อประมาณ 4,000 ปีก่อนคริสตกาล ทองแดง เป็นโลหะที่มีปริมาณการใช้เป็นอันดับที่สองรองลงมาจาก โดยน้ำหนักที่เด่นมากเป็นรองก็แต่เงินและอลูมิเนียมเท่านั้น มนุษย์รู้จักใช้ประโยชน์ของทองแดง ทำเครื่องใช้ไม่สอยและอาวุธต่างๆ ตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ที่เรียกว่ายุคสัมฤทธิ์ (Bronze age) มาตราบนปัจจุบันนี้ทองแดงยังเป็นโลหะที่ใช้งานอย่างแพร่หลายมาก มากเป็นที่สองรองลงมาจากเหล็กและเป็นโลหะที่สำคัญในกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non – ferrous metal) ทองแดงเป็นวัสดุ ที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดีและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีอีกด้วย ดังนั้นทองแดงจึงถูกใช้ทำเป็นส่วนประกอบของหม้อต้มน้ำ เครื่องถ่ายเทความร้อน ฯลฯ คุณสมบัติของทองแดงอีกประการหนึ่งก็คือ มีความต้านทานจำเพาะต่ำ เป็นที่สองรองจากเงิน ปริมาณทองแดงที่ผลิตได้ประมาณครึ่งหนึ่งใช้ในการอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟฟ้าขดลวดที่ใช้ในมอเตอร์และเครื่องปั้นไฟฟ้า ฯลฯ

2.2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ (Wikipedia, 2009)

ทองแดง มีความแข็งตาม มาตรฐาน ของโมห์ 2.5 – 3.0 มีความหนาแน่น 8.89 มี

ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) 1.71 ที่ 20°C และมีความนำไฟฟ้า ที่ดี (Electrical conductivity) เป็นตัวนำความร้อนที่ดี มีความเหนียวของทองแดงสูงมากสามารถขึ้นรูปโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก กลึงไสขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อผสมธาตุอื่นบางตัวเข้าไป ไม่มีสารแม่เหล็ก

2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

มีสูตรทางเคมีคือ Cu เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) ลำดับที่ 29 น้ำหนักอะตอม (Atomic weight) 63.57 อุณหภูมิของจุดเดือด (Boiling point) 2,595 °C จุดหลอมเหลว 1,083 °C จุดอ่อนตัวที่ 20 °C เป็นธาตุที่พยายามรวมกับกำมะถัน จึงมักจะเป็นพวกซัลไฟด์ พบในหินอัคนีเกิดเป็นแร่พวกคาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite) และแร่บอร์ไนต์ (Bornite) ทองแดงที่พบมีร่องรอยอยู่ทั่วไปในหิน ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณทองแดงในหินชนิดต่างๆ

Type of material	Copper content generally reported	
	Range	Average
<u>Igneous rocks</u> (parts per million)		
Ultramafic rocks	-	15
Basaltic and gabbroic rocks	30 - 160	90
Andesites	-	35
Granitic rocks	5 -30	15
<u>Sedimentary rocks</u> (parts per million)		
Limestones	-	4
Sandstones	10 - 20	10
Shales and clays	18 -120	45
Soils	2 - 100	20
Phosphorites	10 - 100	30
Coals	2 - 40	15
<u>Waters</u> (parts per million)		
Sea water	1 -15	3
Surface waters	0.4 – 1.50	5

(สุวิชัย สัมปตตะวานิช และงามพิศ อังคทะวานิช, 2518)

2.2.3 การเกิด (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

ทองแดงเกิดจากแร่ได้มากมายหลายชนิดมากกว่า 160 แร่ ตารางที่ 2.2 แสดงแร่ทองแดงที่สำคัญ โดยกล่าวถึงส่วนประกอบและ สภาพการ กำเนิดไว้คร่าวๆ คาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite) เป็นแร่ซัลไฟด์ที่พบมากที่สุด ถัดไปเป็น บอร์ไนต์ (Bornite) กับคาลโคไซต์ (Chalcocite) มาลาไคต์ (Malachite) อาซูไรต์ (Azurite) และคริสโซคอลลา (Chrysocolla) เป็นแร่ออกไซด์ที่พบมากที่สุด และสีน้ำเงินเขียวอันสดใสของแร่เป็นสิ่งที่ช่วยกรุยทางในการสำรวจหาแหล่งแร่ทองแดงมานับพันๆ ปี ทองแดงมีอยู่ทั่วไปในโลกประมาณ 50 ส่วนในล้านส่วน (Part per million) ส่วนในหินชนิดต่างๆ นั้น ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1

2.2.4 แหล่งแร่ทองแดง (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

แหล่งแร่ทองแดงจัดแบ่งได้เป็น 5 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1. Porphyry copper และ Vein and replacement

Porphyry copper มีการกำเนิดเกี่ยวข้องกับหินอัคนีชนิด เฟลซิก (Felsic) นักธรณีวิทยาบางคนเชื่อว่าทองแดงมาจากหินอัคนี โดยเกิดอยู่ประปรายในหินด้วยการตกผลึกอย่างรวดเร็วของแมกมา นอกจากนี้ทองแดงยังถูกเคลื่อนโดยน้ำหรือไอน้ำแล้วมาอยู่ในตามรอยแตกแยกของหินอัคนีหรือหินใกล้เคียง หรือออกมาอยู่ข้างนอกหินอัคนีเกิดเป็นสายแร่ (Vein) นักธรณีเคมีรุ่นใหม่ๆ ได้ศึกษา Porphyry copper และกล่าวว่าเกิดโดยทองแดงมาจากหินชั้นรอบๆ หินอัคนี หินอัคนีเป็นตัวทำให้ร้อน เกิดอุณหภูมิแตกต่างกันทำให้เกิดกระแสขึ้น น้ำจากข้างนอกจะวิ่งเข้ามาหาข้างใน และพาเอาทองแดงมาสะสมตัวอยู่ใกล้ๆ กับหินอัคนีหรือภายในหินอัคนี เนื่องจากการละลาย พอมีอุณหภูมิสูงจะตกตะกอนออกมา ความคิดใหม่ๆ นี้สนับสนุนโดยการทดลองและการคำนวณทาง Thermodynamic data และหลักฐานในสนามส่อว่าเป็นความจริงตามนี้ จะทำให้ปลี่ยนความคิดเก่าๆ และทฤษฎีที่ว่า Porphyry copper เกิดโดยเกี่ยวข้องกับ Plate tectonic ต้องล้มเลิกไปด้วย ใน Porphyry copper นอกจากแร่ทองแดงแล้วยังพบแร่ ตะกั่ว สังกะสี เงิน ทอง เหล็ก โมลิบดีนัม และแมงกานีสอีกด้วย

Vein and replacement แหล่งแร่ชนิดนี้พบเกี่ยวข้องกับหินอัคนีชนิด เฟลซิก เช่นเกี่ยวข้องกับ Porphyry intrusion ที่ Butte, Montana ประเทศสหรัฐอเมริกา พบในหินเดิมข้างเคียงในแหล่ง Porphyry copper ที่ Bingham, Utah และที่ Bisbee, Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา

ตาราง 2.2 แสดงส่วนประกอบและสภาพการกำเนิดของแร่ทองแดงชนิดต่างๆ

Name	Compositions	Porphyry	Vein and replacement	Sedimentary strats - bound	Volcanogenic strats - bound	Magmatic Segregation	Keweenaw type	Oxide zone	Sulfide zone
Major minerals									
Native									
copper	Cu	--	--	o	--	--	o	x	x
Chalcocite	Cu ₂ S	--	o	o	o	--	x	--	o
Covellite	CuS	--	--	--	--	--	--	--	o
Bornite	Cu ₅ FeS ₄	x	o	x	o	o	--	--	--
Chalcopyrite	CuFeS ₂	o	o	o	o	o	--	--	--
Enargite	Cu ₃ AsS	o	o	--	x	--	--	--	--
Cuprite	Cu ₂ O	--	--	--	--	--	--	o	x
Malachite	Cu ₂ (OH) ₂ (CO ₃)	--	--	--	--	--	--	o	o
Significant supplementary minerals									
Tetrahedrite	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	--	x	--	x	--	--	--	--
Tennantite	(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃	--	x	--	x	--	--	--	--
Famatinite	Cu ₃ SbS ₄	--	x	--	--	--	--	--	--
Stannite	Cu ₂ FeSnS ₄	--	x	--	--	--	--	--	--
Ataconite	Cu ₂ (OH)Cl	--	--	--	--	--	--	x	--
Tenorite	CuO	--	--	--	--	--	--	o	--
Azurite	Cu ₃ (OH) ₂ (CO ₃) ₂	--	--	--	--	--	--	x	--
Chrysocolla	CuSiO ₃ ·2H ₂ O	--	--	--	--	--	--	o	--
Brochantite	Cu ₄ (SO ₄)(OH) ₆	--	--	--	--	--	--	x	--
Antlerite	Cu ₄ (SO ₄)(OH) ₆	--	--	--	--	--	--	o	--
Chalcanthite	CuSO ₄ ·5H ₂ O	--	--	--	--	--	--	o	--
Kroehnkite	Na ₂ Cu(SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	--	--	--	--	--	--	x	--

(o = major ore mineral ; x = minor ore mineral)

(สุวิชัย สัมปตตะวานิช และงามพิศ อังคทะวานิช, 2518)

สายแร่ (Vein) เกิดขึ้นได้เมื่อสารละลายที่มีโลหะอยู่มาก ออกมาจาก Crystallizing intrusion และเกิดเป็นแหล่งในรอยเลื่อน (Fault) หรือรอยแตกแยก (Fracture)

Hydrothermal alteration envelope อาจเกิดร่วมกับสายแร่ (Vein) ซึ่งบ่งถึงปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Wall rock กับสารละลายที่ขึ้นมา ตัวอย่างเช่นที่ Butte, Montana ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเริ่มจาก Sericite – Kaolinite - Montmorillonite ไปยัง Fresh wall rock จากการเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของโซนเหล่านี้พบแร่มีการแพร่กระจายของไอออนจากหินเข้าไปในสายแร่ และในขณะเดียวกันนั้นก็มีการเคลื่อนตัวของ Hydrogen ion เข้าไปใน Wall rock แร่ที่พบใน Alteration zone ของ Porphyry copper นั้นคล้ายกับที่พบในบริเวณที่เกิด Alteration ที่อยู่รอบๆ Sulfide vein

ชนิดปล่อง (Pipe) นั้น มีลักษณะเป็นปล่องกลมไม่เป็นแผ่นบางยาวอย่าง Vein อาจพบตามบริเวณที่รอยเลื่อน (Fault) ตัดกันหรือเกิดจากการระเบิดของก๊าซแมกมา (Magma) เรียกการเกิดแบบนี้ว่า Breccias pipe เพราะพบมีเศษหินหักๆ รวมอยู่ด้วย ปกติจะพบว่าแหล่งชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับ Porphyry copper เช่นที่ Cananea ประเทศเม็กซิโก และในประเทศชิลี

ตามสายแร่ หิน แห้ว (Host rock) นี้ อาจจะเป็นหินชั้น เช่น หินปูน หินทรายที่มีเนื้อปูนหรือพวก Diabase เช่นที่ Ray, Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา ปกติแหล่งชนิดนี้จะเป็นรูปแบบยาว มักจะขนานไปกับชั้นหิน พบว่ามีความสัมพันธ์กับ Porphyry copper เช่นที่ Mission และ Pima ใน Arizona และที่ Bingham, Utah ประเทศสหรัฐอเมริกา

หินแห้วที่เหมาะสมในการแทนที่นี้อาจจะยาวติดต่อไป เป็นบริเวณกว้างและการค้นหาชั้นหินที่วานี้ช่วยมากในการหาแหล่งใหม่ๆ ในอาริโซนาได้ให้ความสนใจในเรื่องชั้นหินมากขึ้นเพื่อหาแหล่งชนิดนี้

แร่ที่พบใน Vein, pipe และ replacement นี้ มักจะพบแร่คาลโคไพไรต์ แร่บอร์ไนต์ และแร่คาลโคไซต์ แร่โคเวลไลต์ ก็พบบ้างเหมือนกัน ที่ Butte, Montana ประเทศสหรัฐอเมริกา นั้นมีแร่ที่พบอยู่ 4 จำพวกด้วยกัน คือสายแร่ที่อยู่ลึกมาก เรียก Chalcopyrite zone พบแร่คาลโคไพไรต์ แร่เทนแนนไทต์ (Tennantite) แร่บอร์ไนต์ ใน Central zone พบแร่คาลโคไซต์ กับแร่เอินาร์โกต์ (Enargite) ใน Intermediate zone พบแร่บอร์ไนต์ แร่คาลโคไซต์ แร่คาลโคไพไรต์ และแร่เอินาร์โกต์ ใน Peripheral zone เป็น Carbonate zone พบแร่โรโดโครไซต์ (Rhodochrosite) แร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) แร่กาลีน่า (Galena) และแร่โรโดไนต์ (Rhodonite)

ที่ Magma, Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา นั้น สายแร่ประกอบด้วย แร่คาลโคไพไรต์ แร่บอร์ไนต์ แร่เอินาร์โกต์ แร่เทนแนนไทต์ แร่ไดเจนไนต์ (Digenite) และแร่สฟาเลอไรต์ โดยพบในตอนล่างเปลี่ยนเป็นแร่เทนแนนไทต์ และมีแร่สฟาเลอไรต์อยู่ในตอนบน พบแร่ไดเจนไนต์ในตอนล่าง ที่พบในหินปูนนั้นเป็นแร่คาลโคไพไรต์

มีผู้พบว่าบริเวณสายแร่ รอบนอก Peripheral มักจะมีทองและเงินอยู่กับแร่ไฟไรต์ แร่คาลโคไฟไรต์ แร่สฟาเลอไรต์ แร่สเปกคูลาไรต์ (Specularite) แร่อินาร์ไกต์ แร่เททราฮีโดรด์ (Tetrahedrite) แร่แบไรต์ และแร่แมงกานีส กับแร่วานาเดียม ซึ่งการค้นหากลุ่มของสายแร่เล็กๆ ที่มีแร่พวกนี้ในบริเวณรอบๆ นอก อาจนำไปถึงการค้นหาแหล่งแร่ทองแดงที่ถูกปิดทับอยู่ได้

แหล่งแร่ชนิดนี้ยากแก่การกล่าวถึงในแง่ของความสมบูรณ์ โดยปกติแล้วจะเป็น แหล่งเล็กๆ ไม่ใหญ่นัก

2. จากหินชั้น

ทองแดงชนิดหินชั้นที่ประเทศซาอุดีอาระเบียและประเทศแซมเบีย นั้นมีปริมาณรวมกันถึง 15% ของแหล่งแร่ทองแดงที่ทราบแล้วของโลกและพบแหล่งใหญ่ๆ อีกใน ประเทศรัสเซีย แหล่งแร่ ชนิดนี้คาดว่าจะค้นพบอีกมากเพราะเป็นแหล่งที่ค้นหายากและธรณีวิทยาการกำเนิดของแร่ชนิดนี้ ก็เพิ่งจะเข้าใจกันดีเมื่อไม่นานมานี้

ชนิดที่ 1 พบในหินยุค Precambrian เกิดขึ้นในตอนที่ยังมีบรรยากาศมีออกซิเจนมาก และละลายเคลื่อนที่ทองแดงซึ่งเมื่อก่อนนั้น Stable ชนิดนี้รวมถึงการชะล้างมาจากพวกแหล่งแร่ฝัง ประด้วย ตัวอย่าง คือ African copper belt

ชนิดที่ 2 เกิดพร้อมกับการสะสมตัวของหินชั้นในทะเลโดยการตกตะกอนหรือการ ดูดซึมโดยสิ่งมีชีวิต แหล่งชนิดนี้มักจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเงินพบมีแร่ยูเรเนียม แร่วานาเดียม และเงิน ประปนอยู่ด้วยเพราะเกิดได้ในสิ่งแวดล้อมคล้ายๆ กัน ตัวอย่าง คือ Kupferchiefer copper belt ที่ประเทศเยอรมนี

ชนิดที่ 3 แหล่งชนิดนี้เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาของน้ำเกลือหรือน้ำใต้ดินกับชั้นหินที่มี ส่วนผสมทางเคมีที่พอเหมาะกันเช่นพวก Black shale หินทรายที่มีเนื้อปูนหรือหินปูนคาร์บอเนต Red-bed copper deposit ที่ New Mexico ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นตัวอย่างของชนิดนี้

3. ในหินอัคนี

มีการพบทองแดงในหินบะซอลต์และในแอนดีไซต์มากกว่าในหินอัคนีชนิดอื่นๆ ซึ่ง ในภาวะที่เหมาะสม ทองแดงจะรวมตัวกันเกิดเป็นแหล่งแร่ขึ้นได้ ที่เป็นแหล่งสำคัญของโลกพบใน หินลาวา และ Pyroclastic rock ปกติจะพบเป็น

1. เป็นชั้นหรือเป็นเลนส์ขนานกับชั้นหิน
2. ความกว้างในแนวราบน้อยเมื่อเทียบกับความหนา
3. ส่วนใหญ่จะเป็นแร่ซัลไฟด์ มีแร่ประกอบเป็นพวกซิลิเกตเล็กน้อย ปกติจะเป็น

แร่ไฟไรต์ แร่พิริโรไทต์ และแร่คาลโคไฟไรต์ แร่สฟาเลอไรต์ และแร่กำลึนา

ในระยะสิบปีที่ผ่านมา ได้มีการพยายามอย่างยิ่งที่จะศึกษาถึงการกำเนิดของแร่ชนิดนี้ พบกันว่าการกำเนิดขึ้นที่ท้องทะเลในระยะท้ายๆ ของการกำเนิดภูเขาไฟ พบได้ทั้งชนิดประหรือ Stockwork หรือกลุ่มของสายแร่ และอาจจะพบในช่องว่างของ Pillow lava เช่นที่ประเทศไชปรัส นอกจากนี้พบเป็นชั้น แสดงว่าเกิดในทะเลเปิด อาจพบว่าในระหว่างช่องว่างของ Breccia มี Sandy pyrite เม็ดละเอียดประจะอยู่ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ Downslope จากแหล่งปกติจะถูกปกคลุมอยู่ ชั้นหินที่มีเหล็กออกไซด์ ซิลิกา และไพไรต์ ซึ่งชั้นนี้จะหนาอาจอยู่บนชั้นแหล่งแร่ แล้วจะค่อยบางออกไป ซึ่งลักษณะอันนี้ที่นำไปยังทฤษฎีการกำเนิดของแหล่งแร่ชนิดนี้ โดยสารละลายหรือก๊าซที่มีโลหะอยู่มากนี้จะขึ้นมาอย่างรวดเร็วตามรอยแตกใน Submarine volcanic pile และตกตะกอนลง บางส่วนจะเป็น Colloidal เกิดใกล้กับผิวของช่องว่างและบนพื้นท้องทะเล การเกิดนี้จะไปปิดรอยแตกแยกทำให้มีแรงดันมากขึ้น ก็จะดันแทรกขึ้นมาอีก เช่นเป็น Breccia จากแหล่งที่เกิดไปแล้วได้ และสารละลายที่มีเหล็กอยู่จะร่วมกับน้ำทะเลที่มีออกซิเจนอยู่ เกิดเป็นชั้นหินที่มาปิดดังที่กล่าวมาแล้ว

ปกติแหล่งชนิดนี้ จะมีทองแดงอยู่มากที่สุดถึงร้อยละ 10 และเป็นแร่ที่มีค่าทางเศรษฐกิจประมาณ 2.5 % มีขนาดตั้งแต่แสนตันไปจนถึง 50 ล้านตัน ความแตกต่างของความสมบูรณ์ขึ้นอยู่กับจำนวนของตะกั่ว สังกะสี เงิน ทอง และการเก็บผลจากกำมะถันและเหล็กจากแหล่งแร่ด้วย

4. พบร่วมกับแร่เหล็ก

แหล่งแร่เหล็กโดยทั่วไปจะมีทองแดงอยู่ด้วย และเป็นผลพลอยได้ในการผลิตทองแดงจากแหล่งนี้ที่มีมากก็คือแหล่งในประเทศแคนาดา และประเทศรัสเซีย ซึ่งคิดกันว่าเป็นแหล่งที่เกิดแบบ Magmatic segregation

แร่คาลโคไพไรต์ นี้เกี่ยวข้องกับหิน Mafic โดยพบจากที่มีทองแดงซัลไฟด์ ไปจนถึงเป็นนิกเกิลซัลไฟด์ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของแมกมา ยิ่งเป็น Mafic มากจะมีนิกเกิลมาก

แหล่งผลิตแหล่งใหญ่ได้แก่ Sudbury, Ontario ในประเทศแคนาดา

5. ทองแดงธรรมชาติ

ทองแดงธรรมชาติพบในบริเวณแหลม Keweenaw ที่รัฐมิชิแกน ประเทศสหรัฐอเมริกา ผลิตทองแดงมาตั้งแต่ปี 1845 ทำไปแล้วมากกว่า 5 ล้านตันของโลหะทองแดง แม้ว่าปัจจุบันจะมีการทำน้อยแต่ก็ยังมีแหล่งสำรองอยู่อีกมาก ทองแดงซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงธรรมชาติขึ้นมาประจุในรอยแตกหรือช่องว่างระหว่างหินหลังจากมีการผุพัง และพบว่าเป็น Low grade regional metamorphism zoning of silicate mineral

2.2.5 แหล่งแร่ทองแดงในประเทศไทย (สุวิทย์ สัมปัตตะวนิช และงามพิศ อังคตะวานิช, 2518)

แหล่งแร่ทองแดงมีอยู่หลายแหล่งในประเทศ แต่แหล่งที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจนั้นมีอยู่เพียงไม่กี่แห่ง บริเวณที่พบได้แก่ในจังหวัดเลย นครราชสีมา เพชรบูรณ์ อุตรดิตถ์ แพร่ น่าน ลำปาง ลพบุรี ฉะเชิงเทรา และกาญจนบุรี แหล่งแร่ทองแดงมีการกำเนิดแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ เป็นสายจากพวกหินอัคนี พวกเกิดเป็นชั้นร่วมกับพวกหินทรายและชีสต์ และที่เกิดแบบแปรสัมผัส มักเกิดแบบร่วมกับแร่ตะกั่ว แร่สังกะสี และแร่ดีบุก แร่ทองแดงที่พบได้แก่ แร่คาลโคไพไรต์ แร่อาซุไรต์ แร่มาลาไคต์ แร่คิวไพไรต์ และแร่ทองแดงธรรมชาติ (Native copper)

บริเวณที่น่าสนใจของแหล่งแร่ทองแดง ของประเทศไทย ได้แก่ บริเวณจังหวัดที่ ก ที่ปากช่อง จังหวัดนครราชสีมาซึ่งเป็นแนวยาวประมาณ 11 กม. พบแร่ทองแดงปฐมภูมิประปรายในบริเวณนี้ บริเวณที่สอง ได้แก่ บริเวณน้ำตรอน-น้ำส้ม ที่อำเภอป่าด และอำเภอปากท่า จังหวัดอุตรดิตถ์ พบแร่ทองแดงทุติยภูมิฝังตัวในหินทราย อีกบริเวณหนึ่งที่ควรให้ความสนใจในการสำรวจเปิดการทำเหมืองได้คือ บริเวณ ภูหินเหล็กไฟ และภูทองแดง ในจังหวัดเลย พบแร่ทองแดงประปรายในหินแกรนิต นอกจากนี้ยังพบมีแร่สังกะสีเกิดร่วมอยู่ด้วยกับตะกั่ว และโมลิบดีนัม ประมาณปริมาณแร่สำรองของทองแดง ที่ภูหินเหล็กไฟ ซึ่งเมื่อคิดเนื้อทองแดง 1 % จะมีปริมาณ 50 ล้านตัน สำหรับที่ภูทองแดงมีช่วงที่มีแร่ทองแดงประปรายเป็นชั้นหนาประมาณ 60 เมตร กว้าง 140 เมตร และยาว 800 เมตร เป็นแร่ทองแดงชนิด 1 % ซึ่งทั้งหมดมีปริมาณแร่สำรองประมาณ 12 ล้านตัน

ปัจจุบันแหล่งแร่ทองแดงแหล่งใหม่ ซึ่งพบมีกำเนิดแบบหินชั้น คือที่อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น มีพวกแร่กัมมันตรังสีเกิดร่วมอยู่ด้วยในหินทรายเนื้อปานกลางและใน หินกรวดทราย แต่ส่วนมากจะพบอยู่ตามช่องว่างในหินทราย แหล่งแร่ทองแดงอีกแห่งซึ่งเป็นแบบพิเศษคือแหล่งที่พนม สารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็น โลหะทองแดงธรรมชาติ (Native copper) และแร่ทองแดงชนิดต่างๆ พบในหินไมกาชีสต์ (Mica schist) เป็นบริเวณกว้าง ชั้นของหินชีสต์ที่มีแร่ทองแดงหนาประมาณ 10-30 ซม. บางแห่งสลัด้วยหินชีสต์ที่ไม่มีแร่ทองแดง

2.2.6 การใช้ประโยชน์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2522)

ทองแดงมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง (Ductility) และการต้านทานไฟฟ้าต่ำ และยังเป็นส่วนประกอบสำคัญของโลหะผสม (Alloy) อีกหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (Brass) หรือทองบรอนซ์ (Bronze) โดยสรุปการใช้งานทองแดงในด้านต่างๆ ได้ดังนี้

1. โลหะทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.95% ขึ้นไป จะมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้ดีมาก จึงถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

2. ใช้โลหะทองแดงทำท่อในอุปกรณ์ตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ
3. ใช้ทำอุปกรณ์เกี่ยวกับรถยนต์ อาวุธ เหยียดขยายปณ และตราต่างๆ
4. ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะหลายชนิด เช่น
 - โลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล มีความเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยเฉพาะในน้ำทะเลจึงใช้ทำท่อในระบบกลั่น อุปกรณ์ภายในเรือ
 - โลหะผสมระหว่างทองแดง นิกเกิล และสังกะสี หรือเรียกว่า เงินนิกเกิลหรือเงินเยอรมัน ใช้ทำเครื่องใช้ต่างๆ เช่น ช้อน ส้อม เครื่องมือแพทย์
 - ทองบรอนซ์ หรือบรอนซ์ หรือทองสัมฤทธิ์ หรือทองสำริด โลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก ถ้ามีดีบุกผสมอยู่ระหว่างร้อยละ 0.8-10 โดยมวล และมีการเติมฟอสฟอรัสเล็กน้อย เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะมีความแข็งกว่าทองแดง เมื่อเย็นตัวมีความแข็งแรง มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี และไม่ถูกกัดกร่อน
 - ทองเหลือง โลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก มีสังกะสีผสมอยู่ ร้อยละ 20-45 โดยมวล ทองเหลือง จะมีความแข็ง และความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสมของสังกะสีเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการตีแผ่ให้เป็นแผ่น ขึ้นรูปง่าย ทองเหลืองจึงถูกนำมาใช้ในการทำท่อ ลื่นปิด-เปิด และตัวเชื่อม
5. ทองแดงไม่ทำปฏิกิริยากับกรด แต่ในกรณีกรดไนตริก พบว่า NO_3^- จะเป็นตัวออกซิไดซ์ และปรีดิทซ์ทองแดงให้เป็น Cu^{2+} ไอออน
6. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (จุนสี) ใช้ฆ่าเชื้อราและสาหร่าย
7. แร่ทองแดงที่มีสีหรือลวดลายสวยงาม เช่น แร่มาลาไคต์ ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, สีเขียวอ่อน), อาซูไรต์ ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ หรือ $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, สีน้ำเงิน และแร่คริโซคอลลา ($(\text{Cu,Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) สามารถนำมาทำเป็นเครื่องประดับได้

2.3 เหล็ก

มีสูตรทางเคมีคือ Fe เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) ลำดับที่ 26 น้ำหนักอะตอม (Atomic weight) 55.84 อุณหภูมิของจุดเดือด (Boiling point) $2,887^\circ\text{C}$ จุดหลอมเหลว $1,535^\circ\text{C}$

2.3.1 การเกิด (กรรมทฤษฎาการทดแทน, 2544)

แหล่งแร่เหล็กที่พบในประเทศไทยมีกำเนิดทางธรณีวิทยา 4 ลักษณะ ดังนี้

1. เกิดแบบแทนที่ (Replacement deposit)

ในหินคาร์บอนเนตใกล้เขตการแปรสภาพโดยการแทนที่ (Contact metasomatic zone) หินทองที่ที่พบอยู่ในยุคออร์โดวิเชียน (Ordovician period) หรือเพอร์เมียน (Permian period) และคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous period) ส่วนหินอัคนีแทรกซอนชนิดกรดหรือปานกลางมักอยู่ในยุคไทรแอสซิก (Triassic period)

2. เกิดแบบสายแร่ (Vein deposit)

ในหินชั้นและหินแปร ซึ่งมีอายุในช่วงมหายุคพาลีโอโซอิกเป็น (Paleozoic period) ส่วนใหญ่

3. เกิดเป็นชั้นร่วมกับหินชั้น (Stratiform deposit)

ตัดผ่านในหิน ซึ่งคาดว่ามีความอายุในยุคพรีแคมเบรียน (Precambrian period)

4. เกิดแบบตกตะกอนทับถมอยู่กับที่ (Residual deposit)

ในลักษณะศิลาแลง (Laterite) โดยเกิดจากการผุพังของหินชนิดต่างๆ ซึ่งมีธาตุเหล็กในปริมาณสูง

2.3.2 แหล่งแร่เหล็กในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

แหล่งแร่เหล็กที่พบในประเทศไทย ส่วนใหญ่แร่จะโผล่ให้เห็นบนพื้นดินเป็นหย่อมๆ บนเนินเขา และบริเวณที่เป็นภูเขา และเห็นได้ชัดเจน ในประเทศไทยพบอยู่ทุกภาค สำหรับแหล่งแร่เหล็กที่มีคุณค่าในเชิงพาณิชย์ ในภาคตะวันออก พบแหล่งแร่เหล็กในเขตจังหวัด ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ระยอง จันทบุรี และปราจีนบุรี ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบแหล่งแร่เหล็กในเขตจังหวัดเลย อุดรธานี และนครราชสีมา ในภาคเหนือ พบแหล่งแร่เหล็กในเขตจังหวัด เชียงใหม่ แพร่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน ตาก กำแพงเพชร และอุดรธานี ตะกั่วในภาคกลางพบแหล่งแร่เหล็กในเขต จังหวัดลพบุรี นครสวรรค์ อุทัยธานี เพชรบูรณ์ กาญจนบุรี และประจวบคีรีขันธ์ และในภาคใต้ พบแหล่งแร่เหล็กในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี และกระบี่

สำหรับบริเวณที่มีศักยภาพทางแร่เหล็กสูงสุด ได้แก่ บริเวณอำเภอเชียงคาน อำเภอเมือง และอำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ซึ่งขณะนี้สามารถประเมินปริมาณทรัพยากรแร่ (Inferred resource) รวมกันได้ทั้งหมดประมาณ 23 ล้านเมตริกตัน (45-65% Fe) นอกจากนั้นยังมีอยู่กระจัดกระจาย ในภาคต่างๆ ของประเทศไทย สำหรับแหล่งแร่เหล็กที่สำรวจพบในปัจจุบัน เป็นเพียงแหล่งแร่เหล็กที่มีขนาดเล็กไม่ใหญ่นัก เมื่อเทียบกับแหล่งแร่เหล็กที่มีการผลิตแล้วในโลกนี้ซึ่งจะมีปริมาณสำรองของแร่เหล็กนับเป็นพันล้านเมตริกตันหรืออย่างต่ำเป็นร้อยล้านเมตริกตันขึ้นไป โดย

แหล่งแร่เหล็กที่พบแล้วในไทยจะมีปริมาณแร่ของแต่ละแหล่งอย่างมากไม่เกิน 19 ล้านเมตริกตัน เท่านั้น เช่น แหล่งภูยาง อำเภอเชียงคาน จังหวัดเลย แหล่งบ้านน้ำรอบ อำเภอถานดัก จังหวัดอุทัยธานี

จากรายงานของกรมทรัพยากรธรณี (พ.ศ.2543 และ 2546) ได้สำรวจพบปริมาณสำรองแร่เหล็ก โดยแหล่งแร่ที่สำคัญในประเทศที่มีปริมาณสำรองแร่มากกว่า 100,000 เมตริกตันขึ้นไป พบว่ามีทั้งหมดรวม 26 แหล่ง มีปริมาณทรัพยากรแร่เหล็ก (Inferred resource) รวมกันประมาณ 63.8 ล้านเมตริกตัน มีความบริสุทธิ์ของเนื้อเหล็กร้อยละ 30-70 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

2.3.3 ชนิดของแร่เหล็ก (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

แร่เหล็กในธรรมชาติอยู่ในรูปของออกไซด์ เช่น แร่ฮีมาไทต์ (Hematite) (Fe_2O_3) และแร่แมกนีไทต์ (Magnetite) (Fe_3O_4) โดยแหล่งแร่ที่สำคัญอยู่ในประเทศจีน ออสเตรเลีย บราซิล และอินเดีย แร่เหล็กที่ใช้ในการถลุงควรเป็นแร่เหล็กที่มีมลทินต่ำ มีธาตุเหล็กมากกว่าร้อยละ 50 ถ้าต่ำกว่านี้จะต้องผ่านกระบวนการแต่งแร่ เพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ของแร่เหล็ก แร่เหล็กที่สำคัญ ได้แก่

1. แร่ฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3) เป็นแร่ที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุด ถ้าบริสุทธิ์จะมีธาตุเหล็กประมาณ 69.9% มีสีน้ำตาลแดงถึงน้ำตาลอ่อน
2. แร่แมกนีไทต์ (Magnetite, Fe_3O_4) ถ้าบริสุทธิ์จะมีธาตุเหล็กประมาณ 72.4% มีสีเข้มถึงดำ
3. แร่ลิโมนาइट (Limonite, $3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) มีธาตุเหล็กประมาณ 60%
4. แร่ซิเดไรต์ (Siderite, FeCO_3) มีธาตุเหล็กประมาณ 48%

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ปริมาณทรัพยากรแร่เหล็กจำแนกตามแหล่งแร่ที่สำคัญ

แหล่งแร่	จังหวัด	ปริมาณทรัพยากรแร่ (เมตริกตัน)	%Fe
1. ภูยาง อ.เชียงคาน	เลย	19,019,000	59-69
2. บ้านน้ำรอบ อ.ลานสัก	อุทัยธานี	16,000,000	30-68
3. เขาพระงาม อ.เมือง	ลพบุรี	6,500,000	62
4. บ้านหนองบอน อ.แปลงยาว	ฉะเชิงเทรา	6,200,000	45-69
5. เขาคีมครีมี อ.บ่อพลอย	กาญจนบุรี	4,830,000	40
6. ภูอ่าง อ.เมือง	เลย	1,603,000	43-59
7. ภูเขี้ยะ อ.เชียงคาน	เลย	1,500,000	62
8. แม่ระมาด อ.แม่ระมาด	ตาก	1,500,000	NA
9. แม่โก อ.แม่แจ่ม	เชียงใหม่	1,000,000	70
10. เขาเหล็ก อ.ชนแดน	เพชรบูรณ์	1,000,000	60
11. ดอยแม่ถอด อ.เสริมงาม	ลำปาง	675,000	65
12. เขาดินแดง อ.พนัสนิคม	ชลบุรี	600,000	65
13. เขาวง อ.เมือง	ลพบุรี	500,000	60
14. บ้านเนินไร่ อ.แปลงยาว	ฉะเชิงเทรา	454,000	58
15. ภูเหล็ก อ.เชียงคาน	เลย	450,000	58
16. หนองโพธิ์ อ.ตาคลี	นครสวรรค์	450,000	64
17. เขาควนทั้ง อ.ฉวาง	นครศรีธรรมราช	341,000	65
18. เขาเหล็ก อ.หนองบัว	นครสวรรค์	300,000	50-70
19. มอดินแดง อ.นาดี	ปราจีนบุรี	250,000	65
20. เขมืองทวด อ.บ้านนาสาร	สุราษฎร์ธานี	200,000	41
21. เขาแก้ว อ.พรานกระต่าย	กำแพงเพชร	157,000	60
22. บ้านป่าสัก อ.วังชัน	แพร่	100,000	62
23. ภูโคก-ภูขุมทอง อ.เมือง	เลย	100,000	66
24. บ่ออีเล็ด อ.วังสะพุง	เลย	100,000	62
	รวม	63,826,000	30-70

ที่มา: ปรับปรุงจากข้อมูลกรมทรัพยากรธรณี วารสารทรัพยากรแร่ (พ.ศ.2546) และข้อมูลคำขอประทานบัตร กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550

หมายเหตุ NA หมายถึงไม่มีข้อมูล

บทที่ 3

ธรณีวิทยาแหล่งแร่ทองคำทับฟ้า

3.1 พื้นที่แหล่งแร่ (ทุ่งคำ, 2550)

พื้นที่กลุ่มประทานบัตรจำนวน 5 แปลง ของเหมืองแร่ทองคำทับฟ้า ได้แก่ ประทานบัตรที่ 26968/15574, 26969/15575, 26970/15576, 26971/15558 และ 26972/15559 (ทับฟ้า) ซึ่งร่วมแผนผังโครงการเดียวกัน เพื่อการทำเหมืองแร่ทองคำ แร่เงิน และแร่ทองแดง ของ บริษัท ทุ่งคำ จำกัด ตั้งอยู่ในเขตการปกครอง ของตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ตามแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1 : 50,000 ลำดับชุด L 7017 ระวัง 5343 IV ของกรมแผนที่ทหาร ระหว่างค่าพิกัดฉากสากล (U.T.M.) แนวตั้งที่ 81500 E ถึง 83765 E และแนวนอนที่ 20190 N ถึง 21310 N โดยประมาณ ในท้องที่ ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย (รูปที่ 3.1) กลุ่ม ประทานบัตรเหล่านี้มีเนื้อที่ทั้งสิ้น 1,080 ไร่ 0 งาน 56 ตารางวา โดยพื้นที่ทั้งหมดตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ สำนักงานการปฏิรูปที่ดินเพื่อเกษตรกรรม หรือ สปก. พื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติ และพื้นที่ป่าตาม มาตรา 4 (1) แห่ง พระราชบัญญัติ ป่าไม้ พ.ศ.2484 และมีรายละเอียดของพื้นที่ดังตารางที่ 3.1

พื้นที่ประทานบัตรทั้งหมด อยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติ เขตปฏิรูปที่ดิน และเขต พื้นที่ป่าตามมาตรา 4 (1) ได้รับอนุญาตให้ใช้พื้นที่จากกรมป่าไม้และสำนักงานปฏิรูปที่ดินเพื่อการ เกษตรกรรมแล้ว ยกเว้นพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติในเขตประทานบัตรที่ 26971/15558 จำนวน 148 ไร่ 0 งาน 3 ตารางวา ซึ่งกรมป่าไม้ได้กันพื้นที่ออกเพื่อรักษาสภาพป่าไว้

อาณาเขตติดต่อของกลุ่มประทานบัตรมีรายละเอียดดังนี้

ทิศเหนือ	ติดกับ เขตป่าสงวนแห่งชาติและเขตป่ามาตรา 4(1) แห่ง พรบ. ป่าไม้ 2484
ทิศตะวันออก	ติดกับ เขตปฏิรูปที่ดิน พ.ศ.2536
ทิศใต้	ติดกับ เขตป่าสงวนแห่งชาติและเขตปฏิรูปที่ดิน พ.ศ.2536
ทิศตะวันตก	ติดกับ จุดเขตป่าสงวนแห่งชาติ

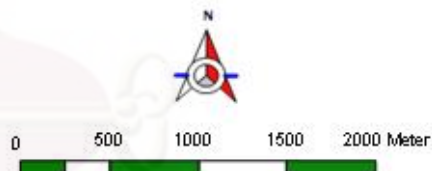
3.2 ลักษณะภูมิประเทศและตำแหน่งแหล่งแร่ (ทุ่งคำ, 2550)

พื้นที่กลุ่มประ ทานบัตร จำนวน 5 แปลง ได้แก่ประทานบัตรที่ 26968/15574 , 26969/15575, 26970/15576, 26971/15558 และ 26972/15559 ซึ่งร่วมแผนผังโครงการเดียวกัน เพื่อการทำเหมืองแร่ ทองคำ แร่เงิน และ แร่ทองแดง ของ บริษัท ทุ่งคำ จำกัด สภาภูมิประเทศ โดยทั่วไปของพื้นที่เป็นภูเขาสลับกับหุบเขา และทางน้ำสายสั้นๆ ไหลจากหุบเขาลงสู่ทางน้ำสาย หลักซึ่งไหลจากทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (รูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2)



คำอธิบาย

- 1 ประธานบัตรที่ 26968/15574 (น.ทุ่งคำ จำกัด)
- 2 ประธานบัตรที่ 26969/15575 (น.ทุ่งคำ จำกัด)
- 3 ประธานบัตรที่ 26970/15576 (น.ทุ่งคำ จำกัด)
- 4 ประธานบัตรที่ 26971/15558 (น.ทุ่งคำ จำกัด)
- 5 ประธานบัตรที่ 26972/15559 (น.ทุ่งคำ จำกัด)
- 6 ประธานบัตรใกล้เคียง ประธานบัตรที่ 26973/15560 (น.ทุ่งคำ จำกัด)
- 7 คำขอประธานบัตรใกล้เคียง (บริษัท ทุ่งคำ จำกัด)
- 8 คำขอประธานบัตรใกล้เคียง (บริษัท ทุ่งคำ จำกัด)
- แนวเขตป่าสงวนแห่งชาติ (ป่าโคกสูงเหล็ก)
- แนวเขตป่าถาวรแห่งชาติ (ป่าหมายเลข 23)



รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงจุดที่ตั้งพื้นที่กลุ่มประธานบัตรที่ 26968/15574, 26969/15575, 26970/15576, 26971/15558, 26972/15559 (ทุ่งคำ, 2550)

คัดลอกและดัดแปลงมาจากแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ลำดับชุด L7017

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของพื้นที่ประทานบัตรของโครงการ

ประทานบัตร เลขที่	พื้นที่ สปก. ไร่ - งาน - ตร.วา	พื้นที่ ป่าสงวนแห่งชาติ ไร่ - งาน - ตร.วา	พื้นที่ ป่าตามมาตรา 4 ไร่ - งาน - ตร.วา	รวม ไร่ - งาน - ตร.วา
26968/15574	-	130-3-66	-	130 - 3 - 66
26969/15575	-	135-0-96	106-1-0	241 - 1 - 96
26970/15576	32-2-56	18-3-0	169-0-14	220 - 1 - 70
26971/15558	110-0-43	148-0-3	23-1-74	281 - 2 - 20
26972/15559	205-3-4	-	-	205 - 3 - 04
รวม	348-2-3	432 - 3 - 65	298-2-88	1,080 - 0 - 56

ประกอบด้วย พื้นที่แหล่งแร่หลักที่ตั้งอยู่บนยอดเขา กุทับฟ้า ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1 ใน 5 ทางด้านทิศใต้ของพื้นที่โครงการ ซึ่งมีการวางตัวอย่างหยาบๆ จาก ทิศตะวันออก - ตะวันตก ยาวประมาณ 2 กิโลเมตร และมีความกว้างในแนวเหนือ-ใต้ ประมาณ 1 กิโลเมตร และยอดเขาสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 400 เมตร หรืออยู่สูงจาก พื้นราบราว 140 เมตร ส่วนทางด้านทิศเหนือไปจนถึงตะวันตกของพื้นที่ประทานบัตร เป็นเนินเขาเดี่ยวๆ สลับกับหุบเขา สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 300 ถึง 360 เมตร หรือประมาณ 40 ถึง 60 เมตร จากพื้นราบ

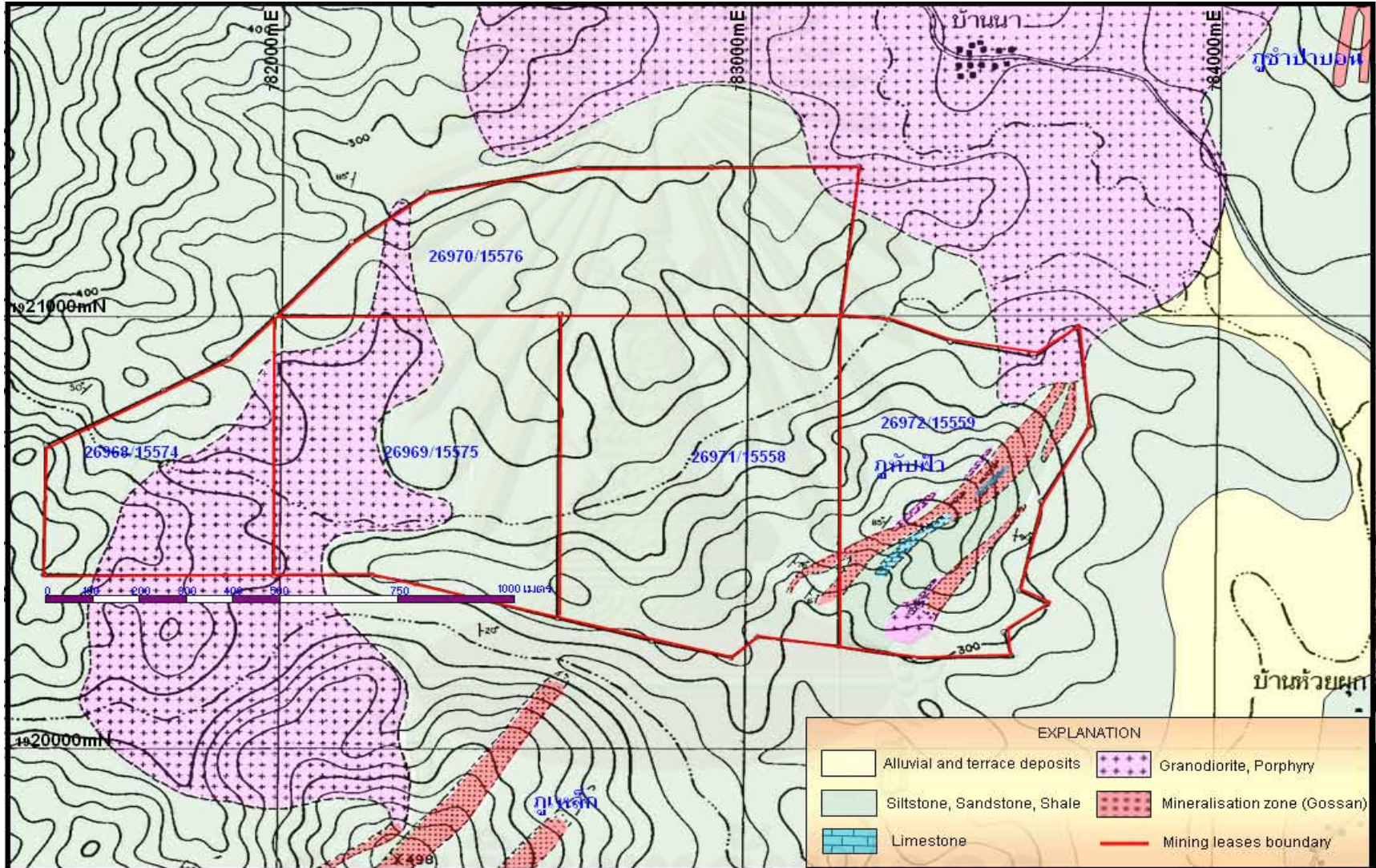
ส่วนพื้นที่นอกเขตประทานบัตร ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือต่อเนื่องไปจนถึงทิศตะวันออกเฉียงใต้เป็นที่ราบลุ่มและเป็นพื้นที่เกษตรกรรม มีลำห้วยสาธารณะ 2 สาย คือ ห้วยผูก อยู่ห่างออกไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 300 เมตร ไหลจากทิศเหนือลงมาทางทิศใต้ ลงสู่ห้วยน้ำสวยที่อยู่ห่างออกไปจากพื้นที่ประทานบัตร ทางทิศตะวันออกประมาณ 700 เมตร และมีทิศทางการไหลไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทาง ฟากทิศตะวันตกและ ตะวันตกเฉียงใต้ เป็นเทือกเขาสูงสลับซับซ้อน โดยทั่วไปมีความสูงกว่า 400 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง พื้นที่ส่วนใหญ่จะลาดต่ำไปทางทิศตะวันออกและทิศใต้

3.3 ลักษณะธรณีวิทยาโดยทั่วไปและธรณีโครงสร้าง (ทุ่งคำ, 2550)

พื้นที่ส่วนใหญ่ ครอบคลุมด้วยหิน ตะกอนของ ห มวด หินผาเตือ (Pha Dua formation) ในกลุ่มหินสระบุรี มีอายุในช่วงล่าง-ช่วงกลางยุคเพอร์เมียน (Lower-Middle Permian) หินหน่วยนี้ถูกแทรกดันโดยหินอัคนี (Igneous rock) ซึ่งมีอายุในช่วงเพอร์โม-ไทรแอสซิก (Permo-Triassic) ทำให้หินเดิมบางส่วนแปรสภาพเป็นหินแปร (Metamorphic rock) และกึ่งหินแปร (รูปที่ 3.3) ชนิดของหินหลักๆ มีดังนี้



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายแสดงลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปของพื้นที่โครงการ (มองไปทางทิศใต้)
(กลุ่มประทานบัตรที่ 26968/15574, 26969/15575, 26970/15576, 26971/15558, 26972/15559 (ภูทับฟ้า)) (ทุ่งคำ, 2550)



รูปที่ 3.3 แผนที่ธรณีวิทยาแหล่งแร่บริเวณพื้นที่ประทานบัตรที่ 26968/15574, 26969/15575, 26970/15576, 26971/15558 และ 26972/15559(ทุ่งคำ, 2550)

3.3.1 หินตะกอน (Sedimentary rock)

หินตะกอนที่พบประกอบด้วยหินทรายแป้ง (Siltstone) สีเทาถึงเทาเข้ม หินดินดาน (Shale) สีเทาถึงเทาดำ หินทราย (Sandstone) ขนาดเม็ดละเอียด สีเทาขาว สีน้ำตาลอ่อน แสดงชั้นบางจนถึงไม่แสดงชั้นชัดเจน (รูปที่ 3.4) พบครอบคลุมพื้นที่ประทานบัตรราวร้อยละ 80 และยังพบหินปูนสีเทาลักษณะเป็นเลนส์ (Limestone lens) ในบริเวณประทานบัตรที่ 26971/15558 และ 26972/15559 มีลักษณะเนื้อลึกลับ เนื่องจากเกิดการแปรสภาพมีการตกผลึกใหม่ (Re-crystallisation) โดยสาเหตุจากการดันตัวขึ้นมาของลำหินอัคนีเป็นแห่งๆ หินตะกอนบริเวณนี้มีลักษณะการวางตัวของชั้นหิน (Bedding) ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ มีมุมเท (Dip) ประมาณ 30° ถึง 90° ไปทางตะวันตกเฉียงเหนือและตะวันออกเฉียงใต้ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักมีมุมเทเกือบเป็นแนวตั้ง

3.3.2 หินอัคนี (Igneous rock)

หินอัคนีที่พบเป็นชนิดแกรโนไดออไรท์ (Granodiorite) สีเทาจางถึงเทาเข้ม ขนาดเม็ดแร่หยาบปานกลางและมีเศษหินแปลกปลอม (Xenolith) (รูปที่ 3.5) แร่ประกอบหินหลักๆ ได้แก่ แร่ควอตซ์ (Quartz) แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) แร่ฮอร์นเบลนด์ (Hornblende) และแร่ไบโอไทต์ (Biotite) หินแกรโนไดออไรต์นี้เป็นลำหินอัคนี (Stock) ที่แทรกดันเข้ามาในชั้นหินตะกอน พบอยู่บริเวณตอนกลางของประทานบัตรที่ 26968/15574 และ 26969/15575 และบริเวณทิศเหนือของพื้นที่โครงการ (รูปที่ 3.3) หินชนิดนี้มีการผุพังสูงเมื่ออยู่ใกล้ผิวดิน จะเหลือเพียงบางส่วนที่แข็งแสดงลักษณะเป็น Boulder (รูปที่ 3.5) นอกจากนี้ยังพบเกิดเป็นผนังหินสีเทาเขียว (Dike/Sill) และเนื้อหินเป็นชนิดหินเนื้อดอก (Porphyry) เป็นแร่เฟลด์สปาร์และแร่ฮอร์นเบลนด์ หินเนื้อดอกนี้จะแทรกอยู่ที่ทั้งในหินตะกอนและหินสการ์น (รูปที่ 3.6) หินอัคนีเหล่านี้สันนิษฐานว่ามีอายุในช่วง Triassic ถึง Permo-Triassic และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการสะสมตัวของแร่ทองคำเงิน และแร่ทองแดง

3.3.3 หินแปร (Metamorphic Rock)

หินแปรที่พบส่วนใหญ่เป็นหินสการ์น (Skarn) สีเขียวแกมเทา สีน้ำตาลปนแดง และสีน้ำตาล ประกอบด้วยแร่หลัก ได้แก่ แร่การ์เนต (Garnet) และแร่ไพโรซีน (Pyroxene) (รูปที่ 3.7) เนื้อละเอียดมากถึงเนื้อหยาบ บางครั้งแสดงรูปผลึกสมบูรณ (Euhedral crystal) นอกจากนี้ยังพบหินฮอร์นเฟลส์ (Hornfels) ในบริเวณที่มีหิน Porphyry เกิดแทรกตัวอยู่ในหินตะกอน เนื่องจากหินเดิมถูกแปรสภาพกลายเป็นเนื้อละเอียดแน่นและแข็งมากขึ้น หินแปรเหล่านี้มักพบเกิดแทรกสลับกับหินกอสแซนและ Massive sulphide โดยตลอดตามแนวสายแร่ในบริเวณประทานบัตรที่ 26971/15558 และ 26972/15559 (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 แสดงหินตะกอนซึ่งแสดงชั้นและไม่แสดงชั้นชัดเจน
และการวางตัวของชั้นหิน (ทุ่งคำ, 2550)



รูปที่ 3.5 แสดงหินแกรนิตไดโอรไรต์ที่พบในหลุมเจาะสำรวจ TDH 109
และหินแกรนิตไดโอรไรต์ที่ผ่านการผุพัง (ทุ่งคำ, 2550)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 แสดงหินเนื้อดอกที่แทรกตัดอยู่ในหินตะกอน (ซ้าย) และแสดงลักษณะหินเนื้อดอกสดที่พบในหลุมเจาะสำรวจ TDH 27 (ขวา) (ทุ่งคำ, 2550)



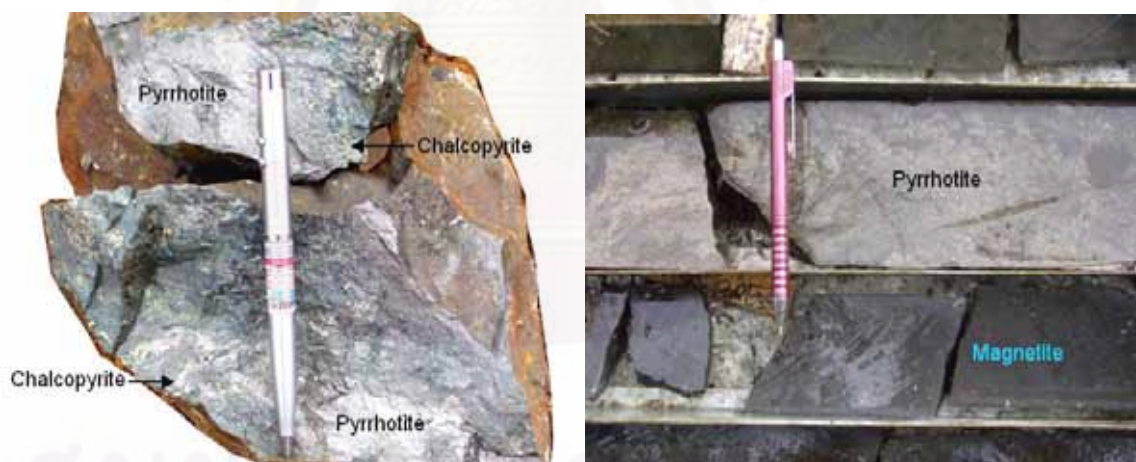
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของหินสการ์นชนิดเนื้อละเอียดในหลุมเจาะสำรวจ TDH 27 (ซ้าย) และแสดงผลึกการ์เนตที่เกิดร่วมกับไพรอกซีนในหลุมเจาะสำรวจ TDH 20 (ขวา) (ทุ่งคำ, 2550)

3.3.4 หินกอสแซน (Gossan) และ Massive sulphide

หินกอสแซน ประกอบด้วยแร่เหล็กออกไซด์ชนิดไลโมนิต (Limonite) ฮีมาไทต์ (Hematite) และมีแร่แมกนีไทต์ (Magnetite) ปนอยู่เล็กน้อย โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลปนเหลือง เหลือง น้ำตาลปนแดงไปจนถึงน้ำตาลดำ เนื้อหินมีลักษณะเนื้อพรุนไปจนถึงเนื้อแน่นละเอียด (รูปที่ 3.8) และพบเศษหินชนิดอื่น (Rock fragment) อยู่ในเนื้อหินกอสแซนด้วย หินกอสแซนนี้เกิดจากการผุพังทางเคมี (Chemical Weathering) ของแร่ชนิดซัลไฟด์ซึ่งเกิดแบบฝังประ (Disseminated) และเป็นสายแร่เล็กๆ (Vein) ไปจนถึงเป็นมวลเนื้อแน่น (Massive) (รูปที่ 3.9) อยู่ในหินเดิม



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของหินกอสแซนชนิดเนื้อพรุน (ซ้าย)
และชนิดเนื้อละเอียดแน่น (ขวา) (ทุ่งคำ, 2550)



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของหิน Massive sulphide เกิดร่วมกับ Chalcopyrite
และ Magnetite (ทุ่งคำ, 2550)

3.4 ธรณีวิทยาโครงสร้าง (ทุ่งคำ, 2550)

จังหวัดเลยเป็นพื้นที่ที่อยู่ในเขตอิทธิพลของกลุ่มรอยเลื่อนเพชรบูรณ์ (Petchabun fault zone) ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ เป็นกลุ่มของรอยเลื่อนที่ต่อกับกลุ่มรอยเลื่อนอุตรดิตถ์ที่เมืองปากลาย ประเทศลาว ผ่านเข้ามาในประเทศไทย ยด้านตะวันตกของอำเภอภูเรือ จังหวัดเลย (แสงอาทิตย์ เชื้อวิโรจน์, 2534) นอกจากนี้ หินชั้นโดยส่วนใหญ่มีการวางตัวอยู่ในแนวประมาณทิศเหนือ-ใต้ โดยที่ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างหลักๆ ที่พบ ได้แก่

1. รอยชั้นไม่ต่อเนื่อง (Unconformity) เช่น รอยชั้นไม่ต่อเนื่องระหว่างหน่วยหินถ้ำน้ำมโหฬารของยุคเพอร์เมียนกับหน่วยหินห้วยหินลาดของหินชุดโคราช รอยชั้นไม่ต่อเนื่องระหว่างหน่วยหินผาเดื่อของยุคเพอร์เมียนกับหินภูเขาไฟยุคเพอร์โมไทรแอสซิก เป็นต้น

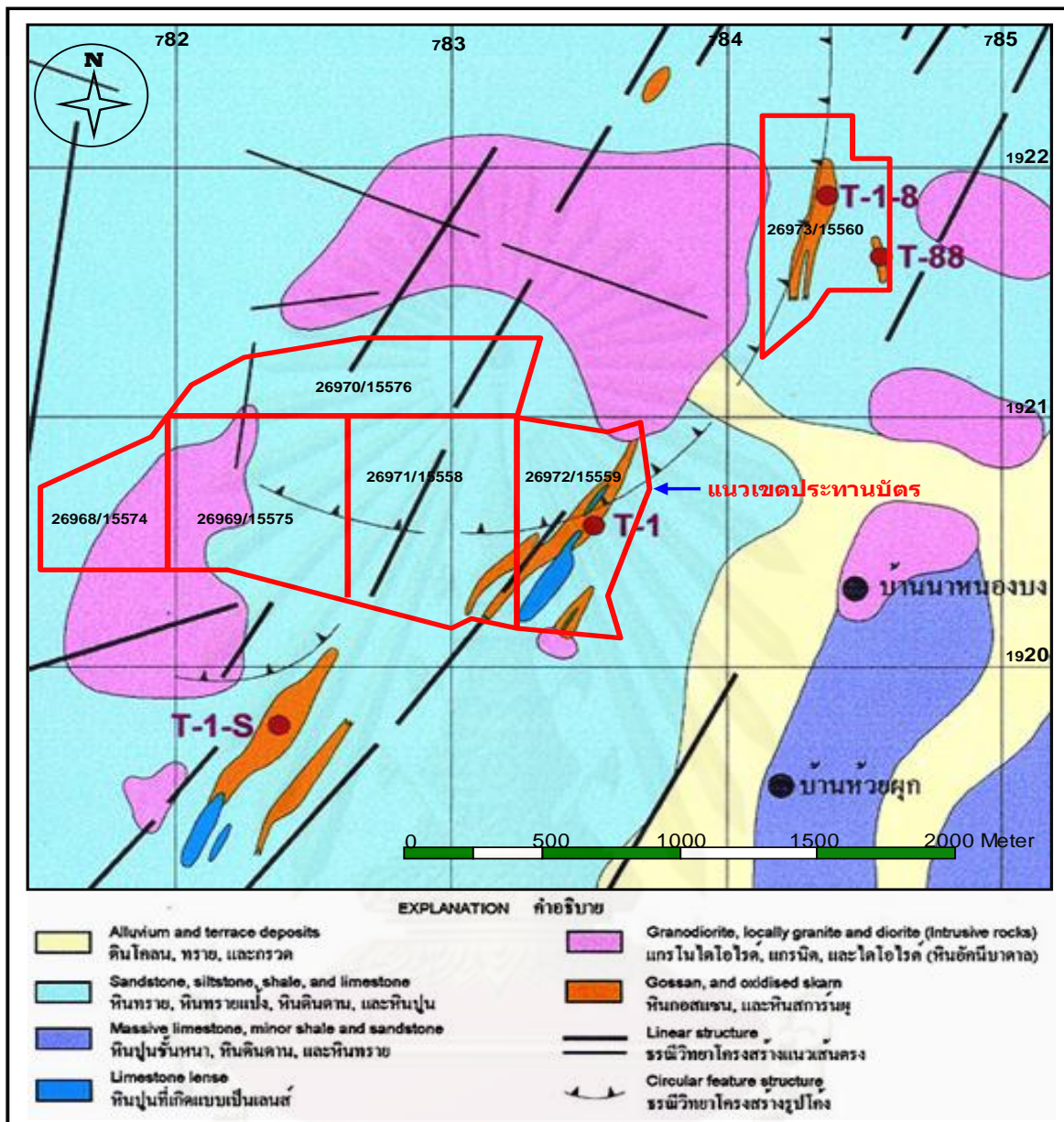
จากการแปลภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณพื้นที่อำเภอภูเรือพิเศษแปลงที่ 4 จังหวัดเลย พบลักษณะโครงสร้าง แนวเส้น (Linear structure) หลักๆ ส่วนใหญ่อยู่ในแนวทิศทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ในแนวทิศเหนือ-ใต้ และทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (รูปที่ 3.10) ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นแนวรอยเลื่อนของชั้นหินที่อาจมีความสัมพันธ์กับการเกิดแหล่งแร่ พบโครงสร้างแนวเส้นในแนวทิศเกือบตะวันออก-ตะวันตก คาดว่าเป็นแนวรอยแตก (Fracture) ของชั้นหิน และยังมีโครงสร้างแนวเส้นโค้งหรือวงกลม (Circular feature) ซึ่งคาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับการเกิดของหินภูเขาไฟและการแทรกดันของหินอัคนีบาดาล

2. ชั้นหินคดโค้ง (Fold) พบมีทั้งชั้นหินคดโค้งรูปประทุนคว่ำ (Anticline) และชั้นหินคดโค้งรูปประทุนหงาย (Syncline) ซึ่งเกิดจากความเค้นและความเครียดของเปลือกโลก รวมไปถึงการแทรกดันของหินอัคนีบาดาล (Plutonic rock)

3. รอยเลื่อน (Fault) ลักษณะของรอยเลื่อน ที่พบในบริเวณ พื้นที่จังหวัดเลย ได้แก่ รอยเลื่อนตามแนวระนาบ (Strike-slip fault) รอยเลื่อนย้อน (Reverse fault) และรอยเลื่อนปกติ (Normal fault)

3.5 ลักษณะธรณีวิทยาของแหล่งแร่ทองคำ (ทุ่งคำ, 2550)

โดยทั่วไปแล้วแหล่งแร่ต่างๆ ในจังหวัดเลย เช่น แหล่งแร่ทองแดง เหล็ก ตะกั่วและสังกะสี มักจะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ Granodiorite stock ซึ่งเป็นตัวนำน้ำแร่โลหะต่างๆ (Mineralizing fluid) ขึ้นมาและทำให้เกิดการสะสมอยู่ตามรอยแตก (Open-space filling) เกิดเป็นสายแร่ เช่น Quartz vein หรือน้ำแร่อาจเข้าไปแทนที่ (Replacement) ในหินข้างเคียงที่อยู่ติด



รูปที่ 3.10 แผนที่แสดงลักษณะธรณีวิทยาและธรณีโครงสร้าง ของพื้นที่ประทานบัตร พื้นที่ประทานบัตรใกล้เคียง และพื้นที่ใกล้เคียง ของโครงการเหมืองแร่ทองคำทับฟ้า บริษัท ฟุ่งคำ จำกัด

กับแกรโนไดโอไรต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของหินข้างเคียงนั้น แหล่งแร่ทองคำในบริเวณคำขอประทานบัตรกลุ่มนี้ก็มีลักษณะการเกิดที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ Granodiorite stock ที่ดันแทรกเข้ามาในหินชั้นพวก หินทราย (Sandstone) หินทรายแป้ง (Siltstone) หินดินดาน (Shale) และหินปูน (Limestone) ในรูปของสารละลายที่มีความร้อนจะไปทำให้หินข้างเคียงเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น หินปูนซึ่งเกิดเป็นเลนส์และเป็นชั้นบางๆ แทรกอยู่

ในหินชั้นชนิดอื่นๆ นี้จัดเป็นหินที่มีคุณสมบัติทางเคมีที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นเมื่อเกิดมี Fluid ที่ร้อนและมีความดันพอควรแทรกเข้าไปในหินปูนพวกนี้จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีแปรสภาพเป็นหินแปรชนิดสการ์น (Skarn) ซึ่งมีแร่การ์เนต (Garnet) เป็นส่วนประกอบหลัก ในขณะที่เดียวกันแร่ต่าง ๆ ที่มากับสารละลายเหล่านี้ก็จะเกิดการตกผลึกตามไปด้วย เช่น แร่เหล็กซัลไฟด์ (Iron sulphide) ชนิดแร่ไพไรไรท์ แร่ทองแดงซัลไฟด์ (Copper sulphide) ชนิดแร่คาลโคไพไรต์ และแร่บอร์ไนต์ และมีแร่ทองคำอีกเล็กน้อย นอกจากนี้ หินปูนแล้ว หินชั้นชนิดอื่น เช่น หินทรายแป้งและหินดินดาน ที่มีคุณสมบัติเป็น Calcareous เล็กน้อย ก็สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลายร้อนเหล่านี้ได้อีกด้วย ในระยะเวลาช่วงหลัก ๆ ของ Igneous activity นี้จะมี Fluid ซึ่งค่อนข้างเจือจางดันแทรกตัวตามมาอีกครั้งหนึ่ง ซึ่ง Fluid นี้จะเป็นตัวนำแร่ทองคำ แร่ทองแดง และแร่บิสมีทขึ้นมาและแทรกเข้าไปใน Skarn และแร่ซัลไฟด์ต่างๆ อีกครั้งหนึ่ง ส่วนที่ตกผลึกเป็นสายแร่จะมีพวก Quartz-Calcite vein ที่มีแร่ทองคำ แร่ไพไรต์ (Pyrite) แร่คาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite) แร่บิสมีทไนต์ (Bismuthinite) แร่โมลิบดีไนต์ (Molybdenite) และแร่อาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite) อีกเล็กน้อย ในส่วนที่เข้าไป แทนที่ใน Skarn ก็จะช่วยเพิ่มความสมบูรณ์ของทองคำขึ้น เมื่อแร่ซัลไฟด์เหล่านี้ไหลขึ้นสู่ผิวโลกก็เกิดการผุพังและการ Oxidization เปลี่ยนสภาพไปเป็นแร่ออกไซด์ (Oxide) ออกไซด์เหล่านี้เรียกว่าออกสแซน ซึ่งเมื่อไหลอยู่บนผิวโลกนานเข้าก็จะเกิดการผุพังลงมาสะสมตัวในชั้นดินอันเป็นผลให้แร่ทองคำบางส่วนหลุดมาสะสมกันอยู่ในชั้นดินตามไปด้วย

3.5.1 การกำเนิดของแหล่งแร่ (Ore Genesis)

การกำเนิดของแหล่งบริเวณพื้นที่ประทานบัตร พบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแทรกดันของลำหินอัคนีและหินอัคนีแทรกซัน จากการศึกษารูปว่า กำเนิดของแหล่งแร่บริเวณนี้เกิดขึ้นในช่วง 2 ระยะเวลา (Tongchai Rodmanee, 2000) กล่าวคือ

ระยะที่ 1: การแทรกดันตัวขึ้นมาของลำหินอัคนีชนิดแกรโนไดโอไรต์ ทำให้หินข้างเคียงเกิดการแปรสภาพโดยเฉพาะหินปูน น้ำร้อน (Hydrothermal Solution) ที่ขึ้นมากับหินแกรโนไดโอไรต์จะทำปฏิกิริยากับหินปูนและหินข้างเคียง ทำให้หินปูนบางส่วนเกิดการตกผลึกใหม่และแปรสภาพเป็นหินอ่อน (Marble) และหิน Calc-silicate (รูปที่ 3.11 A) บางส่วนเกิดการแปรสภาพโดยการแทนที่ (Metasomatism) และแปรสภาพเป็นหินสการ์น (Skarn) และหินฮอร์นเฟลส์ (Hornfels)

ระยะที่ 2: หลังจากหิน เดิมได้แปรสภาพเป็นหินสการ์นแล้ว มีการแทรกดันตัวขึ้นมาของหินอัคนีแทรกซันชนิด Porphyry และ Microdiorite น้ำร้อนที่ขึ้นมากับหินอัคนีแทรกซันได้ทำให้หินสการ์นเกิดการเปลี่ยนสภาพแบบ Retrograde alteration แร่ซัลไฟด์ชนิดต่าง ๆ รวมถึง

แร่ทองคำที่ปนอยู่ในน้ำร้อนได้ตก ผลึกสะสมตัวแทรกอยู่ในหิน Garnet-pyroxene skarn และ บางส่วนแปรสภาพเป็นหิน Pyrrhotite skarn (หรือ Massive sulphide) (รูปที่ 3.11 B) และพบซิลิกาสะสมตัวตามรอยแตกของหินในรูปของ Quartz vein

ชนิดของหินบริเวณแนวสายแร่ในพื้นที่ประทานบัตรที่ 26971/15558 และ 26972/15559 ส่วนใหญ่เป็นหินแปรชนิดสการ์น มีแร่ประกอบหินหลัก ได้แก่ แร่การ์เนต แร่ไพรอกซีน และแร่พิไรโรไทต์ แร่ประกอบหินที่พบเป็นส่วนน้อย เช่น แร่ควอร์ซ แร่แคลไซต์ แร่เอมพิโบล แร่คลอไรต์ แร่เอพิโดต แร่เฟลด์สปาร์ แร่แพลจิโอเคลส เป็นต้น แร่ซัลไฟด์ชนิดอื่นที่พบเกิดร่วมในหินสการ์น ได้แก่ แร่ไพไรต์ แร่คาลโคไพไรต์ แร่บิสมีต แร่บิสมีต-เทลลูไรด์ และแร่ที่พบเป็นส่วนน้อย เช่น แร่อาร์เซนไพไรต์และแร่แมกนีไทต์ เป็นต้น

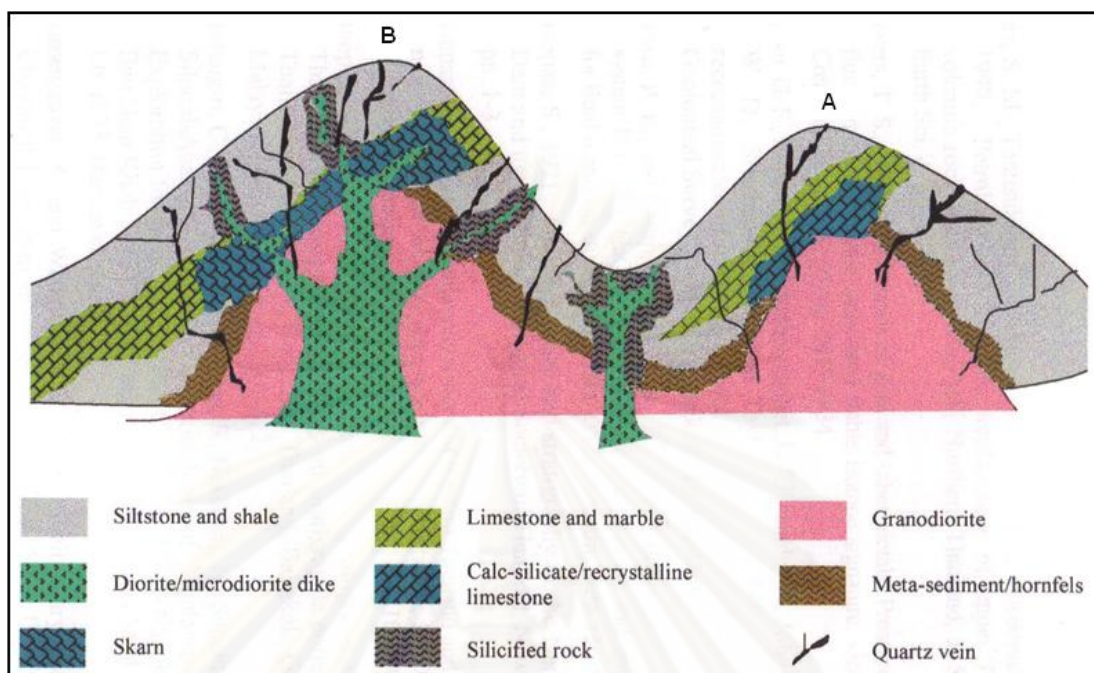
ในบริเวณประทานบัตรที่ 26968/15574, 26969/15575 และ 26970/15576 เป็นหินตะกอนชนิดหินทรายแป้ง หินทราย และหินดินดานที่ถูกแทรกดันด้วยลำหินอัคนีชนิดแกรโนไดโอไรต์และ Porphyry โดยไม่พบการแปรสภาพเป็นหินสการ์นแต่บางส่วนมีน้ำแร่ซิลิกาสะสมในเนื้อหินข้างเคียงทำให้หินเดิมมีเนื้อแข็งขึ้น (Silicification) พบการเกิดของแหล่งแร่ส่วนใหญ่สัมพันธ์กับการของสายแร่ควอร์ซ (Quartz vein) ที่แทรกตัดอยู่ในหินตะกอน (รูปที่ 3.12) และหินแกรโนไดโอไรต์ และการเกิดของหิน Scorodite ขึ้นบางๆ ตามแนวรอยสัมผัส (Contact zone) ระหว่างหินแกรโนไดโอไรต์กับหินตะกอน (ทุ่งคำ, 2550)

3.5.2 ชนิดของแร่ (Ore type)

ชนิดของแร่ แบ่งตามคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้ (ทุ่งคำ, 2550)

1. แร่ออกไซด์ (Oxide ore)

แร่ออกไซด์เป็นแร่ที่ผ่านกระบวนการผุพังตามธรรมชาติ (Weathering) ของหินเดิม ในบริเวณพื้นที่ประทานบัตรที่ 26971/15558 และ 26972/15559 ลักษณะของแร่ออกไซด์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยหินกอสแซน (Gossan) ซึ่งเกิดจากการผุพังทางเคมีของแร่ซัลไฟด์ หินสการ์นผุ (Oxidised skarn) และหินตะกอนที่มีแร่เหล็กออกไซด์ปน (Gossanous sediment) โดยพบแร่ออกไซด์เกิดอยู่บริเวณก้นบึงน้ำ 2 แนว วางตัวขนานกันในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้ ความยาวประมาณ 700 เมตรและ 300 เมตร มีความกว้างตั้งแต่ 10 ถึง 70 เมตร จากการเจาะสำรวจพบว่า ชั้นแร่ออกไซด์มีความหนาตั้งแต่ 5 เมตร ถึง 50 เมตร มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 35 เมตร เนื่องจากการผุพังและการพัดพาตามแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้เกิดการสะสมของชั้นแร่บริเวณใกล้ผิวดินตามที่ลาดเขาติดกับแนวสายแร่หลัก เป็นลักษณะคล้ายดอกเห็ด (Mushroom shape)



รูปที่ 3.11 ภาพจำลองลักษณะการกำเนิดของแหล่งแร่ภูทับฟ้าระยะที่ 1 (A) และที่ 2 (B)
(ทุ่งคำ, 2550)



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของหิน Pyrrhotite skarn (ซ้าย) และสายแร่ควอตซ์ (Quartz vein) ที่แทรกตัดอยู่ในหินทรายแป้ง (ขวา) (ทุ่งคำ, 2550)

ในบริเวณประทานบัตรที่ 26968/15574 , 26969/15575 และ 26970/15576 พบว่าลักษณะของแร่ออกไซด์เป็นชนิดแหล่งแร่พัดพาเชิงเขา (Eluvial deposit) ซึ่งเกิดจากการผุพังและสะสมตัวของหินเดิมตามบริเวณที่ลาดเชิงเขา ส่วนใหญ่ประกอบด้วยดินเหนียวปนเศษหิน และชั้นกรวดของหินควอตซ์ หินตะกอน และหินกอสแซนปนดิน (รูปที่ 3.13) จากการขุดร่องสำรวจ (Trenching) และขุดหลุมสำรวจ (Pitting) พบชั้นแร่ตั้งแต่ผิวดินลงไป ความหนาของชั้นแร่อยู่ในช่วง 0.9 ถึง 3.5 เมตร



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะแร่ออกไซด์ (หินกอสแซน) บริเวณประทานบัตรที่ 26972/15559 (ซ้าย) และชั้นเศษหินควอตซ์บริเวณประทานบัตรที่ 26970/15576 (ขวา) (ทุ่งคำ, 2550)

2. แร่ซัลไฟด์ (Sulphide ore)

แร่ซัลไฟด์แยกจากแร่ออกไซด์ตามการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติ ซึ่งทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเปลี่ยนไป กล่าวคือ แร่ซัลไฟด์ชนิดต่างๆ ใน Sulphide ore ยังไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจึงไม่มีส่วนประกอบของแร่ชนิดออกไซด์อยู่ พบแร่ซัลไฟด์เฉพาะในบริเวณประทานบัตรที่ 26971/15558 และ 26972/15559 ซึ่งประกอบด้วยหิน Garnet-pyroxene skarn, Pyrrhotite skarn (หรือ Massive sulphide) และหิน Silicified sediment ตามแนวขอบสายแร่ จากการเจาะสำรวจพบแร่ซัลไฟด์ตั้งแต่ความลึก 5 เมตรใต้ผิวดินลงไปถึงระดับความลึกมากกว่า 250 เมตร แต่โดยเฉลี่ยระดับความลึกของชั้นแร่ซัลไฟด์ประมาณ 30 เมตร แร่ประกอบหินของแร่ซัลไฟด์หลักๆ ได้แก่ แร่การ์เนต แร่ไพรอกซีน และแร่ไพร์โรไทต์ แร่ที่พบเกิดร่วมและมีเป็นส่วนน้อย เช่น แร่ควออร์ซ แร่แคลไซต์ แร่ไพไรต์ แร่คาลโคไพไรต์ แร่อาร์เซนไพไรต์ แร่แมกนีไทต์ แร่แอมฟิโบล แร่คลอไรต์ แร่เอพิโดต แร่เฟลด์สปาร์ แร่แพลจีโอเคลส เป็นต้น แร่ซัลไฟด์ชนิดอื่นที่พบ

เกิดรวมในหินสการ์น ได้แก่ แร่ไฟโรต์ แร่คาลโคไฟโรต์ แร่บิสมีต แร่บิสมีต-เทลลูไรด์ และแร่ที่พบเป็นส่วนน้อยเช่น แร่อาร์เซนไพโรต์และแร่แมกนีไทต์ เป็นต้น (รูปที่ 3.14)

3. แร่ทรานซิชัน (Transition ore)

แร่ทรานซิชันเป็นชั้นแร่ที่อยู่ระหว่างชั้นแร่ออกไซด์และชั้นแร่ซัลไฟด์ กล่าวคือ เป็นชั้นแร่ซัลไฟด์ที่มีการผุพังทางเคมีและทางกายภาพ (Oxidization and Weathering) ยังไม่สมบูรณ์ จึงมีทั้งแร่ออกไซด์และแร่ซัลไฟด์ปะปนกันอยู่ ชั้นแร่ทรานซิชันนี้ส่วนใหญ่วางตัวเกือบขนานกับสภาพภูมิประเทศ มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 5 เมตรและพบที่ความลึกตั้งแต่ 5 เมตรถึง 50 เมตร (รูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะ Sulphide ore (ซ้าย) และ Transition ore (ขวา)
บริเวณประทานบัตรที่ 26971/15558 และ 26972/15559 (ทุ่งคำ, 2550)

บทที่ 4

การศึกษาลักษณะทางแร่วิทยา

การศึกษา ลักษณะทางแร่วิทยา ของแร่ทองคำ นั้น เป็นข้อมูลเบื้องต้น ที่สำคัญ ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการศึกษาหาวิธีการ ในการเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ ด้วยวิธีการแต่งแร่ต่างๆ ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด เพราะแหล่งแร่แต่ละ แหล่งจะมีคุณสมบัติและลักษณะของแร่ วิทยาที่แตกต่างกัน การตรวจดูว่าการรวมตัวของแร่ หิน และมลทินต่างๆ ว่าอยู่ในลักษณะใดนั้น เช่น การรวมกันอยู่เป็นก้อนเดียวกัน เป็นแร่คาบ (Locked Particle) หรือว่าหลุดออกจากกันเป็นเม็ดอิสระ (Free Particle) ขนาดของทองคำและทองแดง แร่ หิน และมลทินที่ปนอยู่มีขนาดเป็นอย่างไร ก็จะช่วยให้การพิจารณาได้ง่ายขึ้นว่าควรจะต้องย่อย หรือบดให้มีขนาดเท่าใดจึงจะทำให้ทองคำและทองแดง แร่ หิน และมลทินต่างๆ หลุดออกจากกัน ได้มากที่สุด จากนั้นการพิจารณาถึง ลักษณะเฉพาะของทองคำและทองแดง แร่ หิน และมลทิน ต่างๆ ก็จะช่วยให้เลือกวิธีการแต่งแร่หรือแยกแร่ที่เหมาะสม ให้สะอาดตามความต้องการได้

4.1 ตัวอย่างแร่ที่นำมาวิจัย

ตัวอย่างแร่ที่ทำการวิจัยนำมาจากโรงงานแต่งแร่ทองคำ แหล่ง แร่ภูทับฟ้า ของบริษัท ฟุงคำ จำกัด ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย สินแร่กลุ่มซัลไฟด์ที่ได้นำมา ศึกษา มีปริมาณความสมบูรณ์ของโลหะทองคำและทองแดงเฉลี่ยตั้งแต่ 1.5 – 5 กรัมต่อตัน และ 0.5 – 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในการศึกษาทางแร่วิทยานั้น แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มคือ ตัวอย่างแร่ ก้อน (Lump) จากหน้าเหมือง (รูปที่ 4.1) หรือจาก ลานกองสินแร่ (ROM Pad) (รูปที่ 4.2) และ ตัวอย่าง แร่ที่ได้จากการทดลองลอยแร่ทองคำ ทองแดง และเหล็ก เพิ่มปริมาณโลหะ ทองคำและทองแดงให้มีปริมาณมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อเครื่องมือวิเคราะห์ในการศึกษาทางแร่ วิทยานั้นจะสามารถตรวจวัดได้

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เริ่มต้นจากการเก็บตัวอย่างแร่ประเภทซัลไฟด์ จากหน้าเหมือง และลานกองสินแร่ เพื่อคัดเลือกตัวอย่างมาศึกษาแร่วิทยา โดย ทำการศึกษา ตัวอย่างซัคมัน ตัวอย่างแร่ซัลไฟด์จากหน้าเหมืองและจากลานกองสินแร่ (รูปที่ 4.3) การลดขนาด เพื่อเตรียมตัวอย่างแร่ให้ได้ขนาดความโต ไม่เกิน 1 นิ้ว (รูปที่ 4.4) นั้น จะไม่ใช่เครื่องย่อยใดๆ เลย แต่จะใช้แรงจากค้อนแทน เนื่องจากต้องการคัดเลือก ตัวอย่างที่คาดว่าจะมีทองคำและทองแดง ปะปนอยู่ จำนวน 2 ตัวอย่าง (ตัวอย่างหมายเลข TKL 2-03 และ TKL 2-04) ส่วนตัวอย่างที่เหลือ จะนำไปย่อยด้วย Jaw Crusher แล้วบดด้วย Roller Mill ให้มีขนาดเล็กกว่า 3 มิลลิเมตร อีก จำนวน 2 ตัวอย่าง (ตัวอย่างหมายเลข TKL2-01 และ TKL2-02) และบดละเอียดด้วย Rod Mill



รูปที่ 4.1 หน้าเหมืองบริเวณที่เก็บตัวอย่างแร่ก่อน (24 พฤศจิกายน 2551)



รูปที่ 4.2 ลานกองสินแร่ (ROM Pad) จากหน้าเหมืองก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่
(24 พฤศจิกายน 2551)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 สิ้นแร่ที่คัดเลือกเพื่อทำตัวอย่างซัดมันและทดลองลอยแร่ (18 มกราคม 2552)



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างแร่หมายเลข TKL2-03 และ TKL 2-04 ที่นำมาทำตัวอย่างซัดมัน
(19 มกราคม 2552)

ให้ได้ขนาด 53 ไมครอน หรือ 270 เมช เพื่อนำไปทำการทดลองลอยแร่ ซึ่งจะได้กล่าวถึง รายละเอียดต่อไป ในบทที่ 5 อีกจำนวน 7 ตัวอย่าง (ตัวอย่างหมายเลข TKL 1-01 ถึง TKL 1-07) รวมตัวอย่างที่ทำการศึกษาด้านโลหวิทยาทั้งสิ้น 11 ตัวอย่าง ตัวอย่างจากการทดลองลอยแร่ ทั้ง 7 ตัวอย่าง เรียงตามลำดับขั้นของการลอยแร่ จะมีผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะทองคำ ทองแดง เหล็ก ซัลเฟอร์ และเงิน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณโลหะทองคำ ทองแดง เหล็ก ซัลเฟอร์ และเงิน ของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองลอยแร่ (TKL1-01 ถึง TKL1-07)

Sample ID	Au (ppm)	Cu (%)	Fe (%)	S (%)	Ag (ppm)
1. Feed TKL1-01	10.79	0.74	33.37	16.82	2.77
2. Tailing TKL1-07	0.44	0.01	9.88	2.31	2.84
3. Copper Recleaner Conc TKL1-04	55.03	5.51	40.44	28.61	8.22
4. Copper Recleaner Tail TKL1-05	2.03	0.09	37.71	20.71	4.18
5. Copper Cleaner Tail TKL1-06	1.31	0.05	32.47	16.85	2.79
6. Iron Cleaner Conc TKL1-02	2.44	0.07	55.71	35.82	4.14
7. Iron Cleaner Tail TKL1-03	1.45	0.04	29.96	13.14	5.75

ตัวอย่างแร่ทั้ง 11 ตัวอย่างจะถูกนำมาเตรียมตัวอย่างขัดมัน (Polished section) (รูปที่ 4.5) เพื่อนำไปศึกษาด้วยตัวอย่างขัดมันภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ศึกษาจำแนกชนิดของแร่ โดยวิธีรังสีเอกซ์เปลวเบน ศึกษาลักษณะ ชนิด และส่วนประกอบทางเคมีของแร่ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ โดยวิธี Electron Probe Micro-Analysis (EPMA)

- ตัวอย่างหมายเลข TKL2-03 และ 2-04 เป็นตัวอย่างแร่ก้อนใหญ่ที่ได้จากการระเบิดจากหน้าเหมือง แล้วนำมาลดขนาดด้วยค้อน ให้มีขนาดโตไม่เกิน 1 นิ้ว โดยมีการคัดเลือกหาค้อนที่มีลักษณะของหน้าผลึกเป็นแร่คาลโคไพไรต์หรือแร่ไพไรไรต์ได้ตัวอย่างมา 2 ตัวอย่าง

- ตัวอย่างหมายเลข TKL2-01 และ TKL2-02 เป็นตัวอย่างแร่ที่เหลือจากการเตรียมตัวอย่างหมายเลข TKL2-03 และ TKL2-04 นำมาบดด้วย Roller mill ให้มีขนาดโตไม่เกิน 3 มิลลิเมตร จำนวน 2 ตัวอย่าง

- ตัวอย่างหมายเลข TKL1-01 ถึง TKL1-07 เป็นตัวอย่างจากการทดลองลอยแร่ในห้องปฏิบัติการ โดยนำตัวอย่างหลังจากการบดด้วย Roller mill มาบดละเอียดด้วย Rod mill ให้มีขนาดโตไม่เกิน 53 ไมครอน ก่อนทำการทดลองลอยแร่



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างขัดมัน (Polished section) ที่จะทำการศึกษา (18 มิถุนายน 2552)

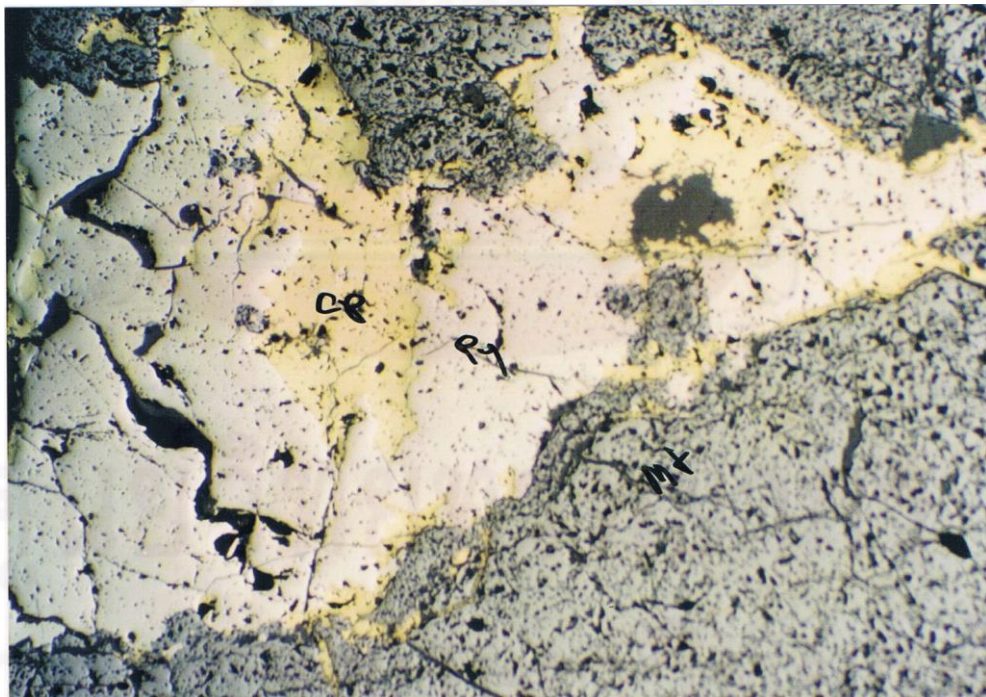
4.2 การศึกษาตัวอย่างขัดมันภายใต้กล้องจุลทรรศน์

การศึกษาตัวอย่างแร่ ขัดมันภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BH2-UMA (รูปที่ 4.6) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิด ลักษณะ ของแร่ เพื่อหาความแตกต่าง ทองคำ ทองแดง และเหล็ก โดยอาศัยลักษณะทางฟิสิกส์ และทางแสงที่สามารถมองเห็นได้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา คุณสมบัติของแร่โดยทั่วไปที่ใช้ในการบ่งบอกชนิดแร่ แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และผลการศึกษา ของ Surasak Yamned, 1999 ที่ได้ศึกษาเรื่อง Ore Mineragraphy ของแหล่งแร่ทุ่งคำ อำเภอเมือง จังหวัดเลย ซึ่งได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.7-4.17 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ สำหรับตัวอย่างขัดมันหมายเลข TKL1-01 ถึง TKL1-06 และ TKL2-03 แล้วพบว่า สามารถมองเห็นรูปร่าง ลักษณะของแร่ไฟไรต์ ไพร์โรไทต์ แร่คาลโคไพไรต์ และเทนแนนไทต์ ได้ดังรูปที่ 4.18 – 4.25 ซึ่งไม่พบทองคำอิสระ (Free gold) ภายใต้ตัวอย่างขัดมัน

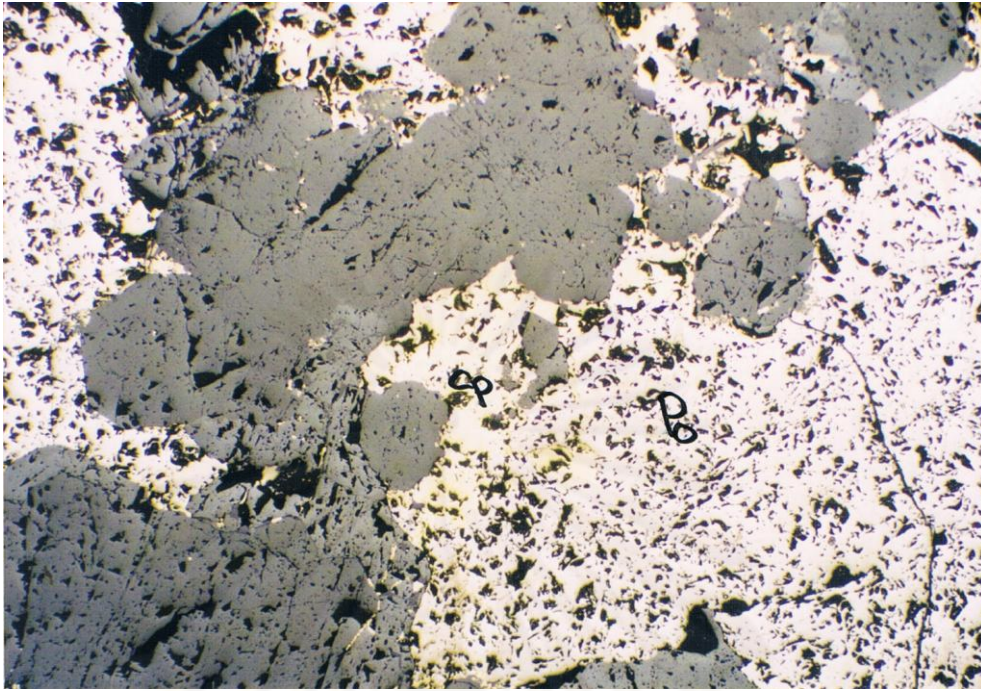
อย่างไรก็ตามผลการศึกษาของ Surasak Yamned, 1999 ก็ยังไม่พบทองคำ ภายใต้ตัวอย่างขัดมันที่ทำการศึกษา เช่นเดียวกัน



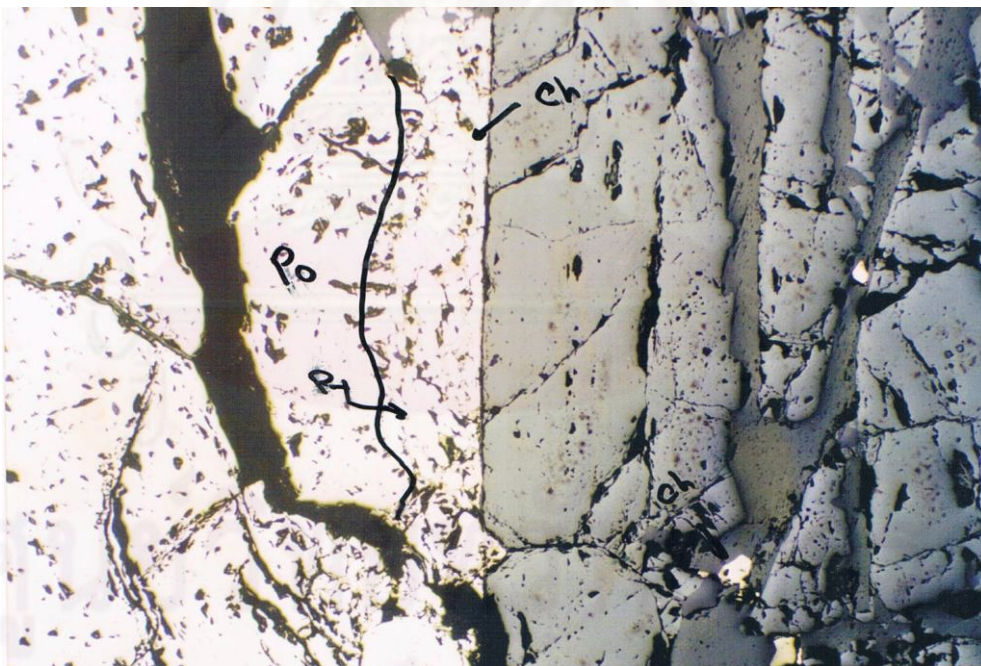
รูปที่ 4.6 กล้องจุลทรรศน์แบบสองตาซีห้อ OLYMPUS รุ่น BH2-UMA ที่ใช้ในการศึกษา



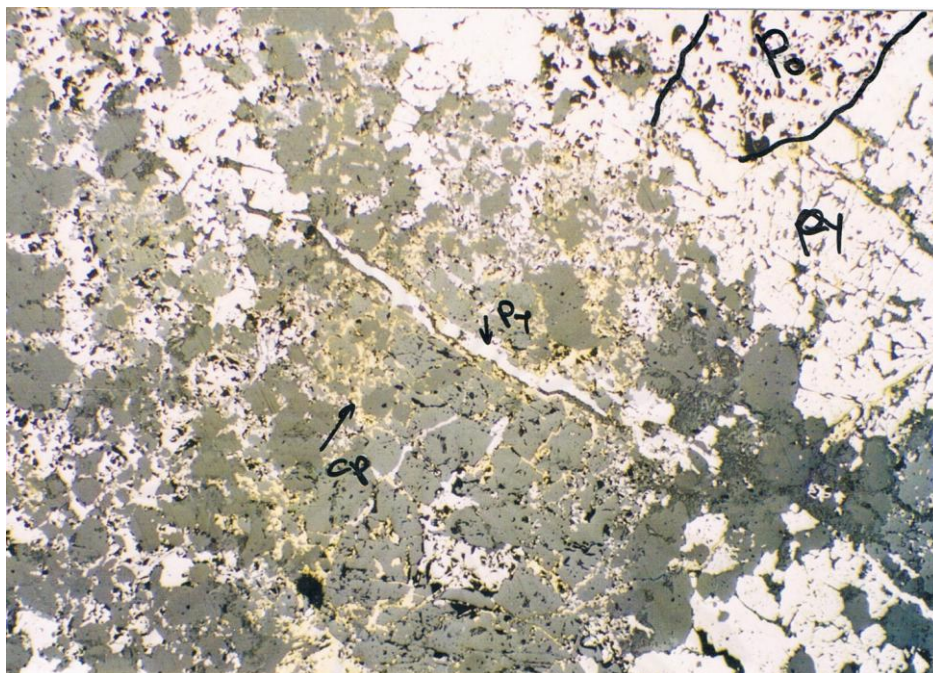
รูปที่ 4.7 Photomicrography of magnetite (Mt) and pyrite (Py) with replacing chalcopyrite (Cp). Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



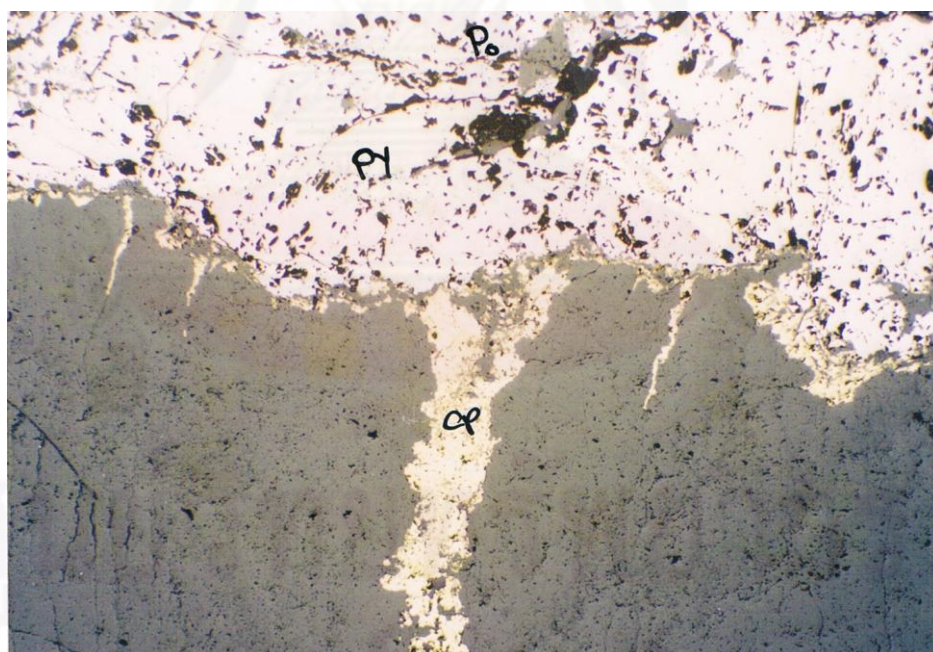
รูปที่ 4.8 Photomicrography of pyrrhotite (Po) replacing chalcopyrite (Cp).
Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



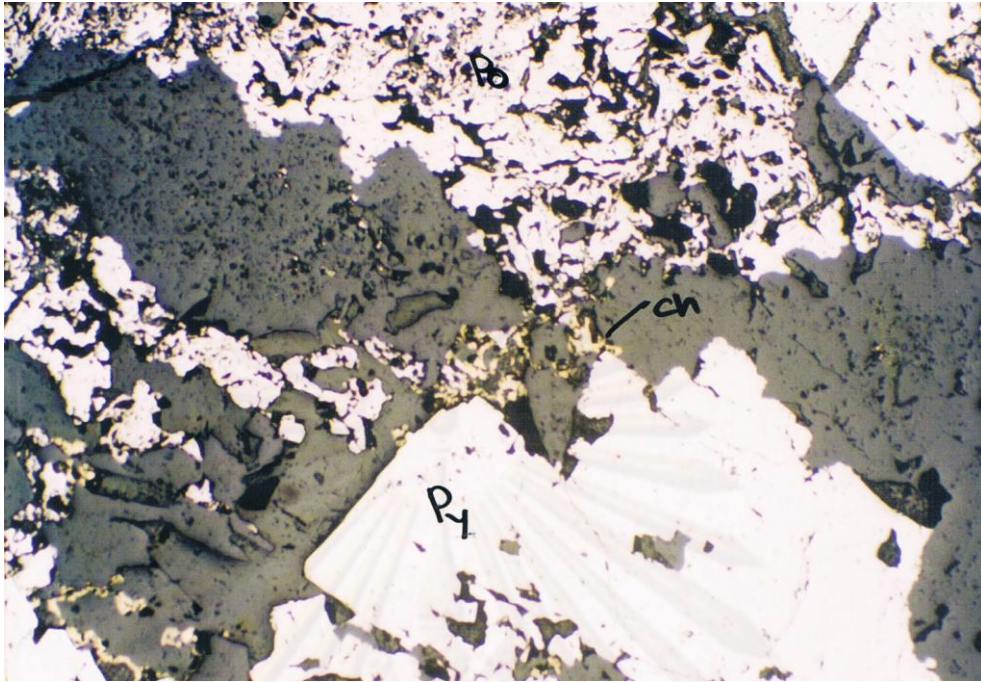
รูปที่ 4.9 Photomicrography of pyrrhotite (Po), anhedral to subhedral pyrite (Po) and
anhedral to subhedral chalcopyrite (Ch) in contact with skarn mineral (right).
Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



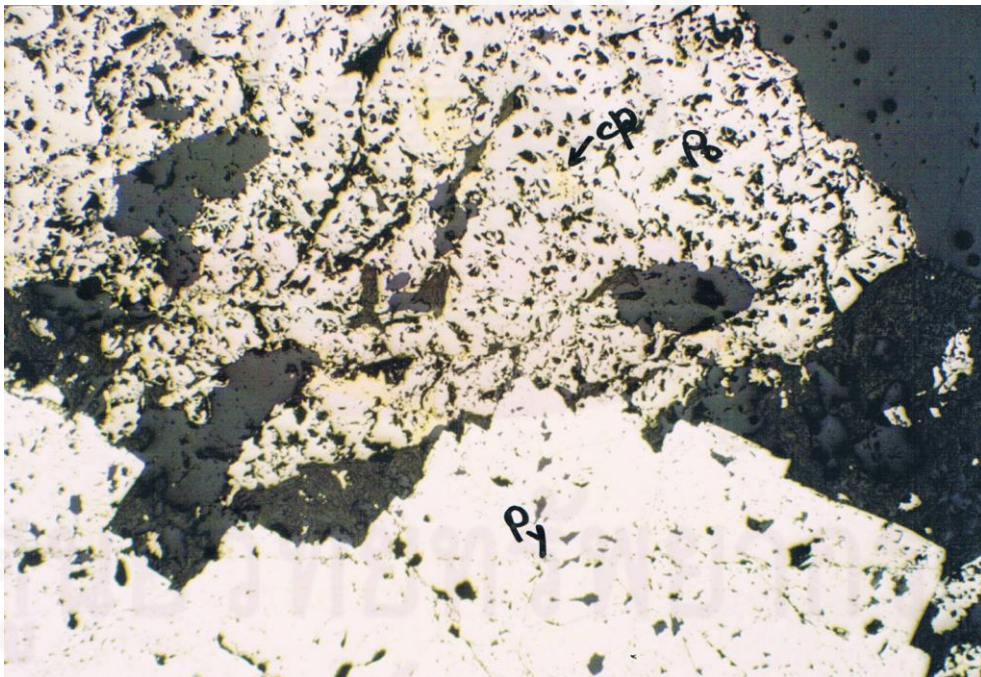
รูปที่ 4.10 Photomicrography of anhedral pyrrhotite (Po), pyrite (Py) and chalcopyrite (Cp) sealed in the fracture and microfracture
Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



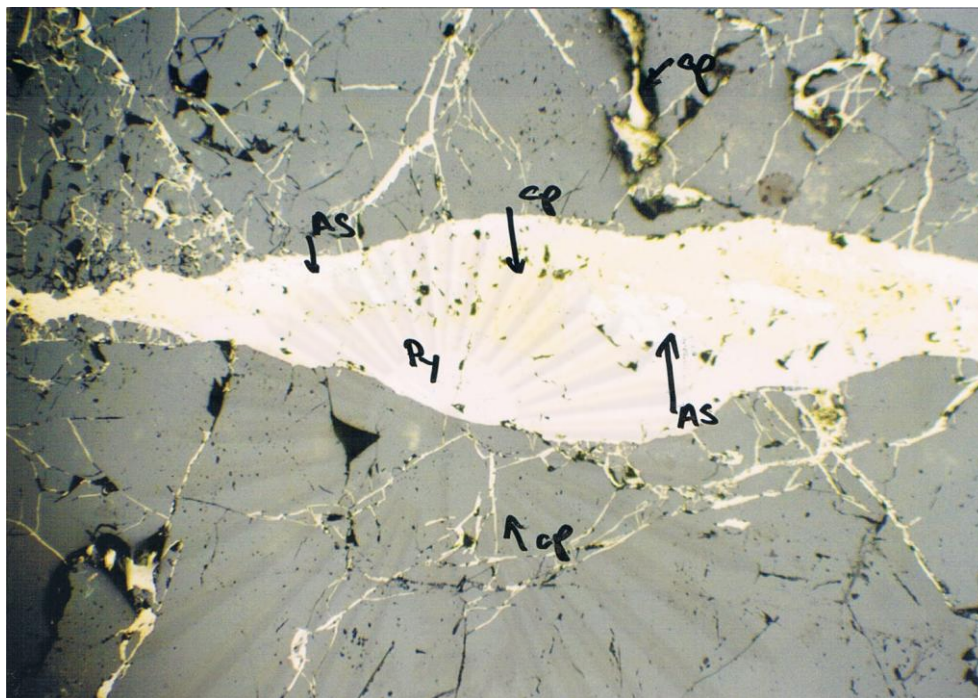
รูปที่ 4.11 Photomicrography of veinlet of anhedral chalcopyrite (Cp) aggregates cutting along microfracture of chlorite and epidote. Note that pyrite (Py) and pyrrhotite (Po) are also associated. Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



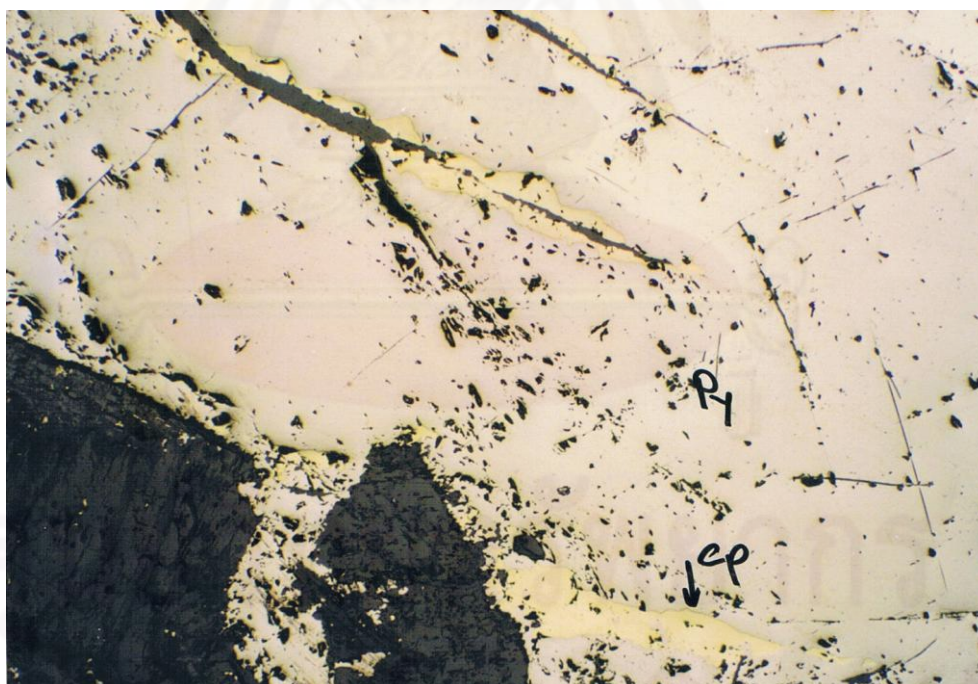
รูปที่ 4.12 Photomicrography of subhedral cubic habits of pyrite (Py), anhedral pyrrhotite (Po) and chalcopyrite (Cp) in ore skarn. Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



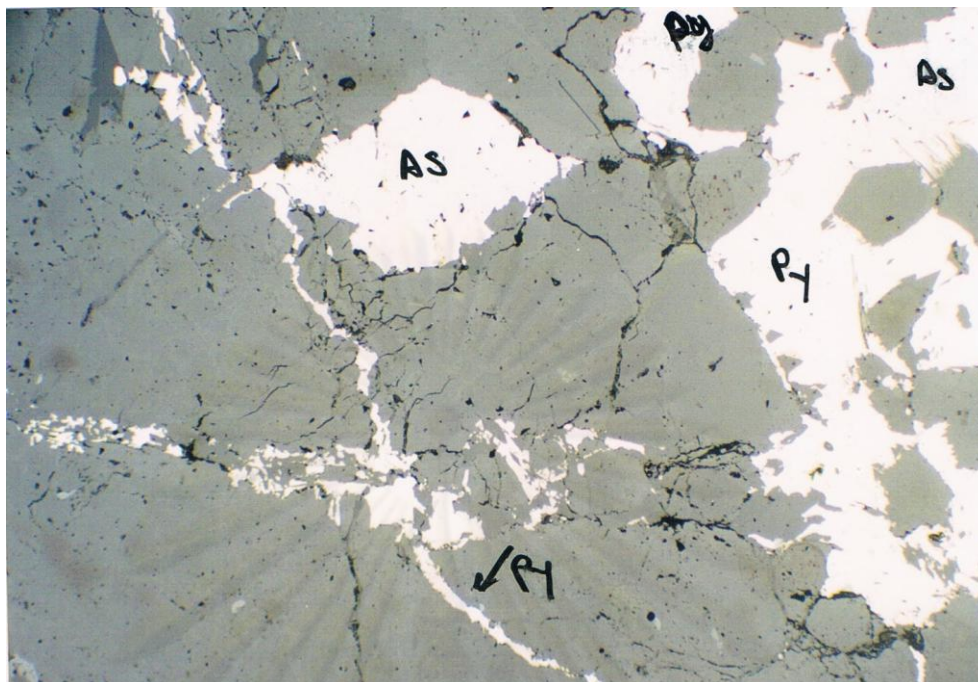
รูปที่ 4.13 Photomicrography of subhedral crystals of pyrite (Py) and pyrrhotite (Po). Note that chalcopyrite (Cp) included in pyrrhotite. Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



รูปที่ 4.14 Photomicrography of veinlet of pyrite (Py) and associated arsenopyrite (As) and chalcopyrite (Cp) Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)

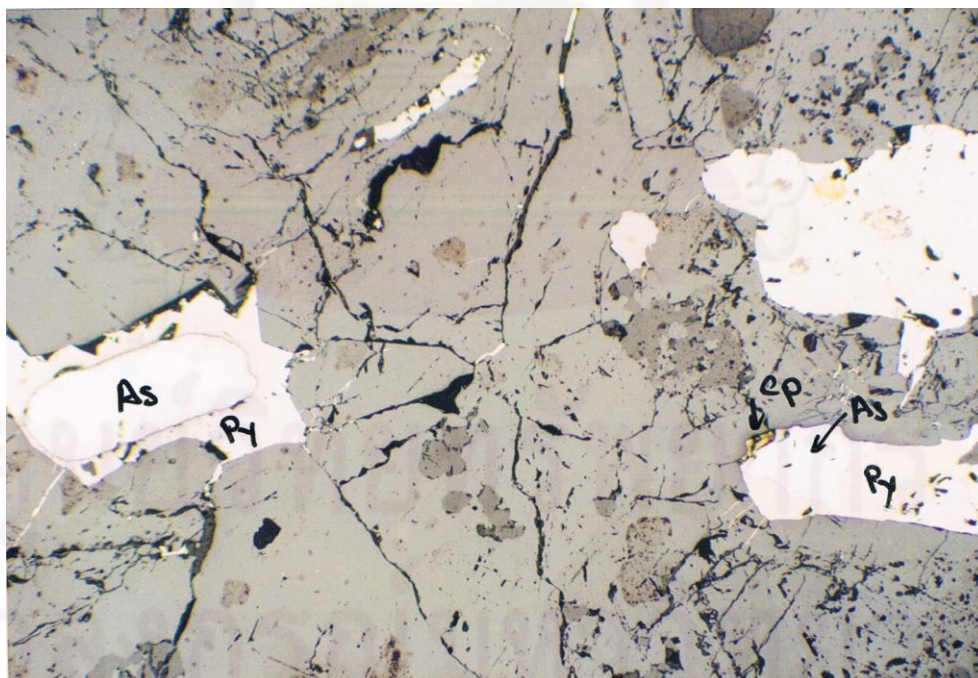


รูปที่ 4.15 Photomicrography of pyrite (Py) replaced by chalcopyrite (Cp). Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)

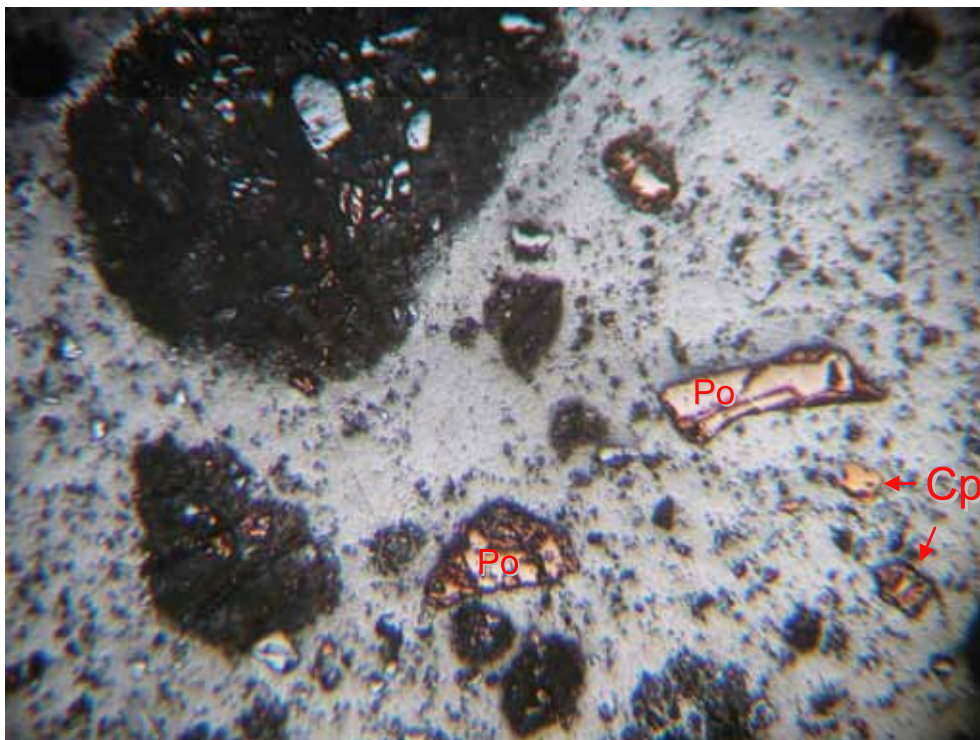


รูปที่ 4.16 Photomicrography of massive pyrrhotite aggregate associated rhombic arsenopyrite (As) cross cutting veinlet pyrite (Py).

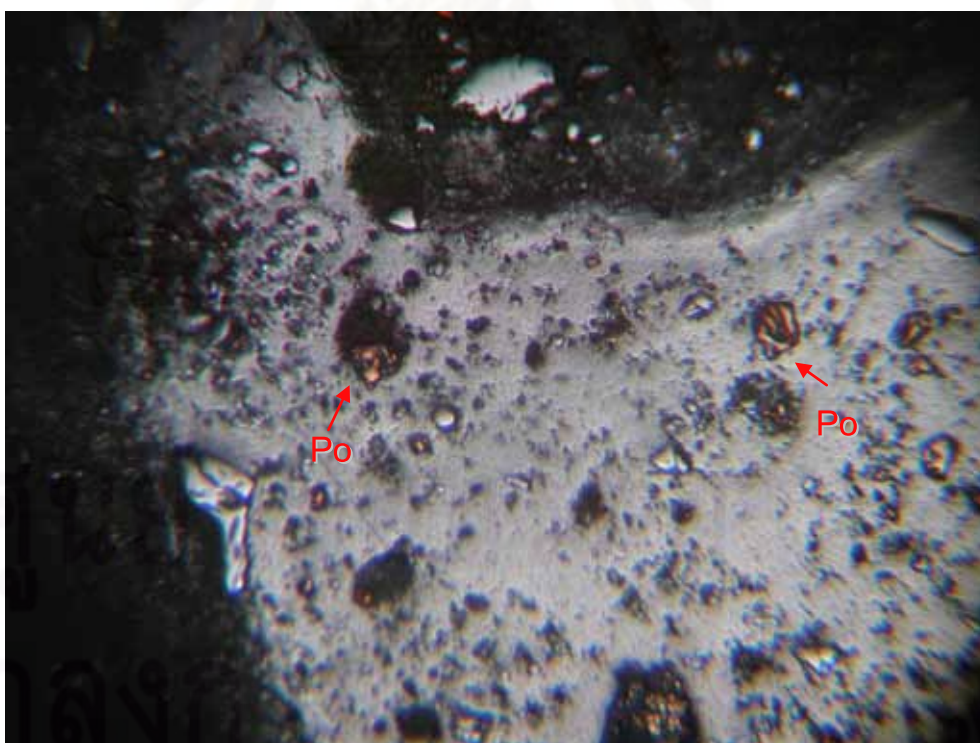
Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



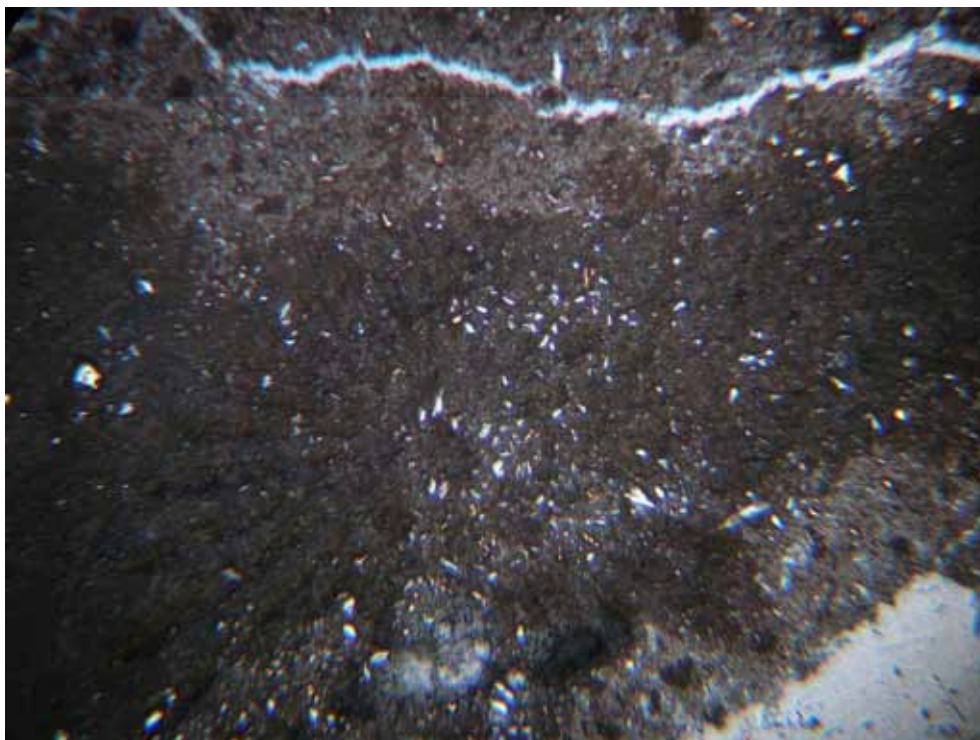
รูปที่ 4.17 Photomicrography of magnetite - intuded arsenopyrite (As) replaced by pyrite (Py). Reflected light 40X (Surasak Yamned, 1999)



รูปที่ 4.18 พิริโรไทต์ (Po) และคาลโคไซไฟไรต์ (Cp) ในตัวอย่างหมายเลข TKL1-01
ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องตา ที่กำลังขยาย 10X



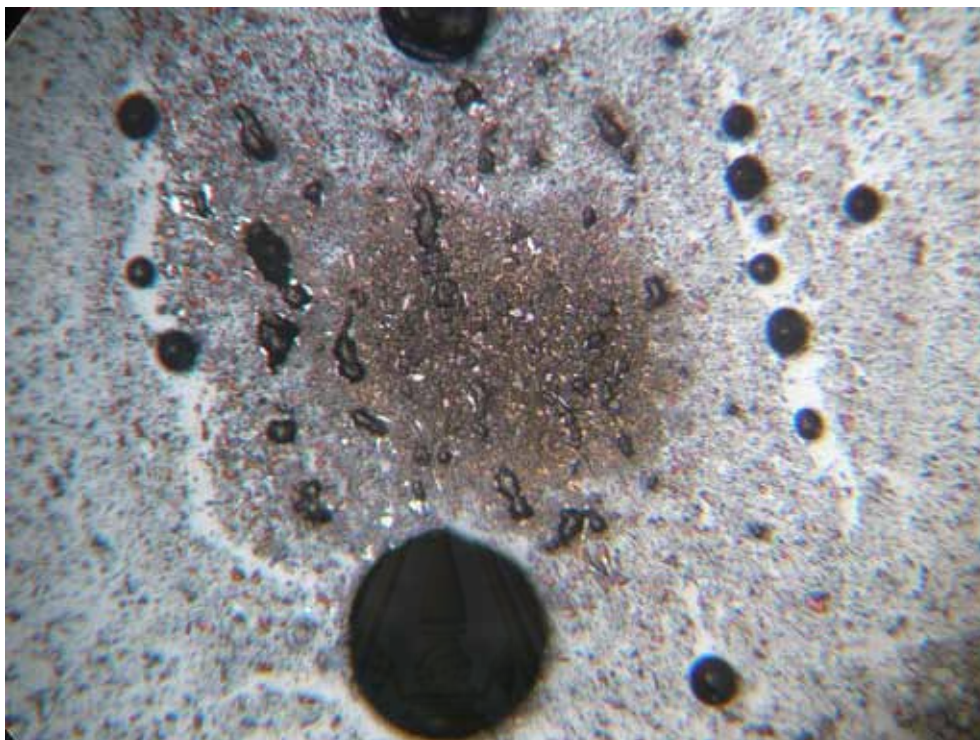
รูปที่ 4.19 พิริโรไทต์ (Po) ในตัวอย่างหมายเลข TKL1-02
ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องตา ที่กำลังขยาย 10X



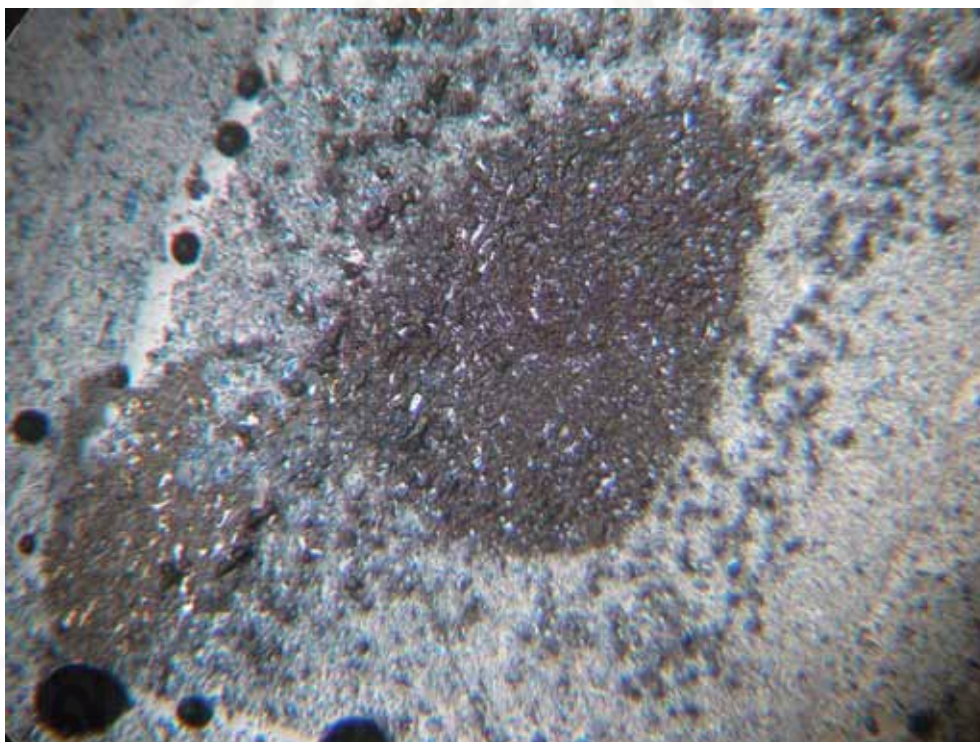
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างหมายเลข TKL1-03 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา กำลังขยาย 10X



รูปที่ 4.21 คาลโคไพไรต์ (Cp) และพิร์โรไทต์ (Po) ในตัวอย่างหมายเลข TKL1-04 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา ที่กำลังขยาย 10X



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างหมายเลข TKL1-05 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสองตา
กำลังขยาย 10X



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างหมายเลข TKL1-06 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์
กำลังขยาย 10X

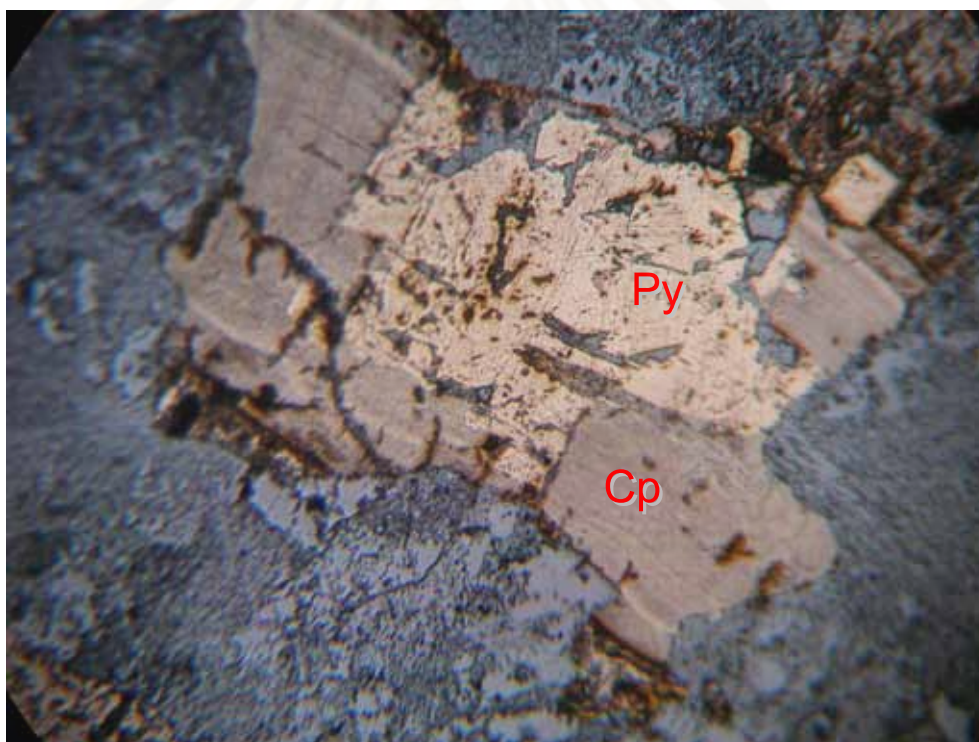
ตารางที่ 4.2 ลักษณะและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแร่

ชื่อแร่	สูตรเคมี	ปริมาณธาตุ	สี	รูปผลึก	ความวาว	ความแข็ง	ความถ่วงจำเพาะ	ความโปร่งแสง	การติดแม่เหล็ก
คาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite)	CuFeS_2	Cu 34.5 % Fe 30.5 % S 35.0 %	ทองเหลือง เหลืองน้ำผึ้ง	Tetragonal	คล้ายโลหะ	3.5-4.0	4.1-4.3	ทึบแสง	ติดแม่เหล็ก หลังจากได้รับความร้อน
ไพไรต์ (Pyrite)	FeS_2	Fe 46.7 % S 53.3 %	เหลืองทอง	Cubic	คล้ายโลหะ	6.0-6.5	4.9-5.2	ทึบแสง	ติดแม่เหล็ก หลังจากได้รับความร้อน
พิร์โรไทต์ (Pyrrhotite)	Fe_{1-x}S ($x=0-0.2$)	Fe 60.4 % (Variable) S 39.6 %	สีบรอนซ์น้ำตาล สีเทาดำ	Monoclinic, Hexagonal	คล้ายโลหะ	3.5-4.0	4.5-4.6	ทึบแสง	ติดแม่เหล็ก
เทนแนนไทต์ (Tennantite)	$(\text{Cu,Fe,Zn,Ag})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	Fe 3.80 % Cu 47.51 % As 20.37 % S 28.33 %	เทาดำ เทาเงิน	Cubic	คล้ายโลหะ	3.5-4.0	4.4-4.5	ทึบแสง	ไม่ติดแม่เหล็ก
เตทราฮีโดรต์ (Tetrahedrite)	$(\text{Cu,Ag})_{10}(\text{Fe,Zn})_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	Fe 10.20 % Cu 34.80 % Sb 29.64 % S 25.37 %	ดำ	Cubic	คล้ายโลหะ	3.5-4.0	4.4-5.1	ทึบแสง	ไม่ติดแม่เหล็ก

จากรูปที่ 4.18 4.19 และ 4.21 ของตัวอย่างหมายเลข TKL1-01 TKL1-02 และ TKL1-04 เป็นตัวอย่างแร่ป้อน (Feed) หั้วแร่เหล็ก (Iron cleaner concentrate) และหัวแร่ทองแดง (Copper recleaner concentrate) ตามลำดับจะพบพิไรโรไทต์ และคาลโคไพไรต์ได้อย่างชัดเจน

รูปที่ 4.20 รูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 นี้ (ตัวอย่างหมายเลข TKL1-03 TKL1-05 และ TKL1-06) เป็นหางแร่จากการทดลองลอยแร่ จึงมีปริมาณของโลหะทองคำ ทองแดง รวมไปถึงเหล็กในปริมาณน้อย ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์จึงมองเห็นได้ไม่ชัดเจนสำหรับ การกำหนด ชนิดของแร่ที่สนใจศึกษา

สำหรับตัวอย่างหมายเลข TKL2-03 ดังแสดงใน รูปที่ 4.24 และ 4.25 ซึ่งเป็น ตัวอย่างแร่ที่มาจากแร่ก้อนที่ผ่านการคัดเลือกผิวหน้าลึกลง เพื่อใช้ สำหรับศึกษา นั้น จะมองเห็น ลักษณะ รูปร่าง ของแร่ไพไรต์ พิไรโรไทต์ และคาลโคไพไรต์ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.24 ไพไรต์ (Py) และคาลโคไพไรต์ (Cp)
ในตัวอย่างหมายเลข TKL2-03 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ที่กำลังขยาย 10X



รูปที่ 4.25 ไพไรต์ (Py) และพิร์ไรท์ (Po) ในตัวอย่างตัวอย่างหมายเลข TKL2-03 ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์ ที่กำลังขยาย 10X

4.3 การศึกษาลักษณะ ชนิด และส่วนประกอบทางเคมีของแร่ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธี Electron Probe Micro-Analysis (EPMA)

ผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่าง ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6480LV (รูปที่ 4.26) ไม่สามารถระบุลักษณะและปริมาณของทองคำและทองแดงได้ เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยมาก และภาพที่เห็นเป็นภาพจากการใช้อิเล็กตรอนส่องกราด ไม่สามารถระบุได้ชัดว่า ทองคำ ทองแดง และเหล็กมีการกระจายอยู่ในบริเวณใด และมีรูปผลึกเป็นลักษณะใด

จากนั้นนำตัวอย่างหมายเลข 1-04 ซึ่งมีปริมาณของทองคำ และทองแดงที่มากที่สุด ไปวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุทองคำ ทองแดง เหล็ก และซัลเฟอร์ ด้วยเครื่อง Electron Probe Micro Analysis: EPMA ยี่ห้อ JEOL รุ่น JXA-8100 (รูปที่ 4.27) จำนวน 3 ครั้ง ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ด้วยกระแสไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ (kV) ขนาดของการยิงอิเล็กตรอน 0.5 x 0.5 ไมครอน (μm) ในแต่ละจุด ครอบคลุมพื้นที่ขนาด 50 x 50 ไมครอน (μm) โดยในแต่ละครั้ง วิเคราะห์ได้ทำการหาการกระจายตัวของ ทองคำ ทองแดง เหล็ก และซัลเฟอร์ และทำการทับซ้อนกันของธาตุ (Mapping) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.26 Scanning Electron Microscope: SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6480LV

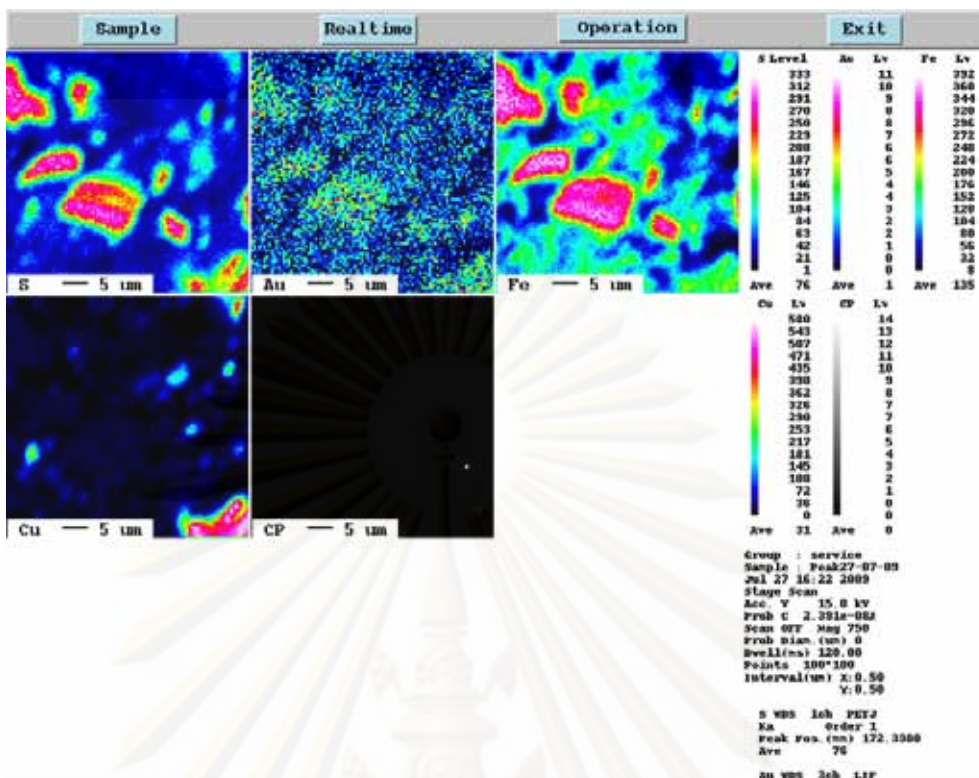


รูปที่ 4.27 Electron Probe Micro Analysis: EPMA ยี่ห้อ JEOL รุ่น JXA-8100

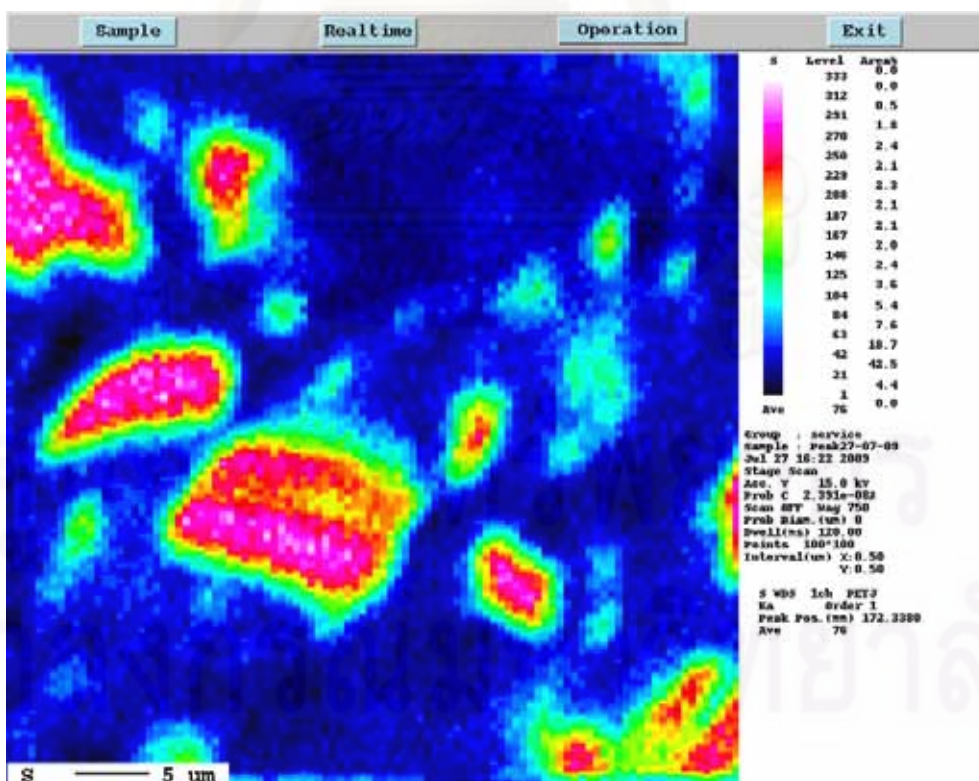
- การกระจายตัวของซัลเฟอร์ ในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.29 รูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.55 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของทองคำ ในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.30 รูปที่ 4.43 และรูปที่ 4.56 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของเหล็ก ในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.31 รูปที่ 4.44 และรูปที่ 4.57 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของทองแดง ในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.32 รูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.58 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของทองคำและซัลเฟอร์ ในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.34 รูปที่ 4.47 และรูปที่ 4.60 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของเหล็กและซัลเฟอร์ ในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.35 รูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.61 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของทองแดงและซัลเฟอร์ ในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.36 รูปที่ 4.49 และรูปที่ 4.62 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของทองคำและเหล็กในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.37 รูปที่ 4.50 และรูปที่ 4.63 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของทองคำและทองแดงในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.38 รูปที่ 4.51 และรูปที่ 4.64 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของเหล็กและทองแดงในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.39 รูปที่ 4.52 และรูปที่ 4.65 ตามลำดับ
- การกระจายตัวของทองคำ เหล็กและทองแดง ในการวิเคราะห์ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ดังรูปที่ 4.40 รูปที่ 4.53 และรูปที่ 4.66 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 ภาพรวมการกระจายตัวของซัลเฟอร์ ทองคำ เหล็ก และทองแดง จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



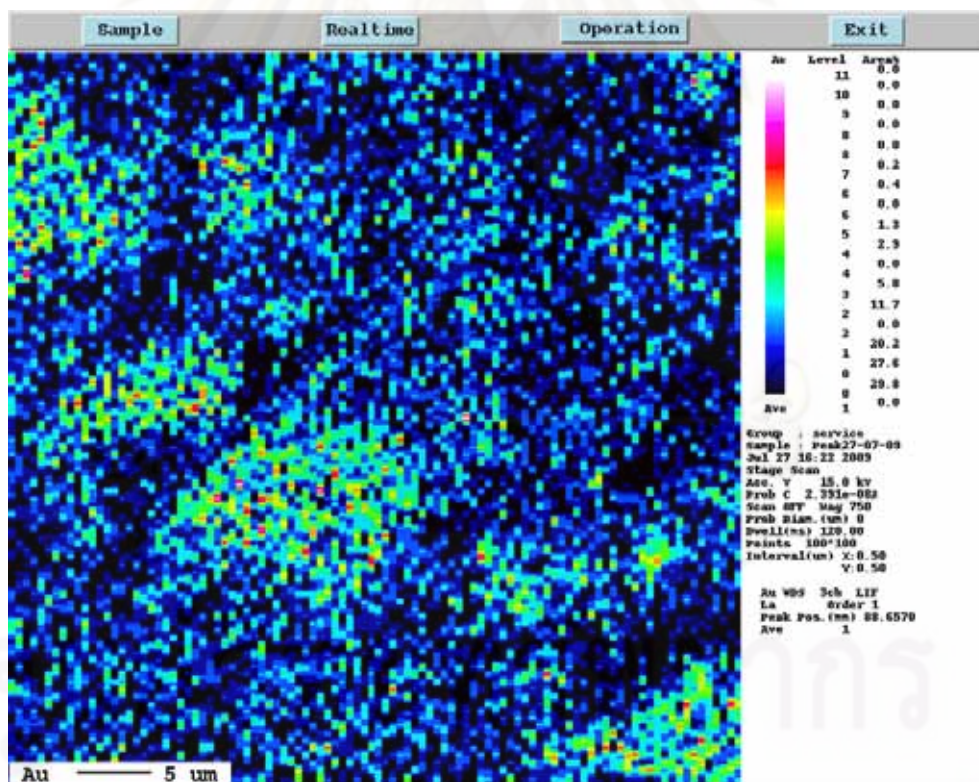
รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของซัลเฟอร์ จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของซัลเฟอร์ ในบริเวณที่ทำการศึกษานั้นมีอยู่มาก โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างไปทางสีแดงจนถึงสีชมพู แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีซัลเฟอร์สูง

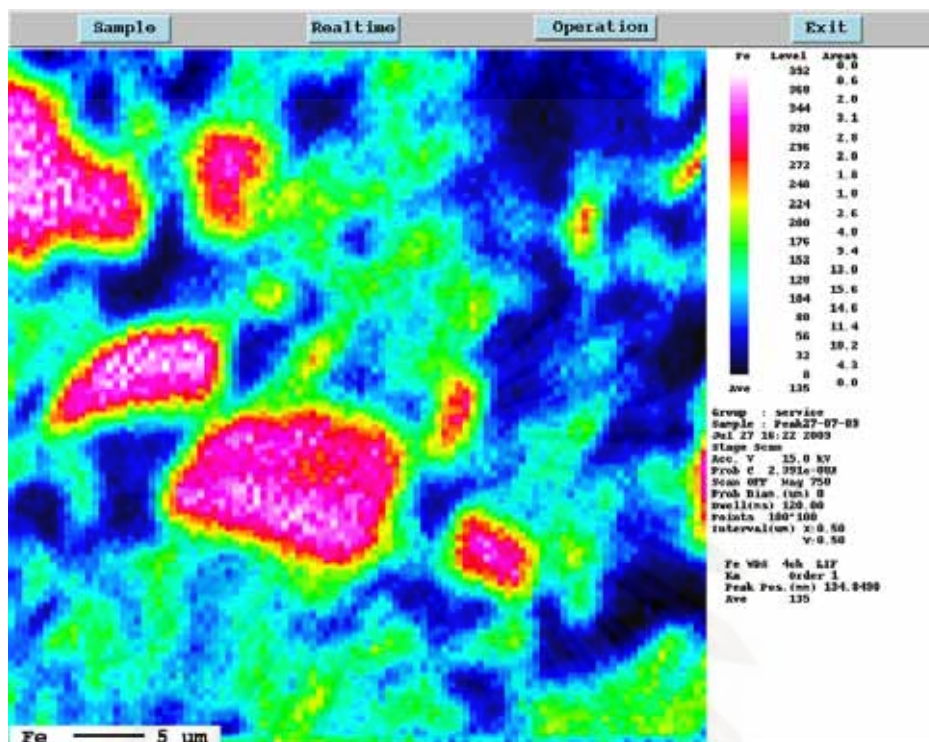
รูปที่ 4.30 แสดงการกระจายตัวของทองคำในบริเวณที่ทำการศึกษานั้น มีอยู่น้อยมาก โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างไปทางสีเขียวจนถึงสีน้ำเงิน แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีทองคำอยู่น้อย

รูปที่ 4.31 แสดงการกระจายตัวของเหล็กในบริเวณที่ทำการศึกษานั้น มีอยู่มาก โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างไปทางสีแดงจนถึงสีชมพู แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีเหล็กอยู่มาก

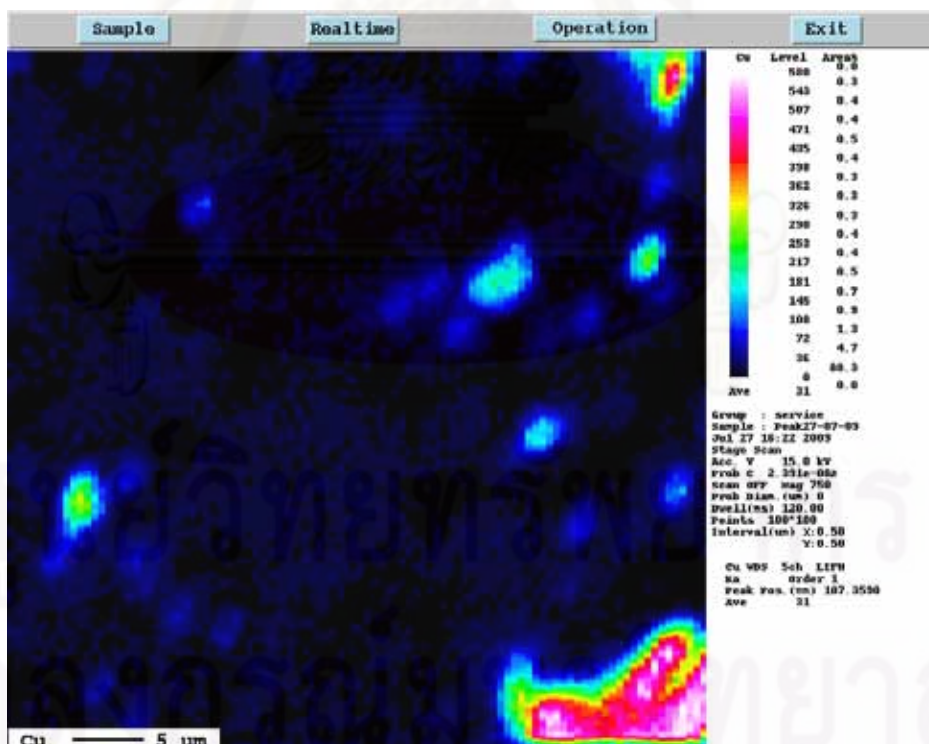
สำหรับการกระจายตัวของทองแดง ดัง รูปที่ 4.32 นั้น จะพบว่าบริเวณที่ทำการศึกษา มีทองแดงอยู่น้อย โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างไปทางสีเขียวจนถึงสีชมพู บริเวณด้านมุมล่างขวา ของรูปที่มีอยู่น้อย



รูปที่ 4.30 การกระจายตัวของทองคำจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.31 การกระจายตัวของเหล็กจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



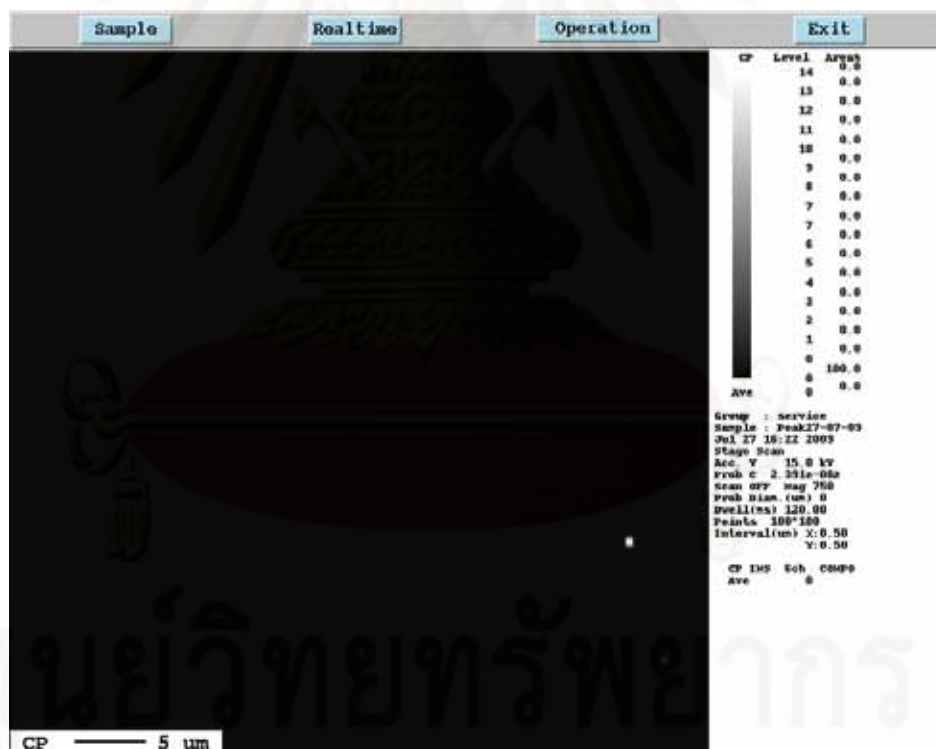
รูปที่ 4.32 การกระจายตัวของทองแดงจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.34 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของซิลเฟอริกกับทองคำนั้น จะเห็นได้ว่าซิลเฟอริก มีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (14.72%) สูงกว่าการกระจายตัวอยู่กับทองคำ (12.02%) และสูงกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ (10.29%)

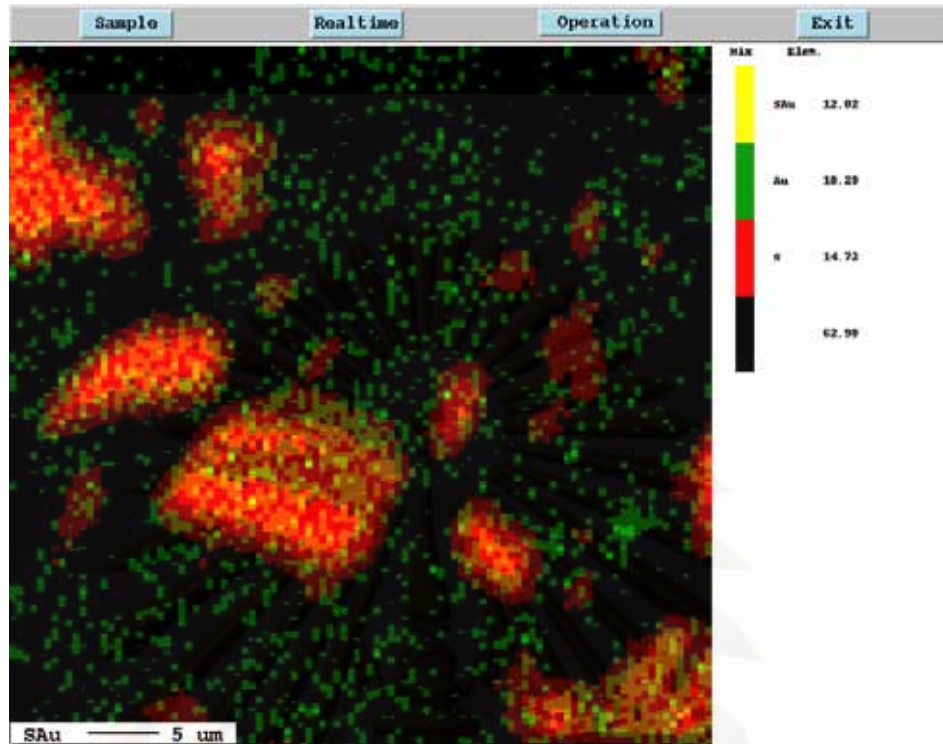
รูปที่ 4.35 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของซิลเฟอริกกับเหล็กนั้น จะเห็นได้ว่าเหล็กอิสระมีการกระจายตัว (35.10%) สูงที่สุด รองลงมาด้วยการกระจายตัวของซิลเฟอริกกับเหล็ก (24.28%) และการกระจายตัวของซิลเฟอริกอิสระ (2.52%)

และรูปที่ 4.36 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของซิลเฟอริกกับทองแดงนั้น จะเห็นได้ว่าซิลเฟอริก มีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (22.24%) สูงกว่าการกระจายตัวอยู่กับทองแดง (4.51%) และสูงกว่าการกระจายตัวของทองแดงอิสระ (0.31%)

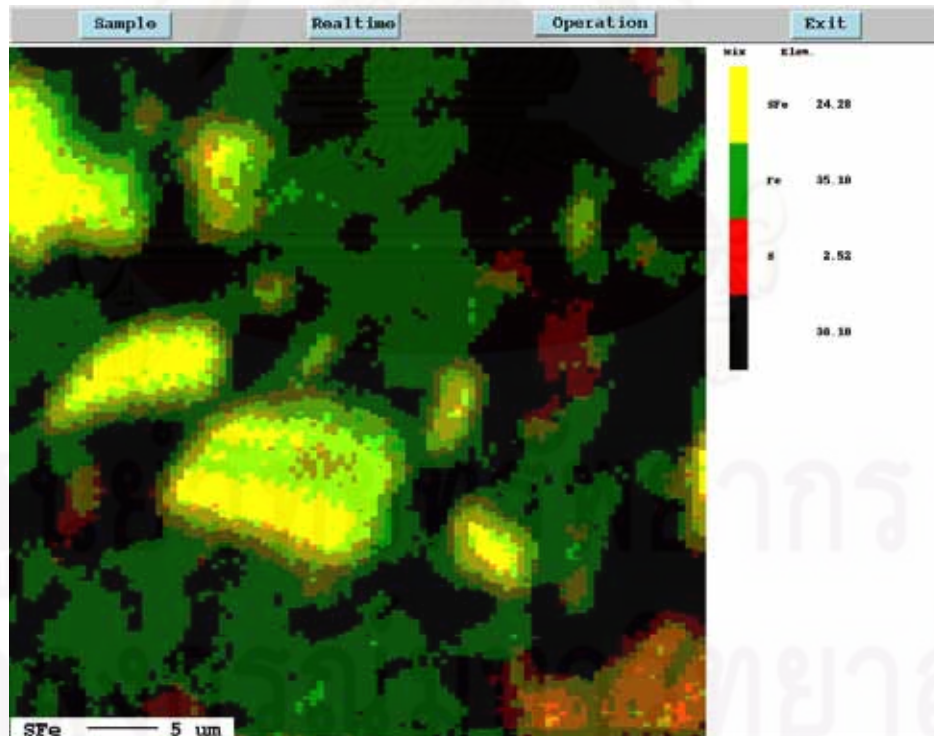
จากรูปที่ 4.37 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของทองคำและเหล็กนั้น จะเห็นได้ว่าเหล็ก มีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (40.88%) สูงกว่าการกระจายตัวอยู่กับทองคำ (18.49%) และสูงกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ (3.83%)



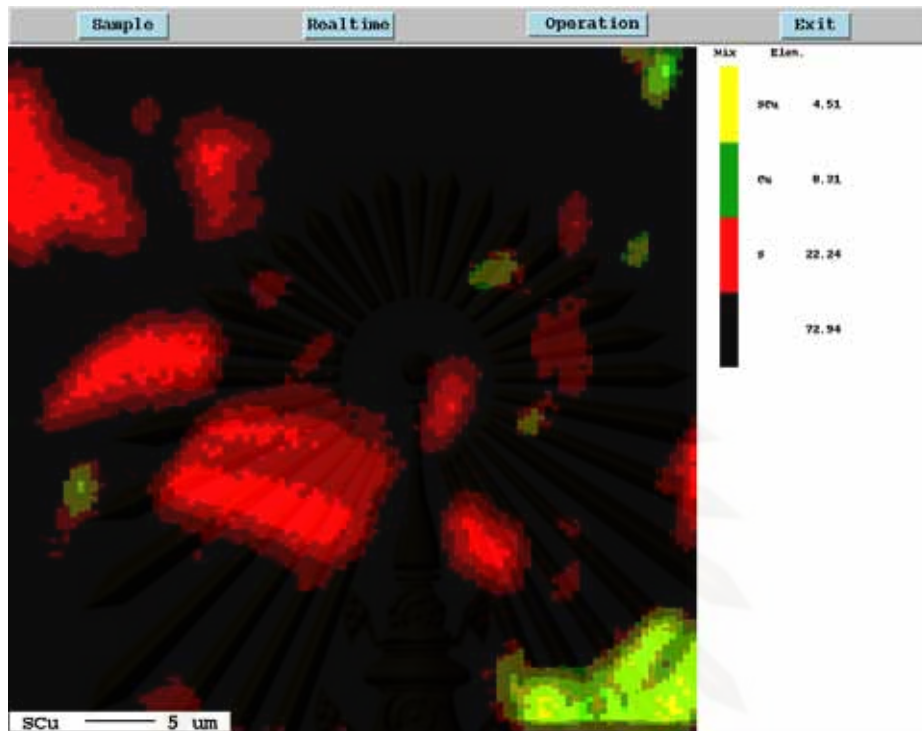
รูปที่ 4.33 ภาพจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



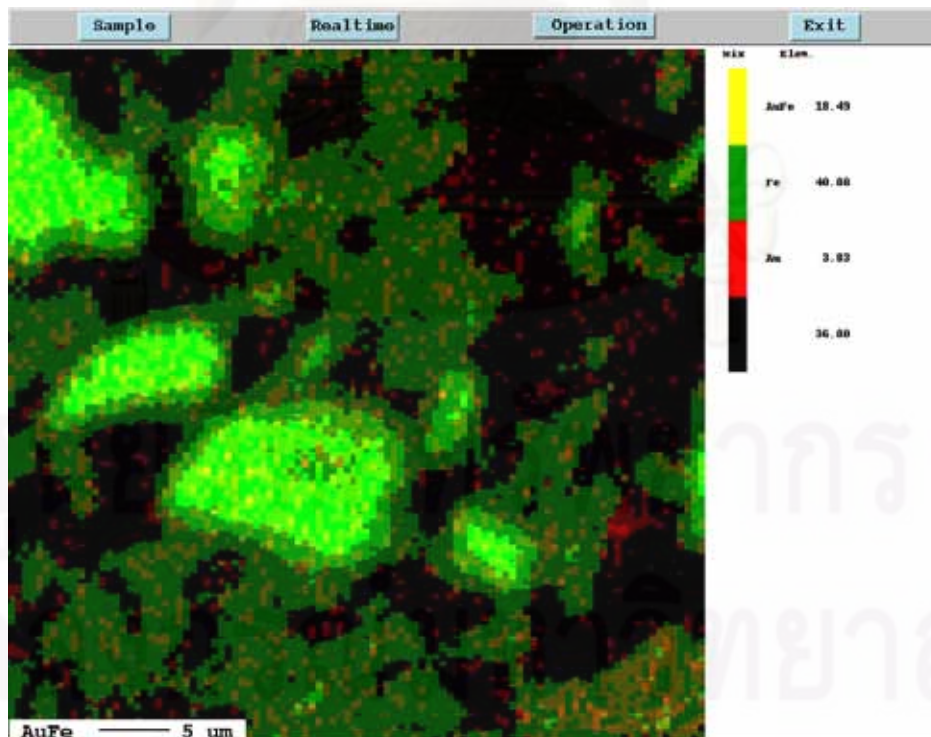
รูปที่ 4.34 การทำภาพทับซ้อนทองคำและซิลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.35 การทำภาพทับซ้อนของเหล็กและซิลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.36 การทำภาพทับซ้อนของทองแดงและซัลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.37 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและเหล็ก
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1

รูปที่ 4.38 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของทองคำและทองแดงนั้น จะเห็นได้ว่าทองคำอิสระมีการกระจายตัว (20.00%) สูงที่สุด รองลงมาด้วยการกระจายตัวของ ทองแดงอิสระ (2.50%) และการกระจายตัวของทองคำและทองแดง (2.32%)

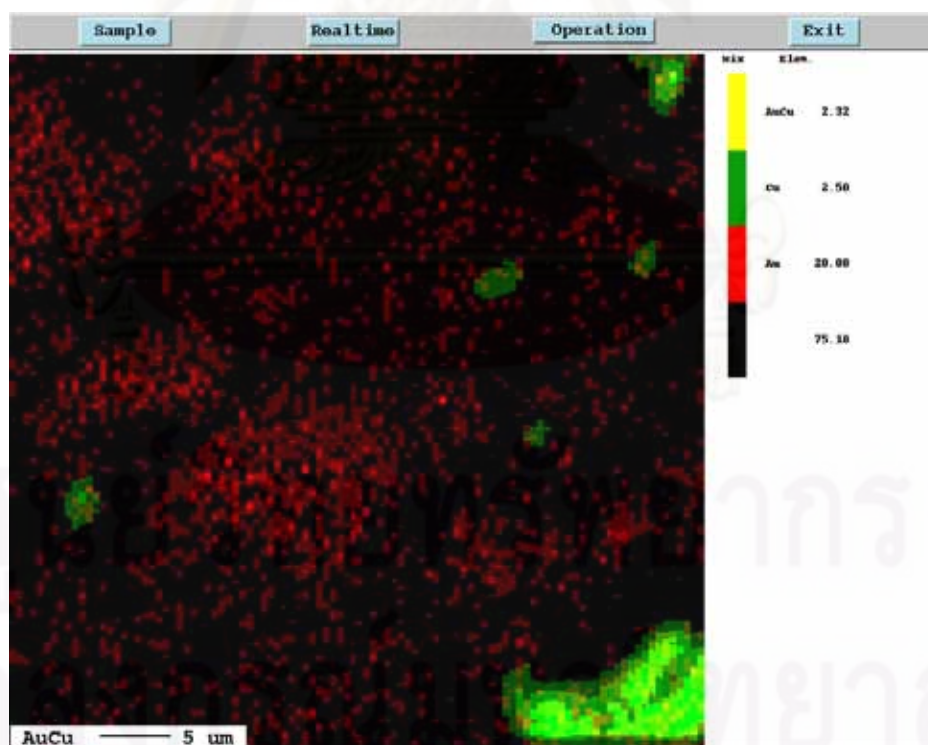
และรูปที่ 4.39 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของเหล็กกับทองแดงนั้น จะเห็นได้ว่าเหล็กนั้น จะมีกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (55.40%) สูงกว่าการกระจายตัวอยู่กับทองแดง (3.99%) และสูงกว่าการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระของทองแดง (0.83%)

รูปที่ 4.40 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ทั้งทองคำ ทองแดงและเหล็กนั้น จะเห็นได้ว่าเหล็กมีการกระจายตัวอยู่ อย่างอิสระสูงที่สุด (38.97%) รองลงมาคือการกระจายตัวของทองคำกับเหล็ก (16.42%) มากกว่าทองคำอิสระ (3.59%) และการกระจายตัวของทองคำทองแดง และเหล็ก (2.08%)

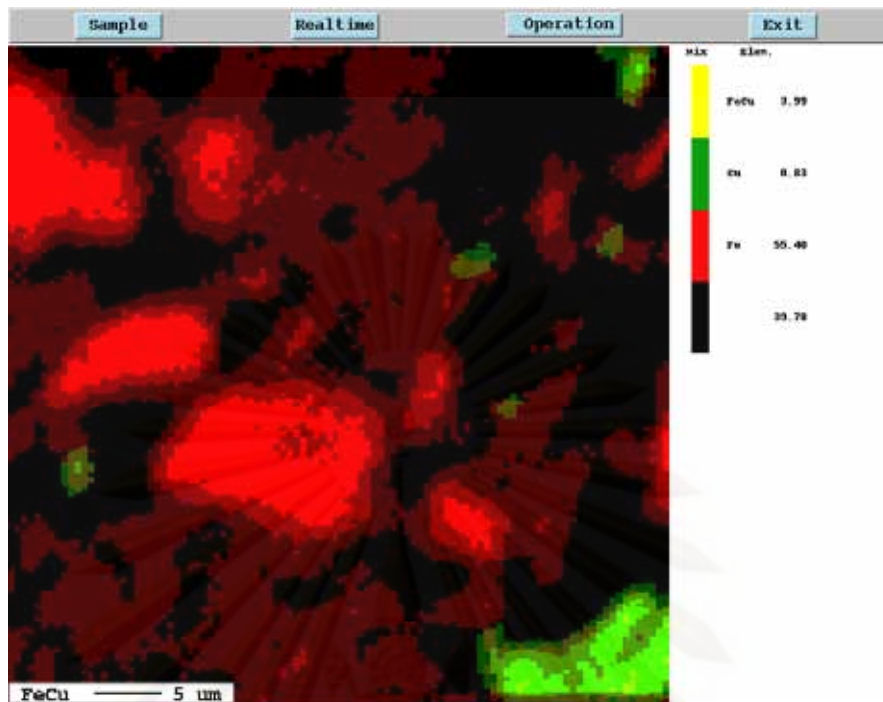
การกระจายตัวของทองแดงและเหล็ก (1.90%) ซึ่งสามารถบอกชนิดของแร่ได้ว่าเป็นแร่คาลโคไพไรต์

รวมทั้งการกระจายตัวของทองแดงอิสระนั้นมีน้อย (0.60%) แต่ก็ยังมากกว่าการกระจายตัวของทองคำกับทองแดงซึ่งมีอยู่น้อยมาก (0.23%)

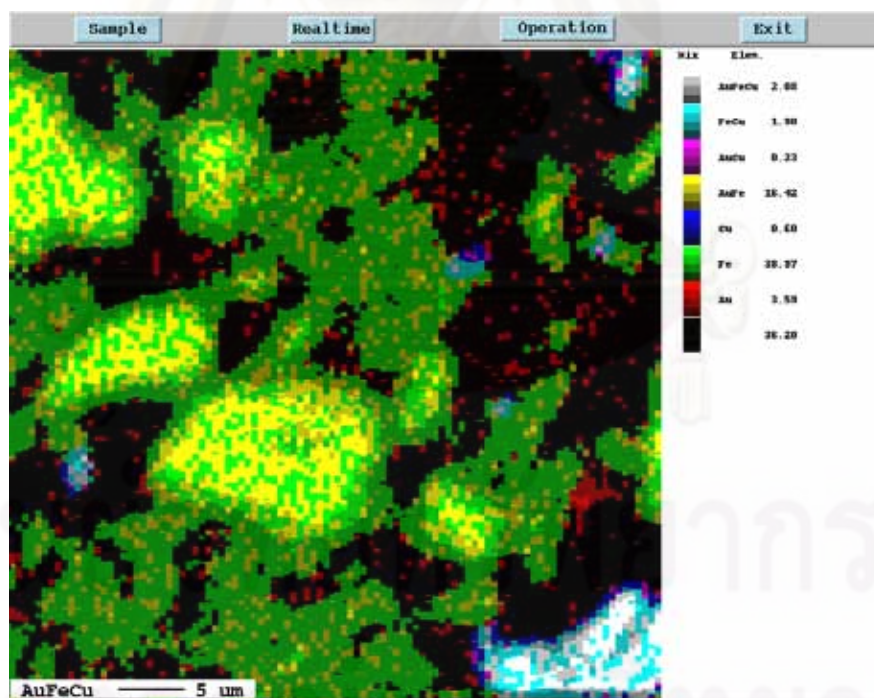
สำหรับการวิเคราะห์ด้วย EPMA ในครั้งที่ 2 ได้ผลดังรูปที่ 4.41 ถึง 4.53



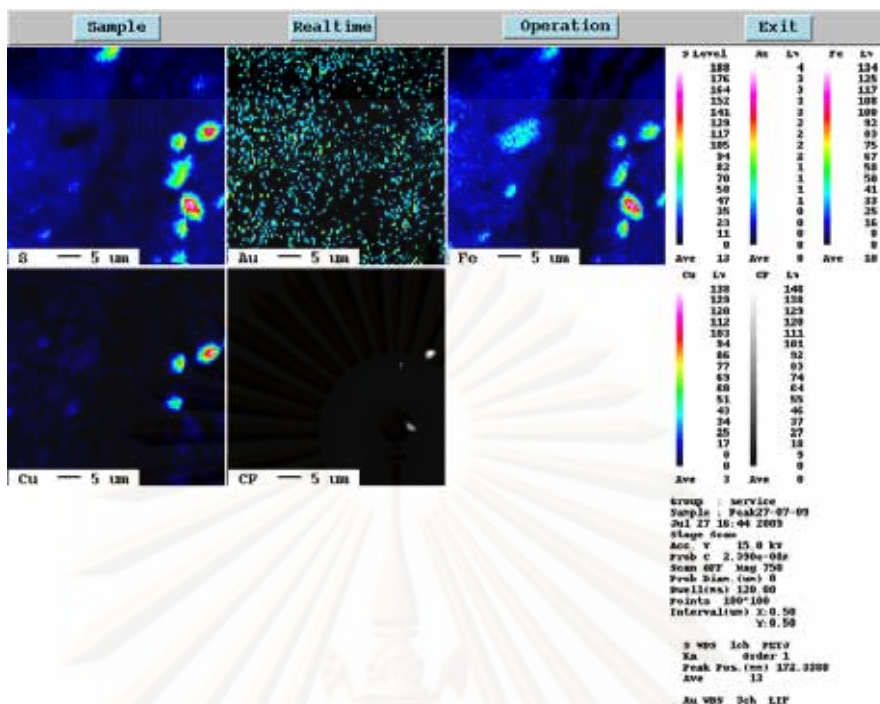
รูปที่ 4.38 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและทองแดงจาก การวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



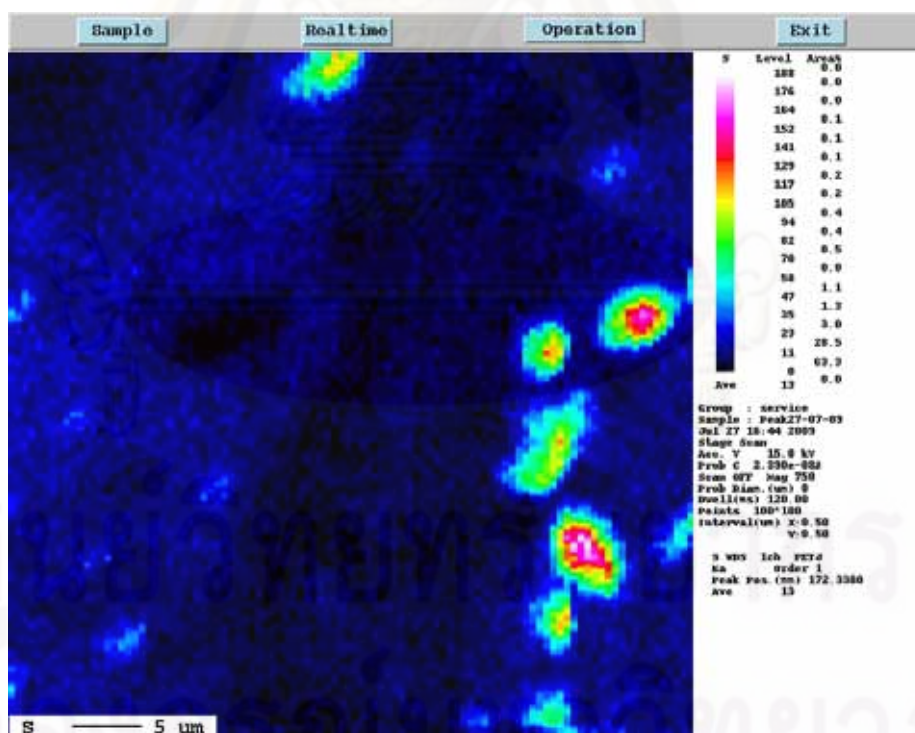
รูปที่ 4.39 การทำภาพทับซ้อนของเหล็กและทองแดง
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.40 การทำภาพทับซ้อนของทองคำ ทองแดง และเหล็ก
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.41 ภาพรวมการกระจายตัวของซัลเฟอร์ ทองคำ เหล็ก และทองแดง จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



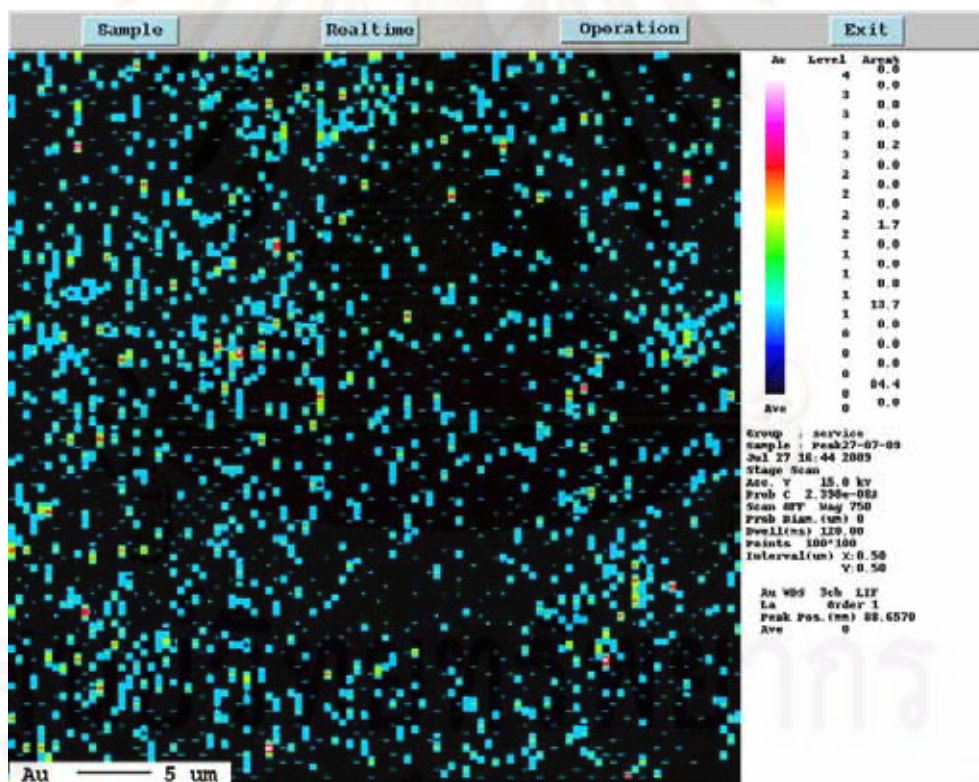
รูปที่ 4.42 การกระจายตัวของซัลเฟอร์ จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.42 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของซิลเฟอริในบริเวณที่ทำการศึกษานั้นมีอยู่น้อย โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างสีเขียวจนถึงสีน้ำเงิน แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีซิลเฟอริต่ำ

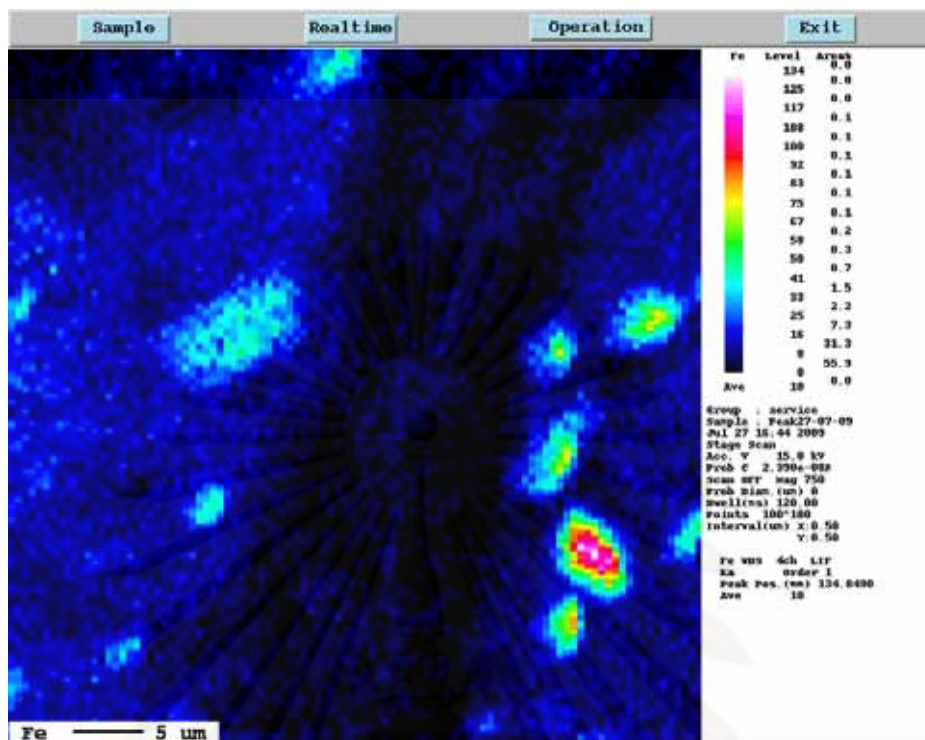
รูปที่ 4.43 แสดงการกระจายตัวของทองคำในบริเวณที่ทำการศึกษานั้น มีอยู่น้อยมาก โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างสีเขียวจนถึงสีน้ำเงิน แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีทองคำอยู่น้อย

และรูปที่ 4.44 แสดงการกระจายตัวของเหล็กในบริเวณที่ทำการศึกษานั้น มีอยู่น้อย โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างสีเขียวจนถึงสีน้ำเงิน แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีเหล็กอยู่น้อย

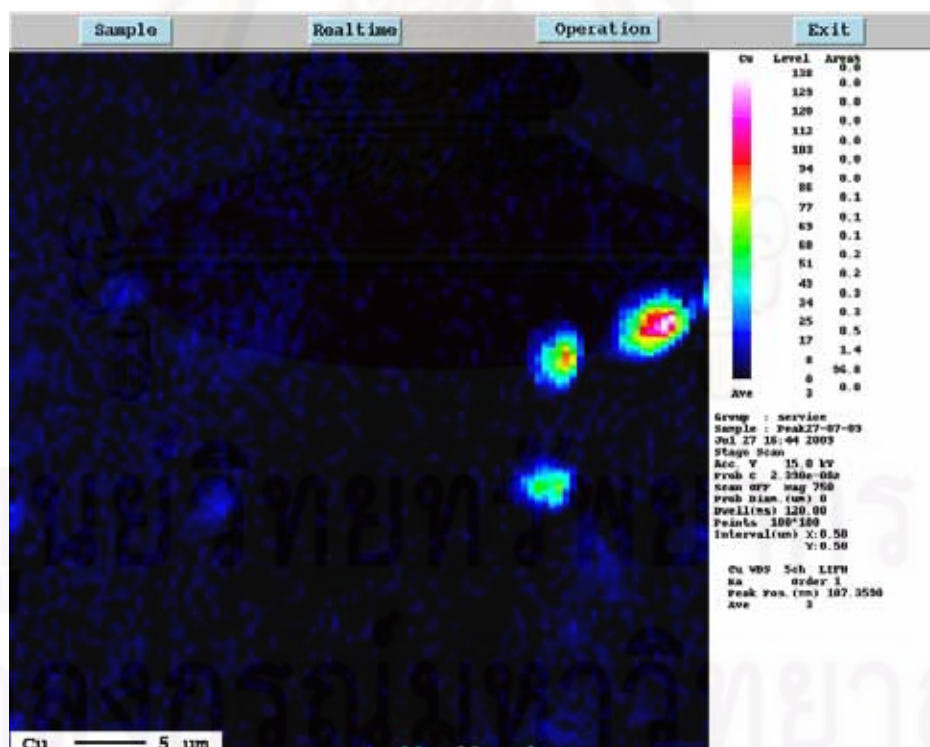
สำหรับการกระจายตัวของทองแดง ดัง รูปที่ 4.45 นั้น จะพบว่าบริเวณที่ทำการศึกษามีทองแดงอยู่น้อย โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างสีแดงจนถึงสีชมพู ที่มีอยู่น้อย



รูปที่ 4.43 การกระจายตัวของทองคำจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.44 การกระจายตัวของเหล็กจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.45 การกระจายตัวของทองแดงจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2

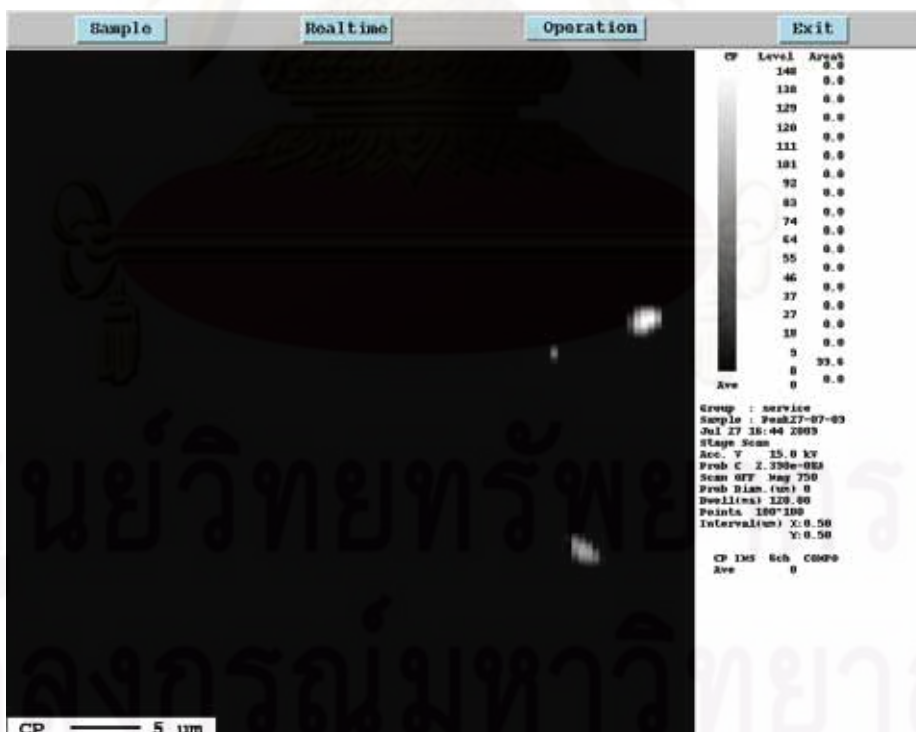
จากรูปที่ 4.47 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของซิลเฟอรกับทองคำนั้น จะเห็นได้ว่าทองคำมีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (14.49%) สูงกว่าการกระจายตัวของซิลเฟอรอิสระ (2.76%) และสูงกว่าการกระจายตัวของซิลเฟอรกับทองคำ (1.21%)

รูปที่ 4.48 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของซิลเฟอรกับเหล็กนั้น จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของซิลเฟอรกับเหล็ก (2.13%) สูงที่สุด รองลงมาด้วยการกระจายตัวของซิลเฟอรอิสระ (1.84%) และการกระจายตัวของเหล็กอิสระ (1.09%)

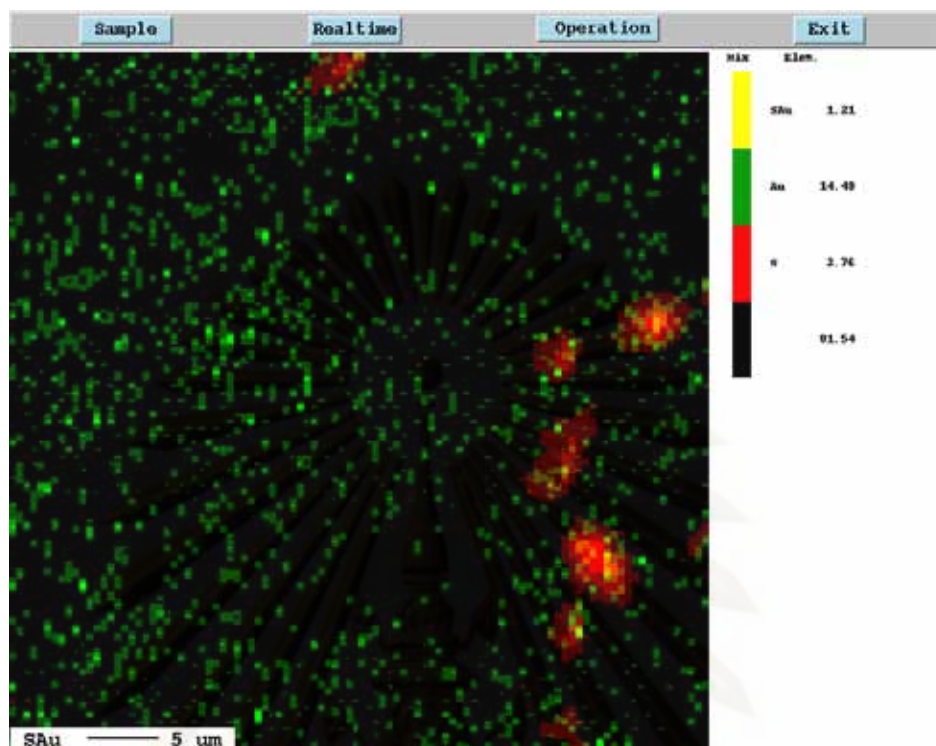
และรูปที่ 4.49 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของซิลเฟอรกับทองแดงนั้น จะเห็นได้ว่าซิลเฟอร มีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (2.92%) สูงกว่าการกระจายตัวอยู่กับทองแดง (2.92%) และสูงกว่าการกระจายตัวของทองแดงอิสระ (0.02%)

จากรูปที่ 4.50 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของทองคำและเหล็กนั้น จะเห็นได้ว่าทองคำ มีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (14.53%) สูงกว่าการกระจายตัวของเหล็กอิสระ (2.09%) และสูงกว่าการกระจายตัวของทองคำและเหล็ก (1.18%)

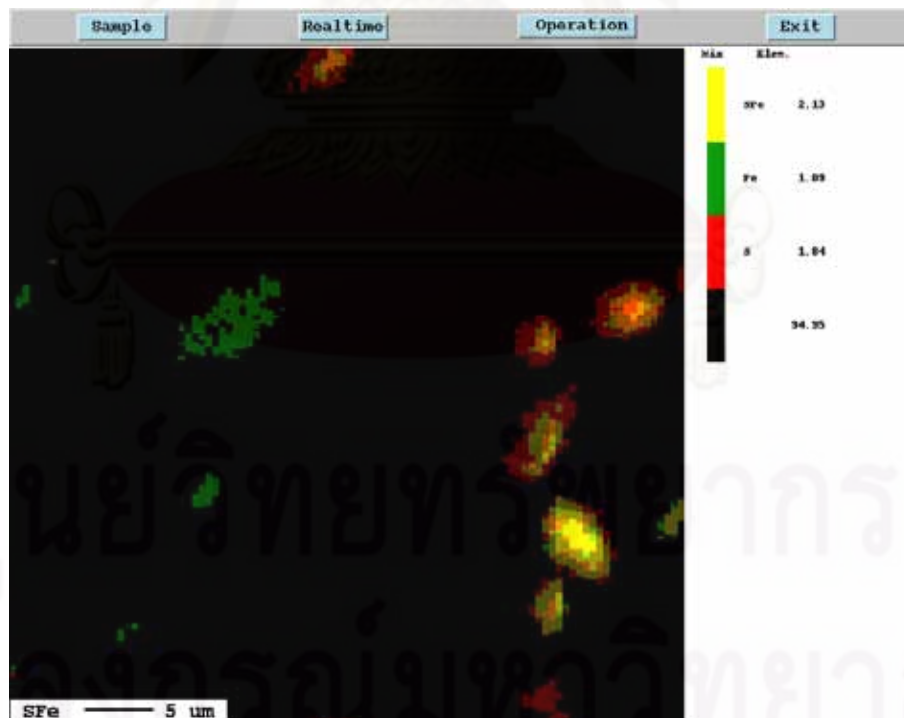
รูปที่ 4.51 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของทองคำและทองแดงนั้น จะเห็นได้ว่าทองคำอิสระมีการกระจายตัว (15.25%) สูงที่สุด รองลงมาด้วยการกระจายตัวของทองแดงอิสระ (0.68%) และการกระจายตัวของทองคำและทองแดง (0.46%)



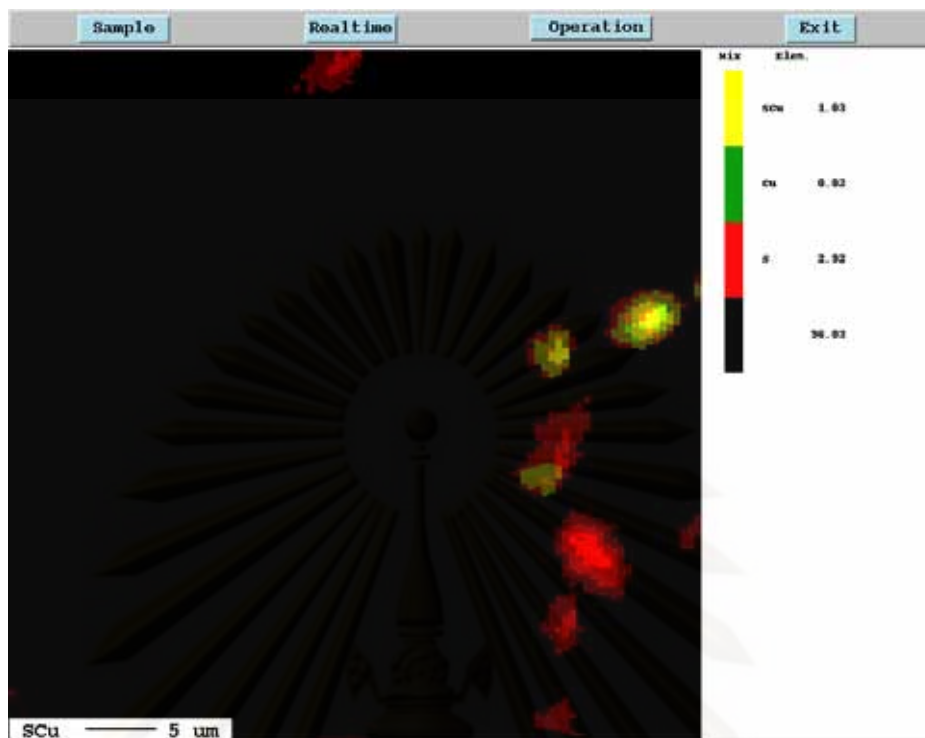
รูปที่ 4.46 ภาพจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



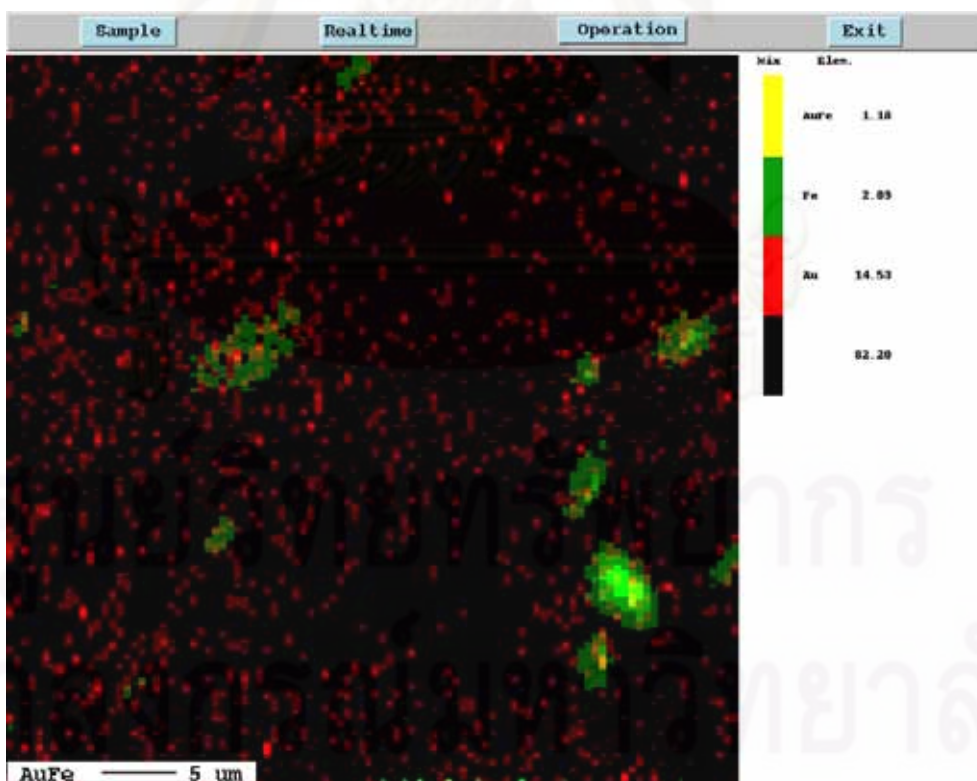
รูปที่ 4.47 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและซิลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



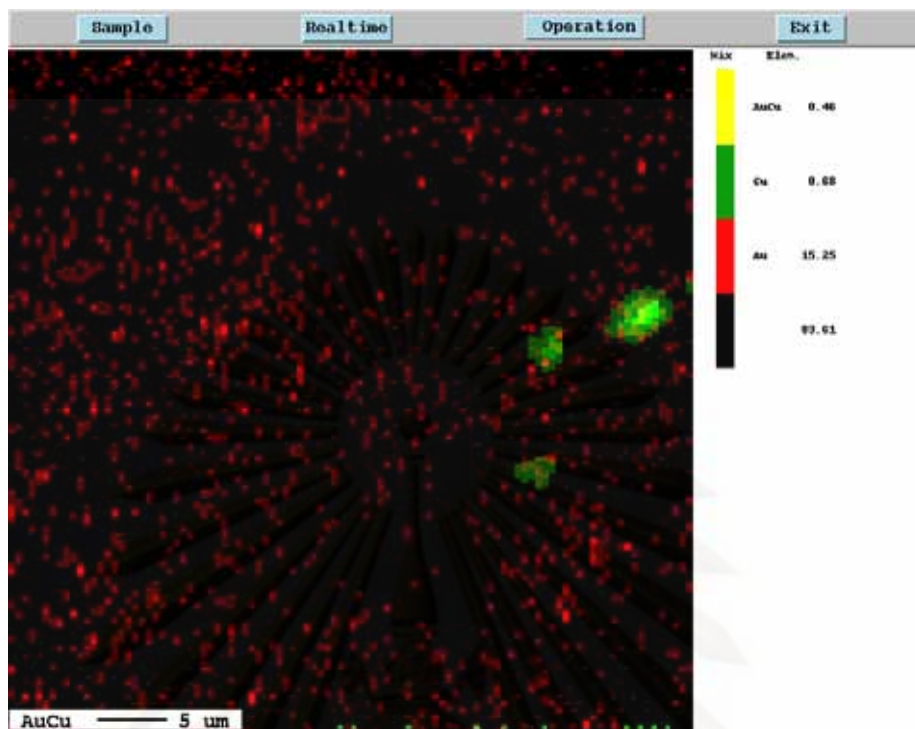
รูปที่ 4.48 การทำภาพทับซ้อนของเหล็กและซิลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.49 การทำภาพทับซ้อนของทองแดงและซัลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.50 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและเหล็ก
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.51 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและทองแดงจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2

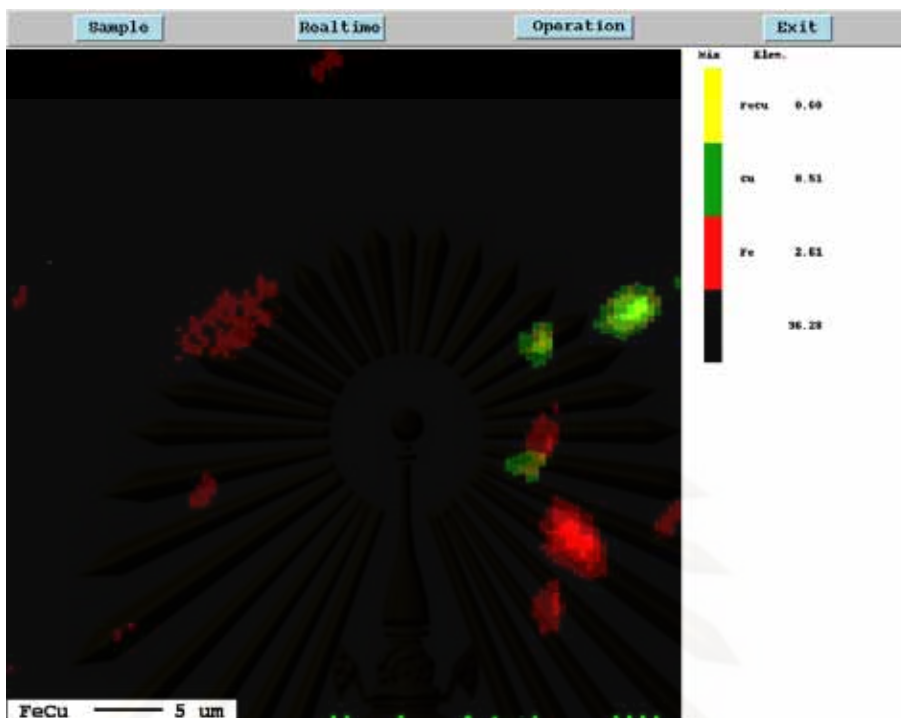
รูปที่ 4.52 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของเหล็กกับทองแดงนั้น จะเห็นได้ว่าเหล็กนั้น จะมีกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (2.61%) สูงกว่าการกระจายตัวอยู่กับทองแดง (0.60%) และสูงกว่าการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระของทองแดง (0.51%)

รูปที่ 4.53 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ทั้งทองคำ ทองแดงและเหล็กนั้น จะเห็นได้ว่าทองคำมีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระสูงที่สุด (14.40%) รองลงมาคือการกระจายตัวของเหล็กอิสระ (1.81%) และการกระจายตัวของทองคำกับเหล็ก (0.88%) ตามลำดับ

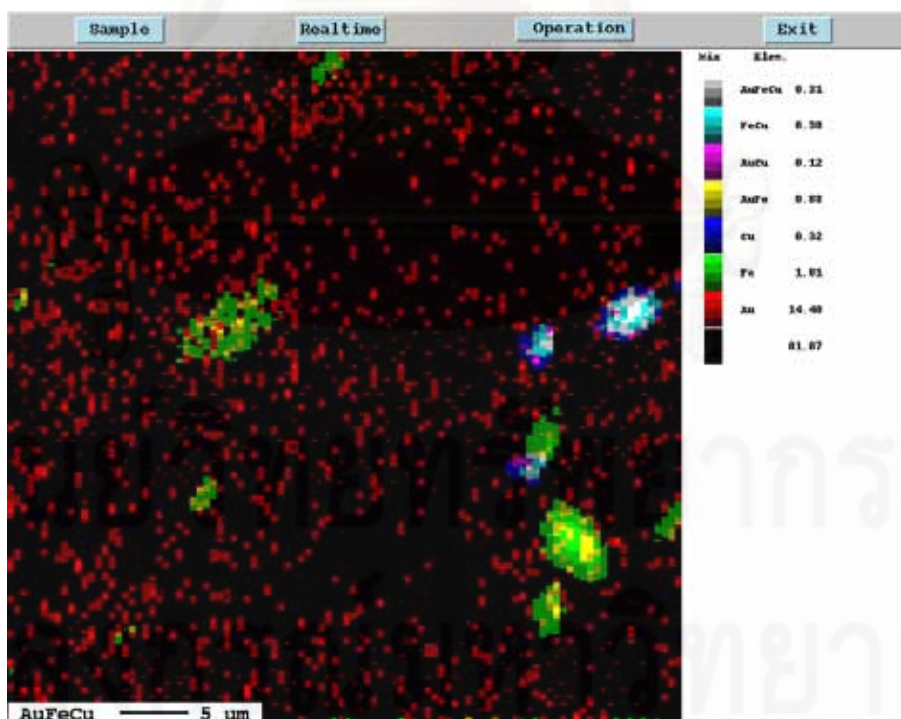
สำหรับการกระจายตัวของทองแดงอิสระ (0.32%) นั้น ใกล้เคียงกับการกระจายตัวของทองคำ ทองแดงกับเหล็ก (0.31%) และการกระจายตัวของเหล็กกับทองแดง (0.30%)

และการกระจายตัวของทองคำกับทองแดง (0.12%) นั้น มีอยู่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก (0.88%) ซึ่งบอกได้ว่าทองคำส่วนมากเกิดอยู่ร่วมกับเหล็กมากกว่าเกิดอยู่ร่วมกับทองแดง

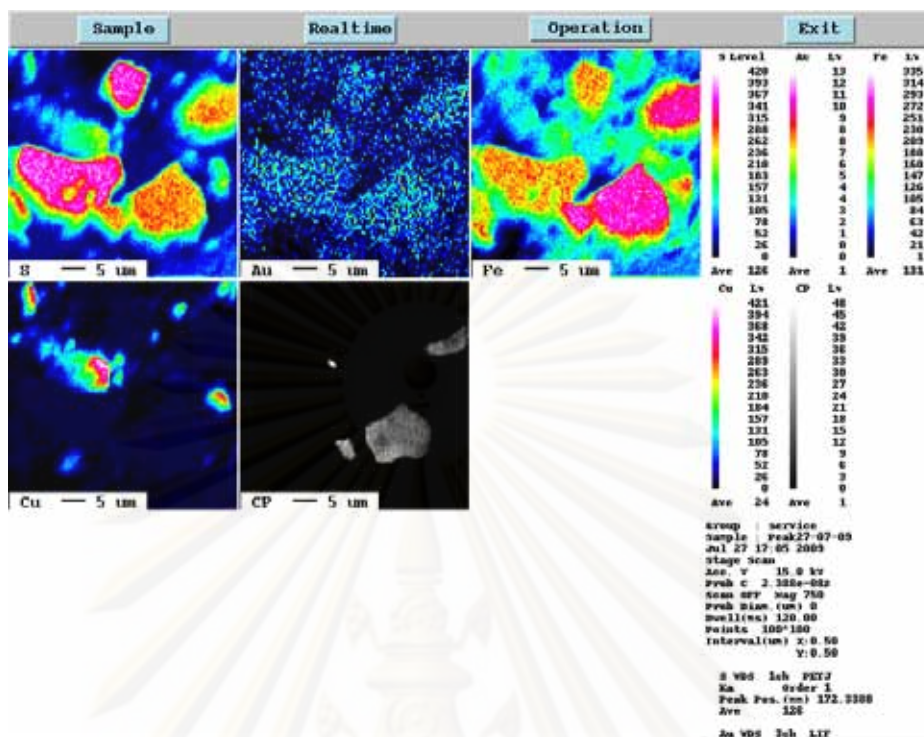
สำหรับการวิเคราะห์ด้วย EPMA ในครั้งที่ 3 ได้ผลดังรูปที่ 4.54 ถึง 4.66



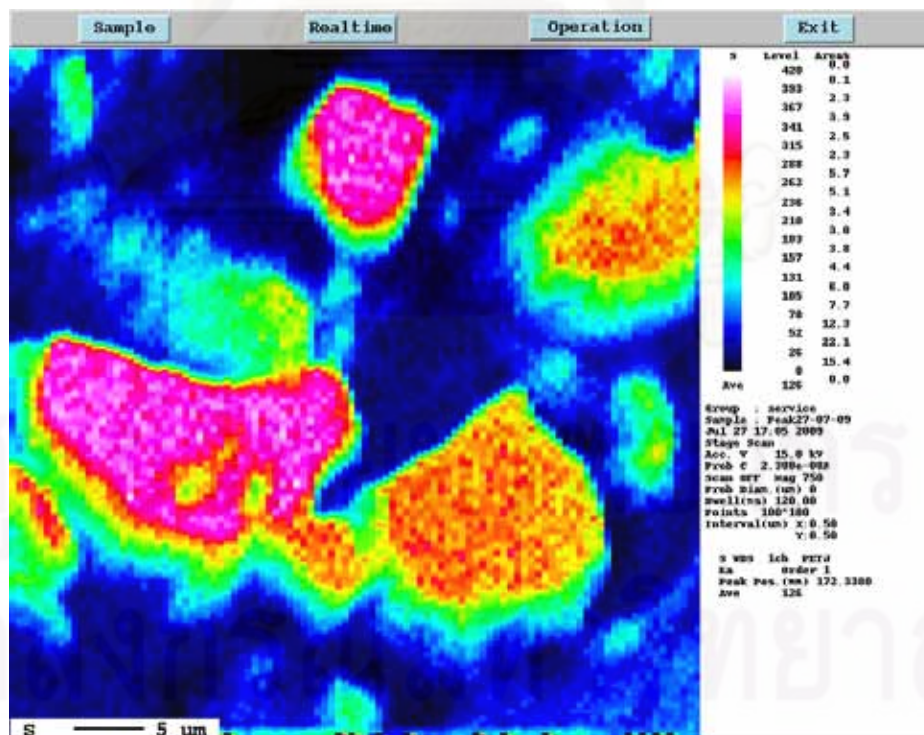
รูปที่ 4.52 การทำภาพทับซ้อนของเหล็กและทองแดง
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.53 การทำภาพทับซ้อนของทองคำ ทองแดง และเหล็ก
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.54 ภาพรวมการกระจายตัวของซัลเฟอร์ ทองคำ เหล็ก และทองแดง จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



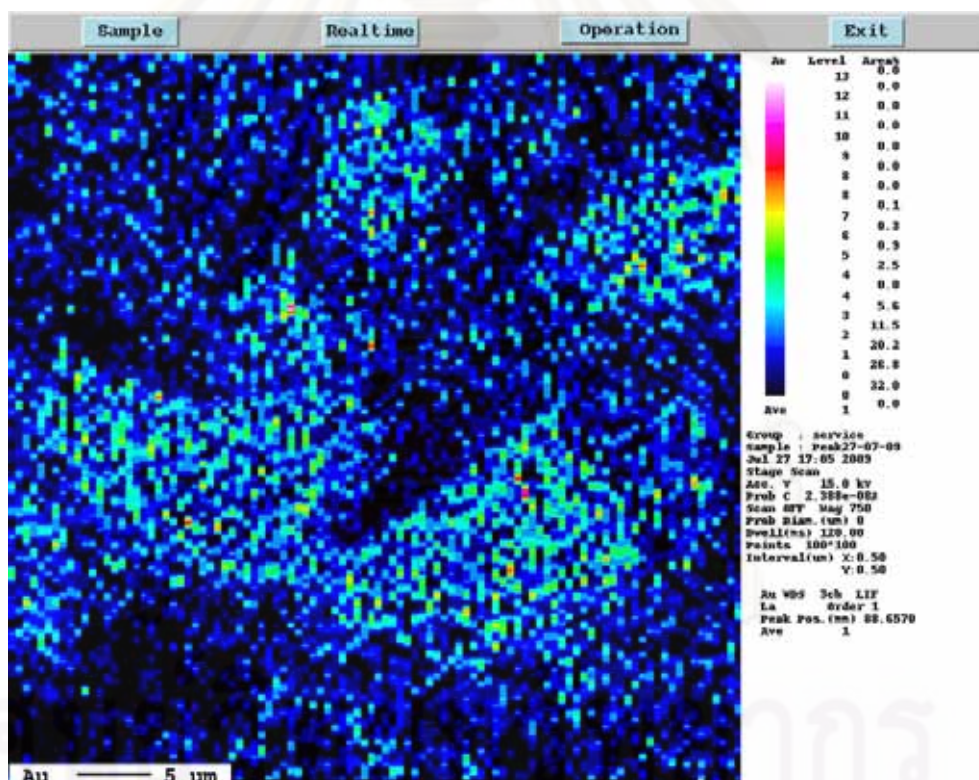
รูปที่ 4.55 การกระจายตัวของซัลเฟอร์ จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.55 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของซิลเฟอริในบริเวณที่ทำการศึกษานั้นมีอยู่มาก โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างไปทางสีแดงจนถึงสีชมพู แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีซิลเฟอริสูง

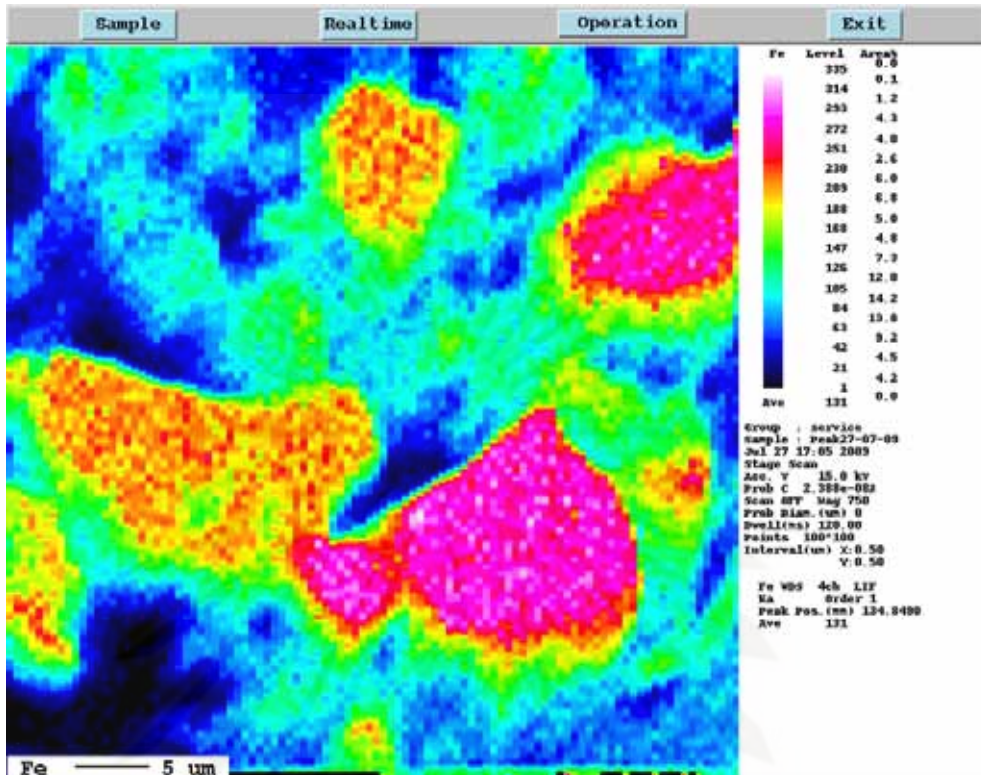
รูปที่ 4.56 แสดงการกระจายตัวของทองคำในบริเวณที่ทำการศึกษานั้น มีอยู่น้อยมาก โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ มีดำน ซึ่งค่อนข้างไปทางสีเขียวจนถึงสีน้ำเงิน แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีทองคำอยู่น้อย

และรูปที่ 4.57 แสดงการกระจายตัวของเหล็กในบริเวณที่ทำการศึกษานั้น มีอยู่มาก โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างไปทางสีแดงจนถึงสีชมพู แสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีเหล็กอยู่มาก

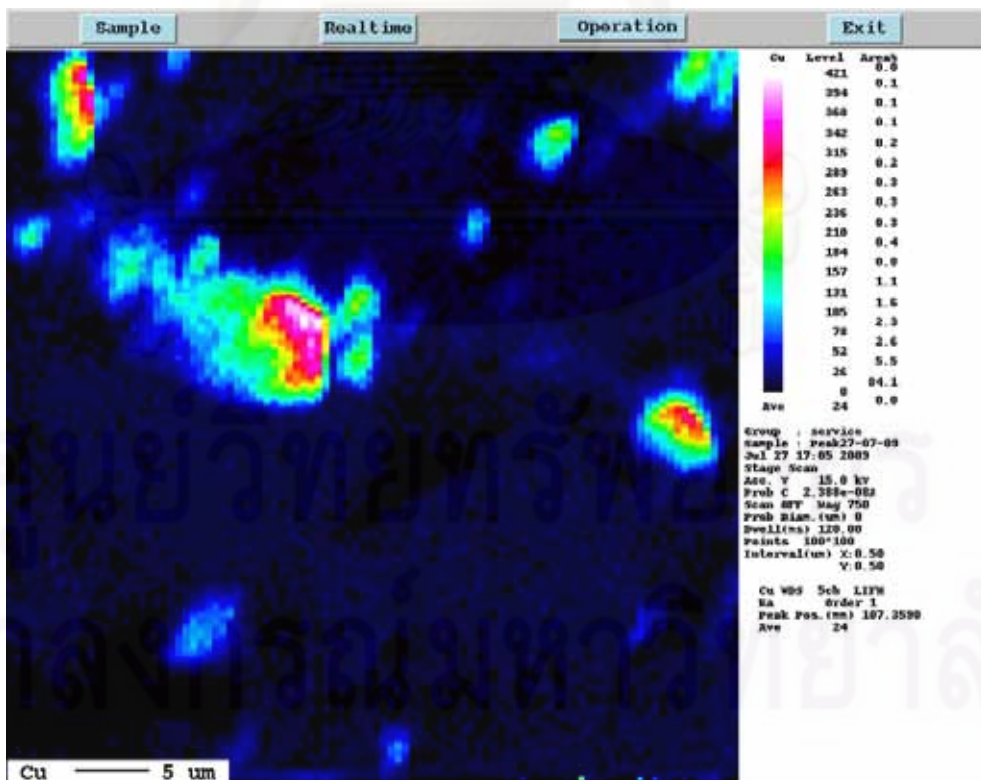
สำหรับการกระจายตัวของทองแดง ดัง รูปที่ 4.58 นั้นจะพบว่าบริเวณที่ทำการศึกษามีทองแดงอยู่น้อย โดยสังเกตได้จากสีของรูปร่างเม็ดแร่ ซึ่งค่อนข้างไปทางสีเขียวจนถึงสีชมพู



รูปที่ 4.56 การกระจายตัวของทองคำจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.57 การกระจายตัวของเหล็กจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.58 การกระจายตัวของทองแดงจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3

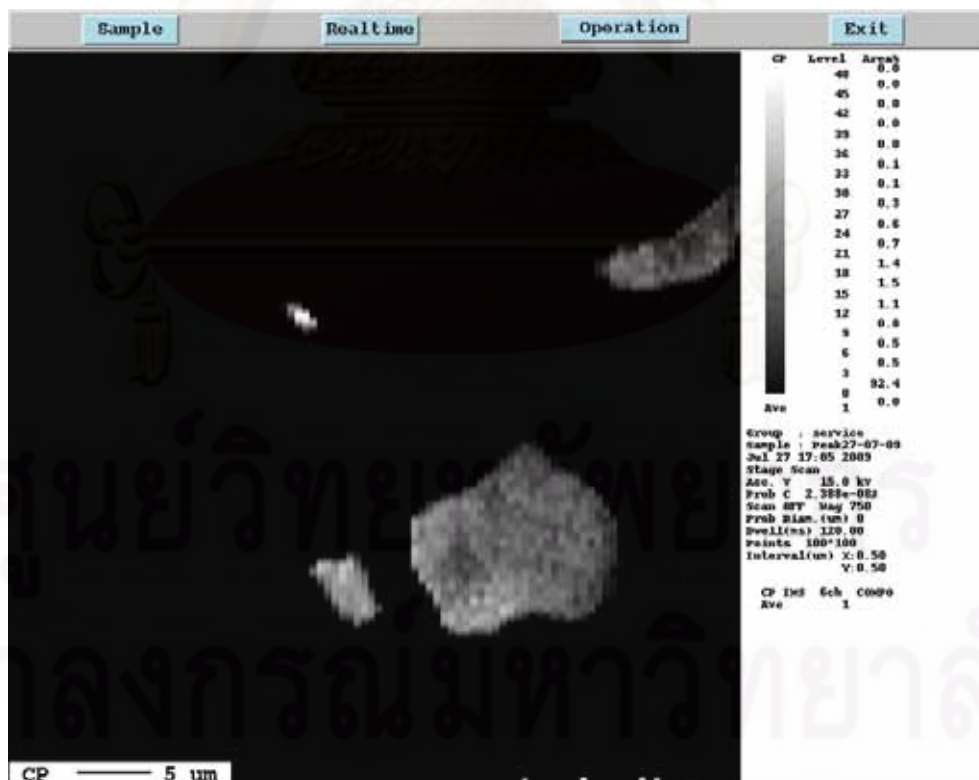
จากรูปที่ 4.60 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของทองคำกับซิลเฟอรินั้น จะเห็นได้ว่าซิลเฟอรินั้นมี 34.78%) มีการกระจายตัวสูงกว่าการกระจายตัวของทองคำ (7.98%) และสูงกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ (1.61%)

รูปที่ 4.61 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของซิลเฟอรินั้น จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของซิลเฟอรินั้น (41.16%) สูงที่สุด รองลงมาด้วยการกระจายตัวของเหล็กอิสระ (27.33%) และการกระจายตัวของซิลเฟอรินั้น (1.55%)

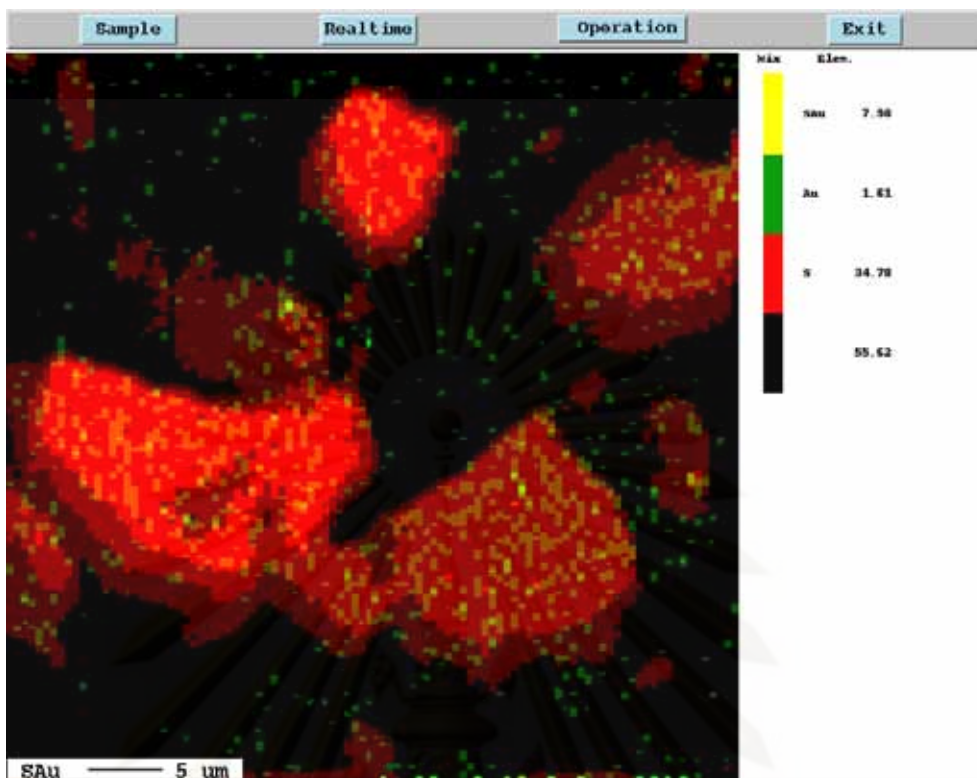
และรูปที่ 4.62 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของซิลเฟอรินั้น จะเห็นได้ว่าซิลเฟอรินั้นมีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (38.33%) สูงกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ (4.38%) และสูงกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ (1.13%)

จากรูปที่ 4.63 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของทองคำและเหล็กนั้น จะเห็นได้ว่าเหล็กมีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (59.51%) สูงกว่าการกระจายตัวของทองคำกับเหล็ก (8.98%) และสูงกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ (0.55%)

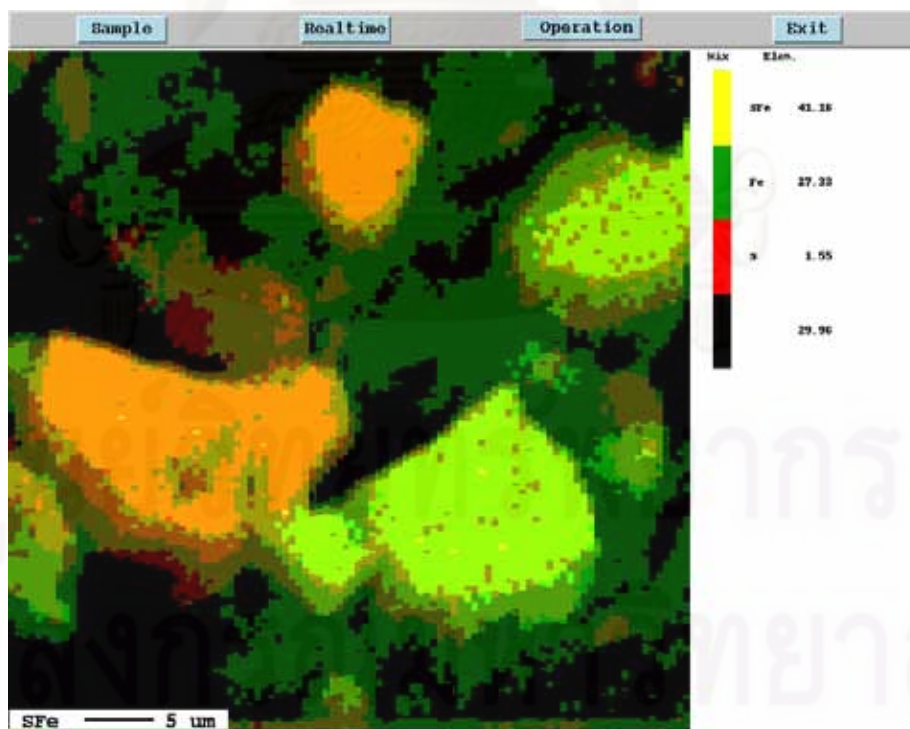
รูปที่ 4.64 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของทองคำและทองคำอิสระนั้น จะเห็นได้ว่าทองคำอิสระมีการกระจายตัว (8.79%) สูงที่สุด รองลงมาด้วยการกระจายตัวของทองคำอิสระ (4.77%) และการกระจายตัวของทองคำและทองคำอิสระ (0.74%)



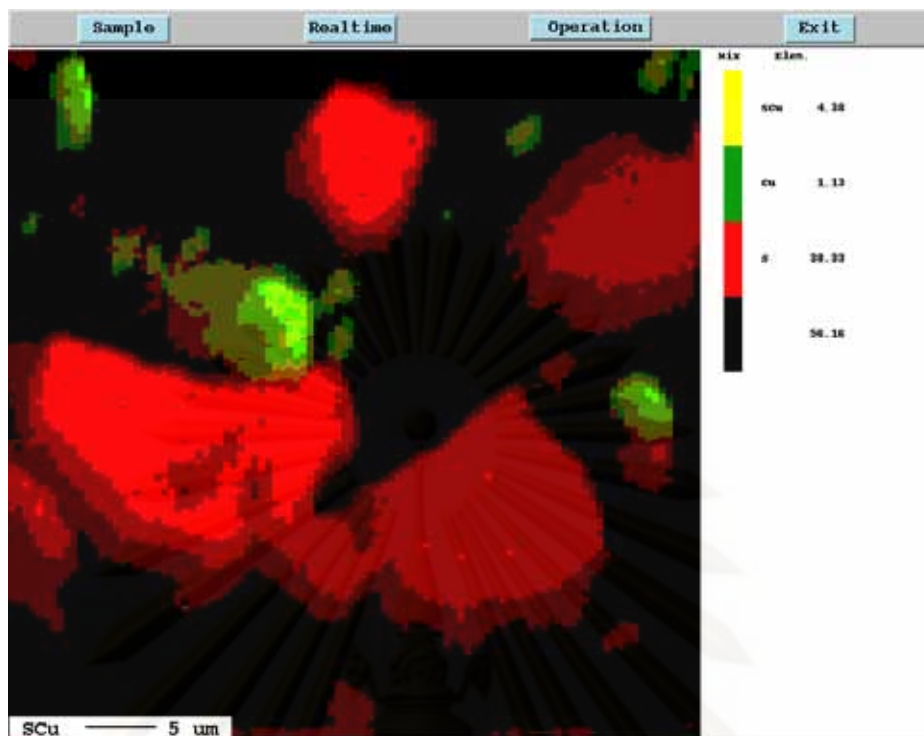
รูปที่ 4.59 ภาพจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



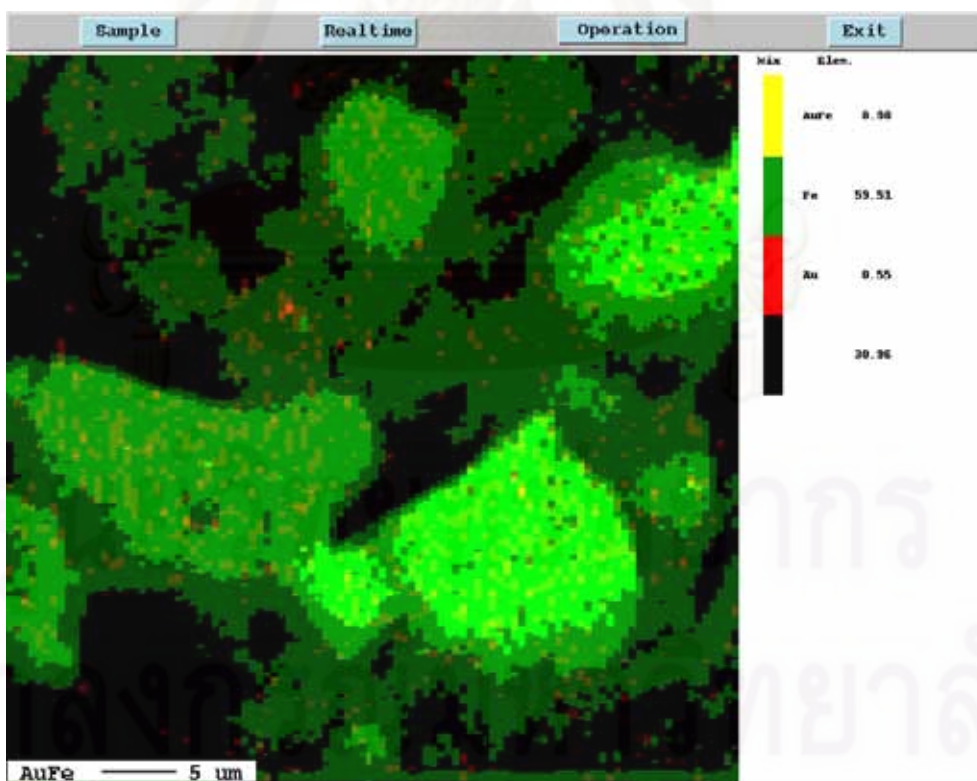
รูปที่ 4.60 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและซัลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



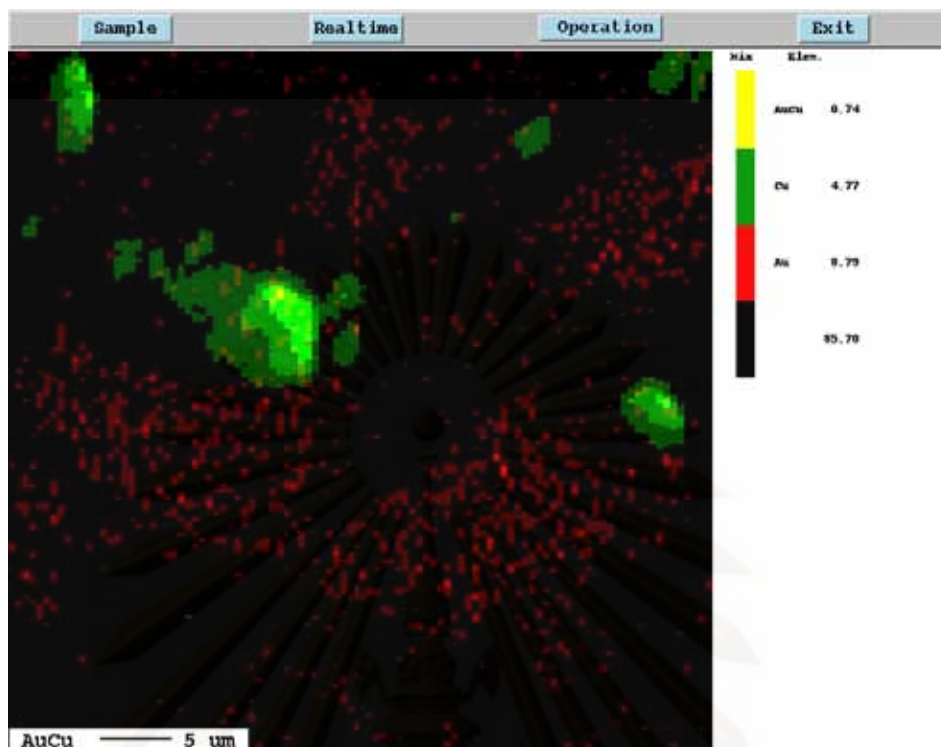
รูปที่ 4.61 การทำภาพทับซ้อนของเหล็กและซัลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



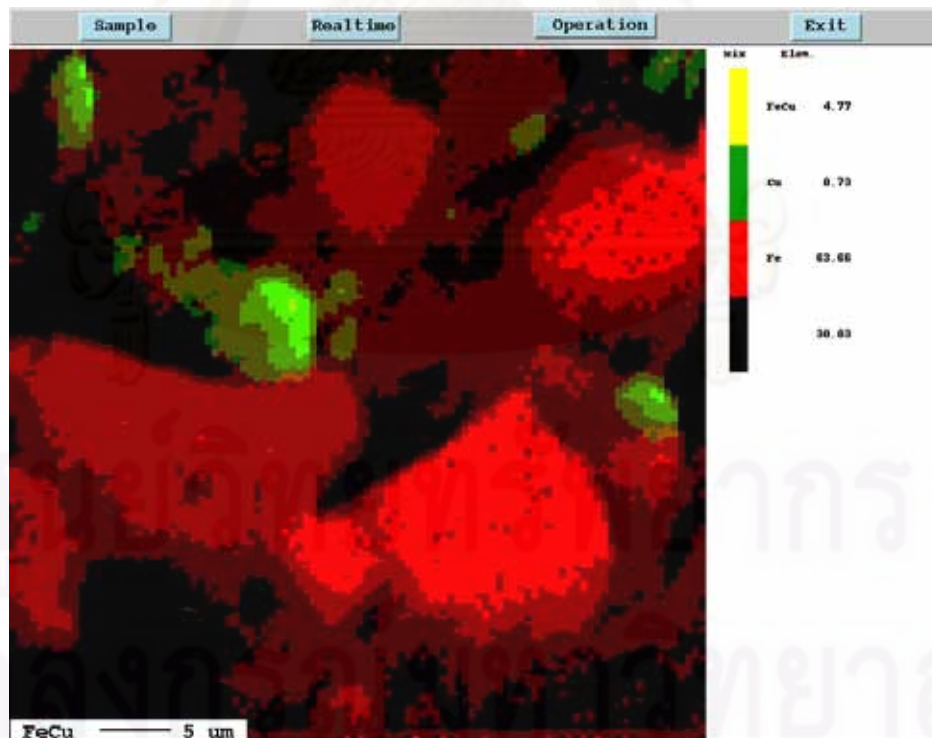
รูปที่ 4.62 การทำภาพทับซ้อนของทองแดงและซัลเฟอร์
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.63 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและเหล็ก
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.64 การทำภาพทับซ้อนของทองคำและทองแดงจาก
การวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3



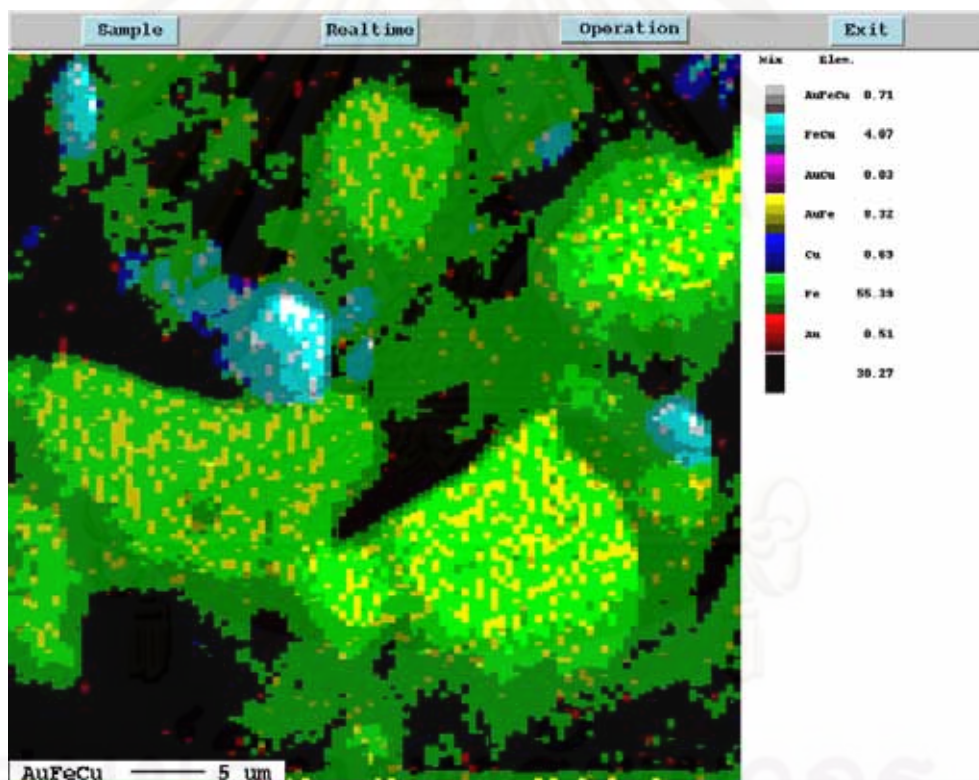
รูปที่ 4.65 การทำภาพทับซ้อนของเหล็กและทองแดง
จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3

และรูปที่ 4.65 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ของเหล็กกับทองแดงนั้น จะเห็นได้ว่าเหล็กนั้น จะมีกระจายตัวอยู่อย่างอิสระ (63.66%) สูงกว่าการกระจายตัวอยู่กับทองแดง (4.77%) และสูงกว่าการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระของทองแดง (0.73%)

รูปที่ 4.66 การทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ทั้งทองคำ ทองแดงและเหล็กนั้น จะเห็นได้ว่าเหล็กมีการกระจายตัวอยู่อย่างอิสระสูงสุด (55.39%) รองลงมาคือการกระจายตัวของทองคำและเหล็ก (8.32%) และการกระจายตัวของเหล็กและทองแดง (4.07%) ตามลำดับ

สำหรับการกระจายตัวของทองคำ ทองแดง และเหล็ก (0.71%) และการกระจายตัวของทองแดงอิสระ (0.69%) นั้น มีค่าใกล้เคียงกัน

และการกระจายตัวของทองคำอิสระ (0.51%) และการกระจายตัวของทองคำและทองแดง (0.03%) นั้นมีอยู่น้อยมาก



รูปที่ 4.66 การทำภาพทับซ้อนของทองคำ ทองแดง และเหล็ก จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA ครั้งที่ 3

4.3.1 ผลการศึกษา

ผลการศึกษาตัวอย่างที่นำมาวิจัยพบว่า ซัลเฟอร์จะเกิดร่วมกับธาตุทุกตัว และมีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก โดยตารางที่ 4.3 แสดงการกระจายของธาตุเมื่อทำการทับซ้อนกัน

ตารางที่ 4.3 แสดงการกระจายของธาตุเมื่อทำการทับซ้อนกัน

การซ้อนทับกัน ของธาตุ	ธาตุ	การศึกษา EPMA		
		ครั้งที่ 1 (%)	ครั้งที่ 2 (%)	ครั้งที่ 3 (%)
S-Au	S-Au	12.02	1.21	7.98
	Au	10.29	14.49	1.61
	S	14.72	2.76	34.78
S-Fe	S-Fe	24.28	2.13	41.16
	Fe	35.10	1.09	27.33
	S	2.52	1.84	1.55
S-Cu	S-Cu	4.51	1.03	4.38
	Cu	0.31	0.02	1.13
	S	22.24	2.92	38.22
Au-Fe	Au-Fe	18.49	1.18	8.98
	Fe	40.88	2.09	59.51
	Au	3.83	14.53	0.55
Au-Cu	Au-Cu	2.32	0.46	0.74
	Cu	2.50	0.68	4.77
	Au	20.00	15.25	8.79
Fe-Cu	Fe-Cu	3.99	0.60	4.77
	Cu	0.83	0.51	0.73
	Fe	55.40	2.61	63.66
Au-Fe-Cu	Au-Fe-Cu	2.08	0.31	0.71
	Fe-Cu	1.90	0.30	4.07
	Au-Cu	0.23	0.12	0.03
	Au-Fe	16.42	0.88	8.32
	Cu	0.60	0.32	0.69
	Fe	38.97	1.81	55.39
	Au	3.59	14.40	0.51

จากตารางที่ 4.3 พบว่า

- จากการทำการทับซ้อนกันของทองคำและเหล็กพบว่า การกระจายตัวของทองคำกับเหล็กนั้น สูงกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ
- จากการทำการทับซ้อนกันของทองคำและทองแดงพบว่า การกระจายตัวของทองคำกับทองแดงนั้น น้อยกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ
- และจากการทำการทับซ้อนกันของทั้งทองคำ ทองแดง และเหล็ก ทำให้สรุปได้ว่าการกระจายตัวของทองคำกับทองแดง (Au-Cu) นั้น มีอยู่น้อยกว่าการกระจายตัวของทองคำอิสระ (Au) และน้อยกว่าการกระจายตัวของทองคำและเหล็ก (Au-Fe) ซึ่งเห็นได้ชัดว่าทองคำเกิดร่วมกับเหล็ก ซึ่งน่าจะสรุปได้ว่าทองคำจะปรากฏร่วมกับแร่เหล็กไพไรไรต์เป็นส่วนใหญ่ มากกว่าที่ปรากฏร่วมกับแร่ทองแดงคาลโคไพไรต์

4.4 การศึกษาจำแนกชนิดแร่โดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน

การวิเคราะห์ชนิดแร่ โดยวิธี XRD อาศัยคุณสมบัติทาง ผลึกของแร่ คือ หน้าผลึกของแร่จะมีลักษณะเป็นระนาบ (Plane) ที่มีขนาดเล็กและขนานกันเป็นจำนวนมาก และระยะห่างระหว่างระนาบ เรียกว่าค่า d-spacing ของแต่ละหน้า ผลึกจะมีค่าคงที่ และเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของแร่แต่ละชนิด ดังนั้นเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบเหล่านี้จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ซึ่งเป็นไปตามกฎของแบรกก (Bragg) คือ

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

โดยที่ λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

d = ค่า d-spacing

θ = Refraction angle

ในเครื่อง XRD จะใช้หัววัดรังสี (Detector) รับรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา โดยแสดงผลออกมาเป็นความเข้มของการนับ (count) หรือ พีค (peak) การแปรความหมายของพีคมุม 2θ และค่า d-spacing หรือประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำแนกชนิดแร่

4.4.1 ตัวอย่างแร่ที่นำมาศึกษาโดย XRD

ตัวอย่างแร่ ที่นำมาศึกษาจำแนกชนิดของแร่ โดย XRD นั้น นอกจากตัวอย่างหมายเลข TKL1-01 ถึง TKL1-07 จำนวน 7 ตัวอย่างนั้น ยังได้นำตัวอย่างจากการทดลองลอยแร่ครั้งที่ 4 ซึ่งนำเอาเฉพาะ แร่ป้อนที่เป็น Copper cleaner concentrate (TKL4-01) หัวแร่ทองแดงที่

ทำความสะอาดซ้ำ (Copper recleaner concentrate) (TKL4-02) และหางแร่ (Copper recleaner tailing) (TKL4-03) มาศึกษา โดยมีผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะมีค่าดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะมีค่าในการทดลองลอยแร่ครั้งที่ 4

Sample ID: High Au		Au (ppm)	Cu (%)	Fe (%)	S (%)	Ag (ppm)	Weight (%)
Feed	-	11.87	0.53	37.98	37.98	6.68	100.00
Copper Recleaner Conc.	TKL4-02	124.39	12.00	30.87	36.87	14.48	4.08
Copper Recleaner Tail	TKL4-03	27.49	4.10	38.69	NA	8.74	0.31
Copper Cleaner Tail	-	21.36	0.19	34.85	12.31	7.71	2.07
Iron Rougher Conc.	-	15.93	0.06	49.33	38.29	9.08	30.20
Iron Rougher Tail	-	2.30	0.01	33.14	12.76	4.99	63.34

4.4.2 ผลการศึกษาแร่ตัวอย่างโดย XRD

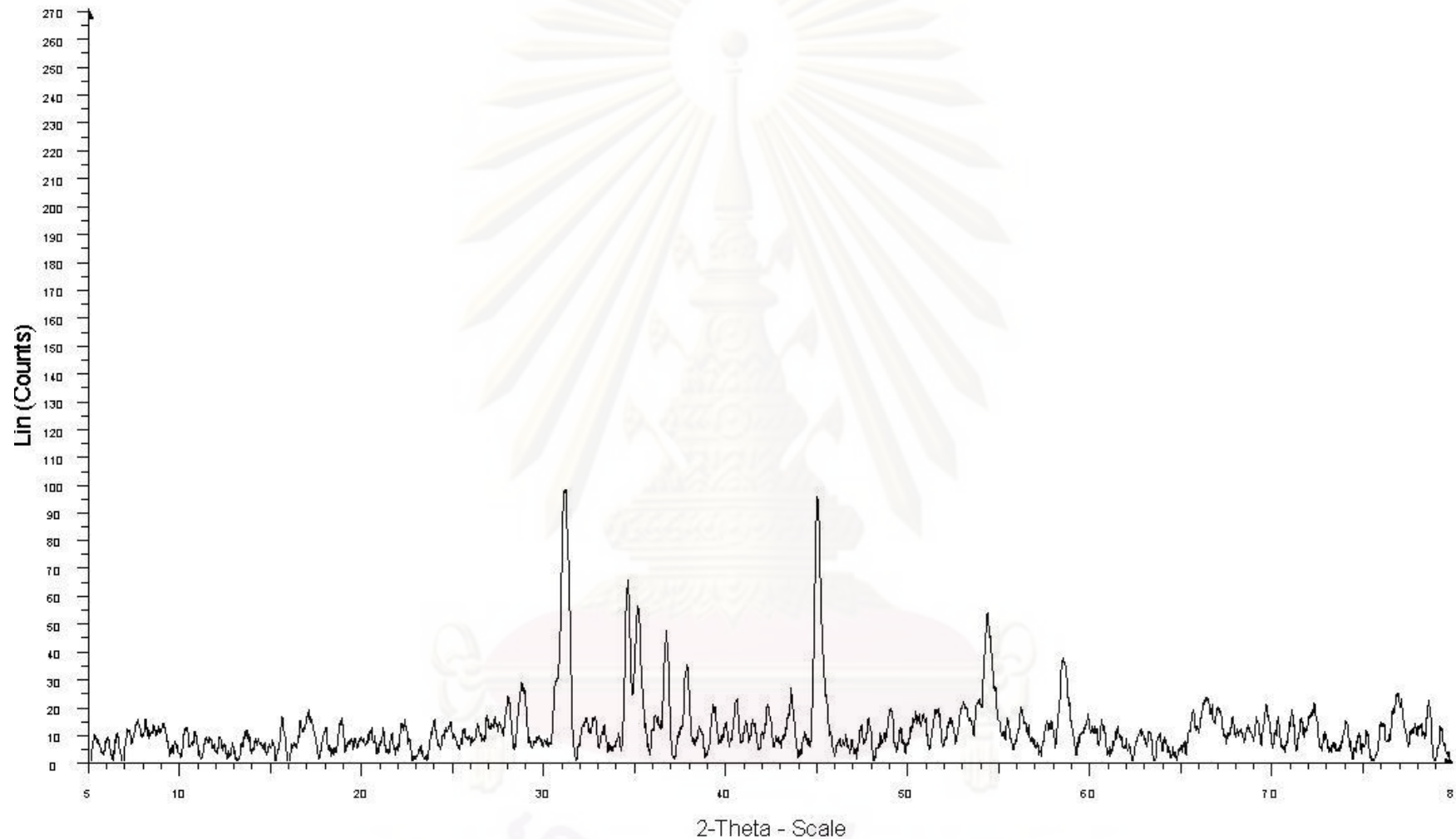
ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เดี่ยวเบน หมายเลข TKL1-01 ถึง TKL 1-07 และ TKL3-01 ถึง TKL3-03 ได้ผลดังแสดงใน รูปที่ 4.67 – 4.76 และการเปรียบเทียบรูปแบบของพีค กับชนิดของแร่ จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 4.77 - 4.85

รูปที่ 4.77 - 4.78 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบของพีค (Search match) กับรูปแบบพีคในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของตัวอย่างหมายเลข TKL1-02 ซึ่งเป็นหัวแร่เหล็กที่ได้จากการทดลองลอยแร่ กับพีคของทองคำ แร่พิริโรไทต์

รูปที่ 4.79 - 4.781 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบของพีค (Search match) กับรูปแบบพีคในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของตัวอย่างหมายเลข TKL1-04 ซึ่งเป็นหัวแร่ทองแดงที่ได้จากการทดลองลอยแร่ กับพีคของทองคำ แร่คาลโคไพไรต์ และแร่เทนแนนไทต์

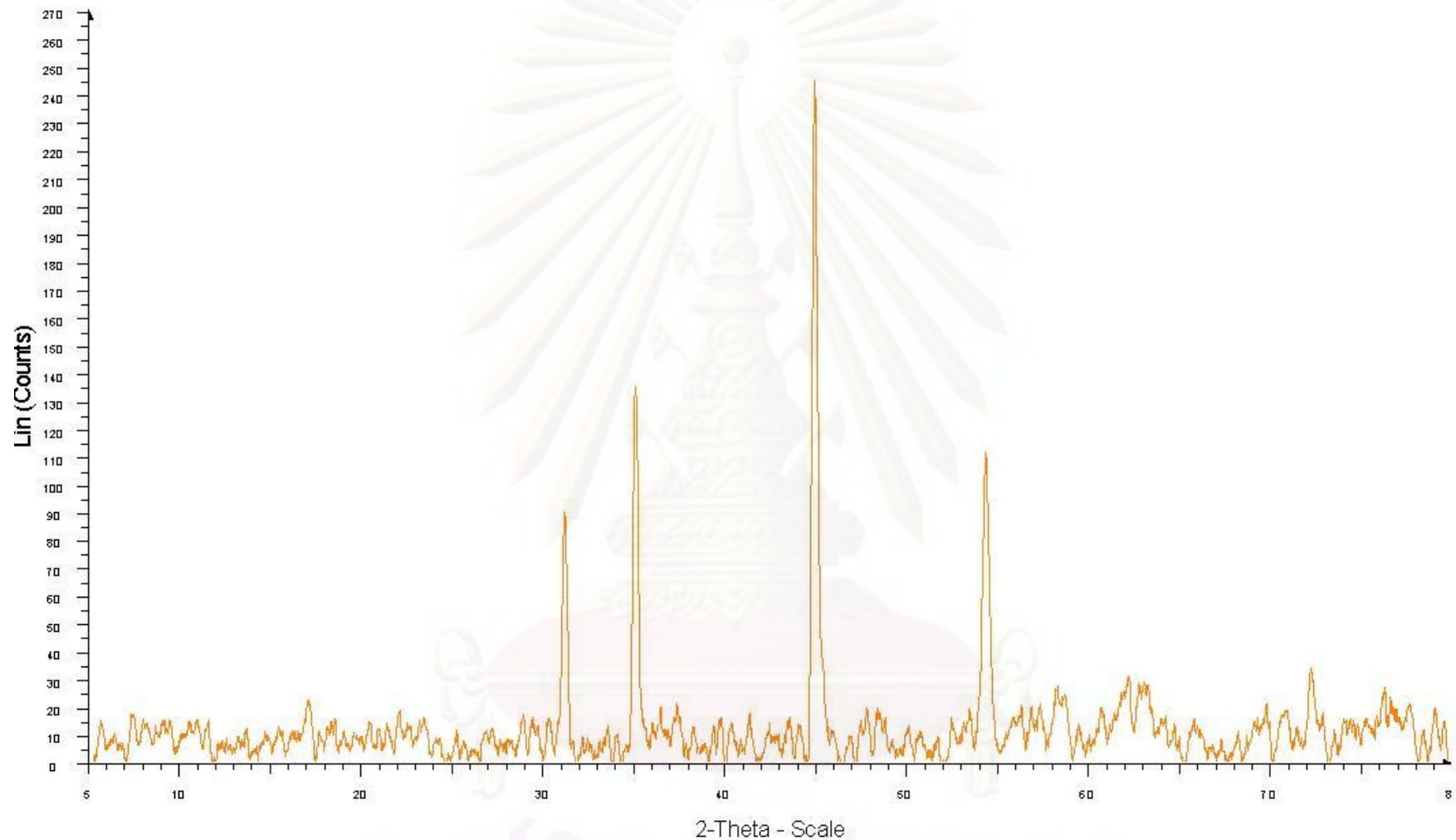
รูปที่ 4.82- 4.784 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบของพีค (Search match) กับรูปแบบพีคในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของตัวอย่างหมายเลข TKL4-02 ซึ่งเป็นหัวแร่ทองแดง ที่ได้จากการทดลองลอยแร่ขั้นตอนการทำความสะอาดซ้ำ กับพีคของ ทองคำ แร่คาลโคไพไรต์ และแร่เทนแนนไทต์

รูปที่ 4.85 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบของพีค (Search match) กับรูปแบบพีคในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของตัวอย่างหมายเลข TKL4-03 ซึ่งเป็นหางแร่ทองแดง ที่ได้จากการทดลองลอยแร่ขั้นตอนการทำความสะอาดซ้ำ กับพีคของแร่พิริโรไทต์



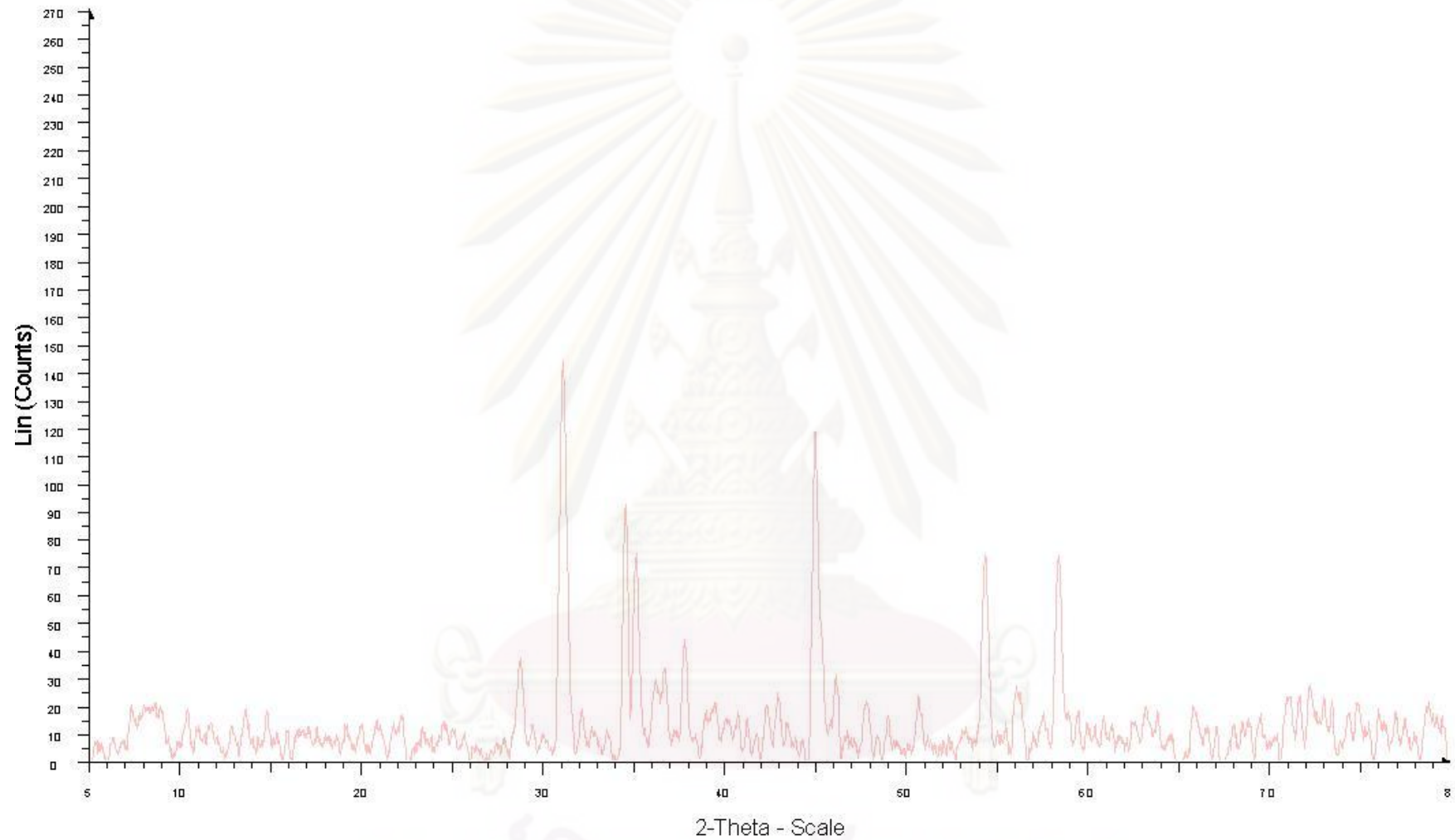
File: TKL1-01.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1233224960 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.00 ° - X:
 Operations: Smooth 0.266 | Background 1.000,1.000 | Import

รูปที่ 4.67 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-01



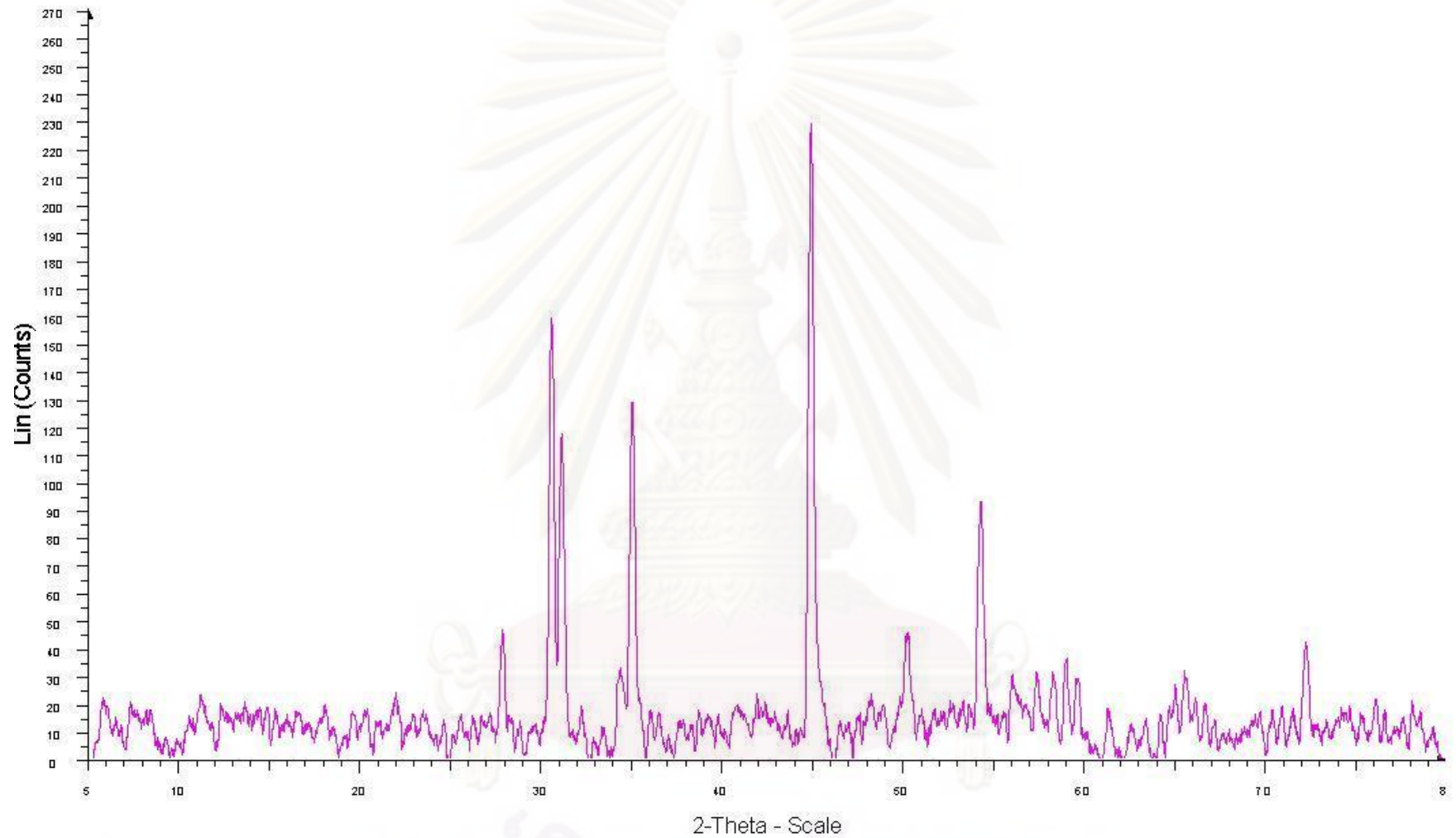
File: TKL1-02.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1233229696 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.00 ° - X:
 Operations: Smooth 0.266 | Background 1.000,1.000 | Import

รูปที่ 4.68 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-02



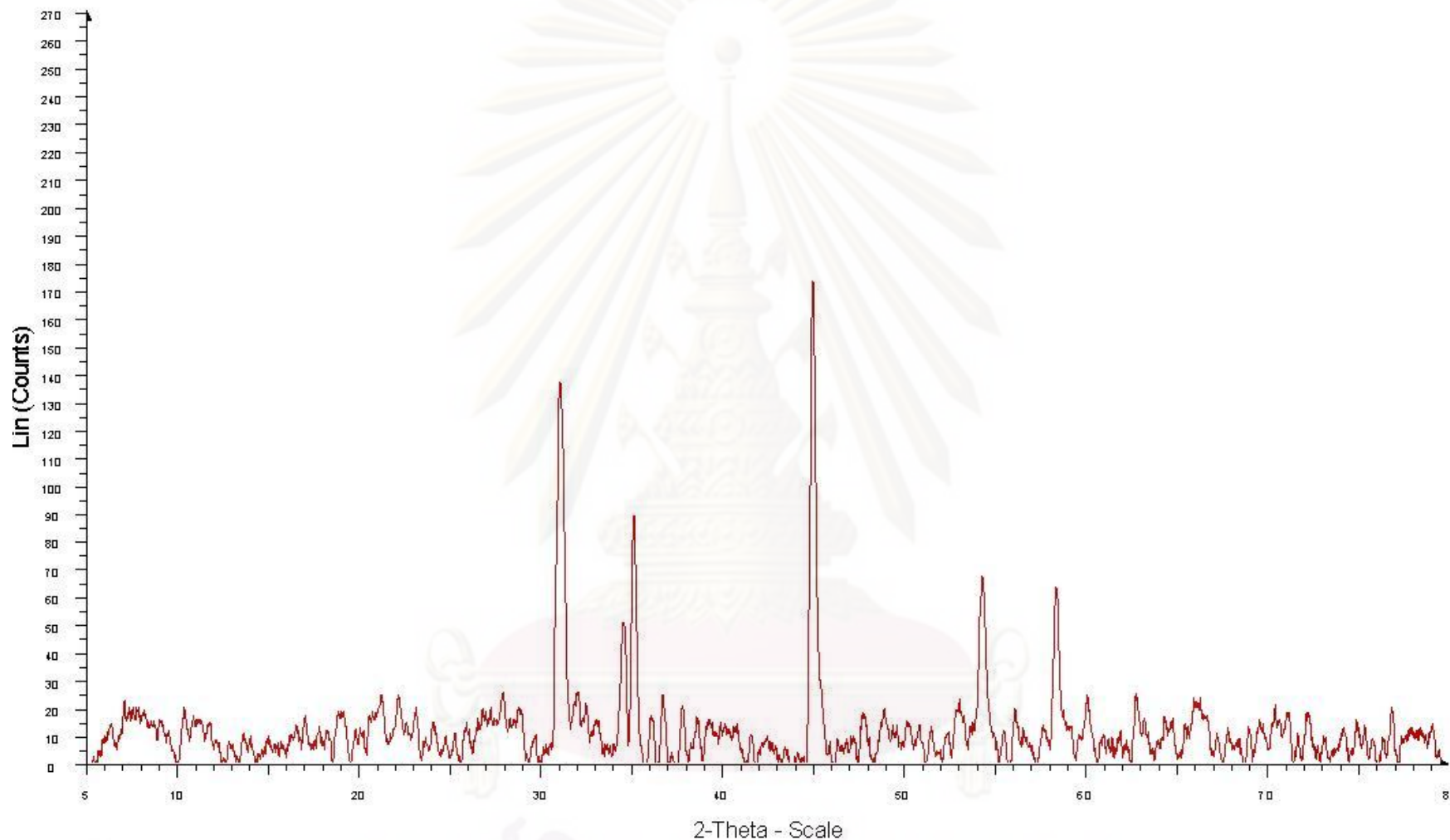
File: TKL1-03.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1233234176 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.00 ° - X:
 Operations: Smooth 0.269 | Background 1.000,1.000 | Import

รูปที่ 4.69 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-03



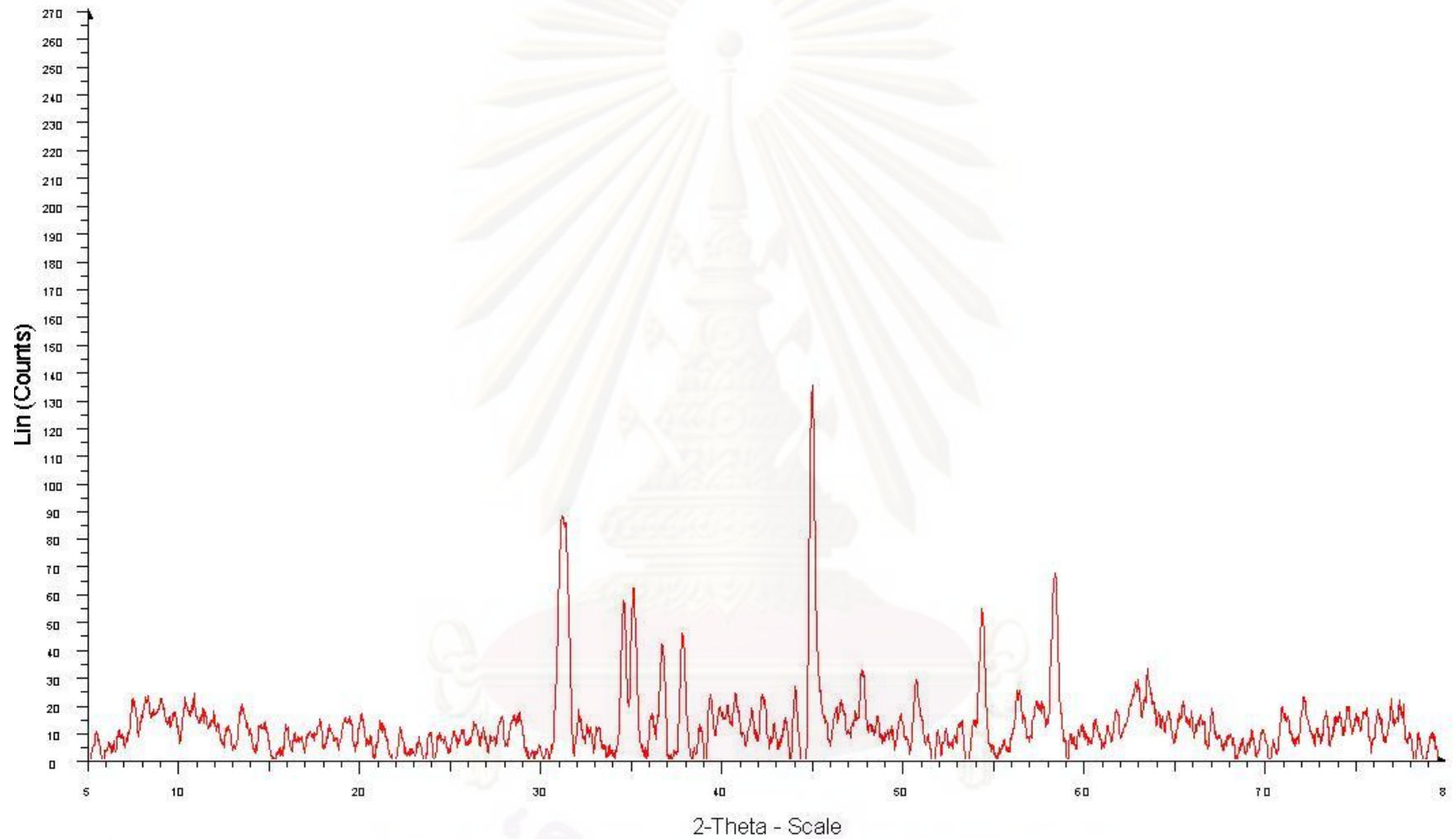
File: TKL1-04.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1233239040 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.00 ° - X:
 Operations: Smooth 0.266 | Background 1.000,1.000 | Import

รูปที่ 4.70 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-04



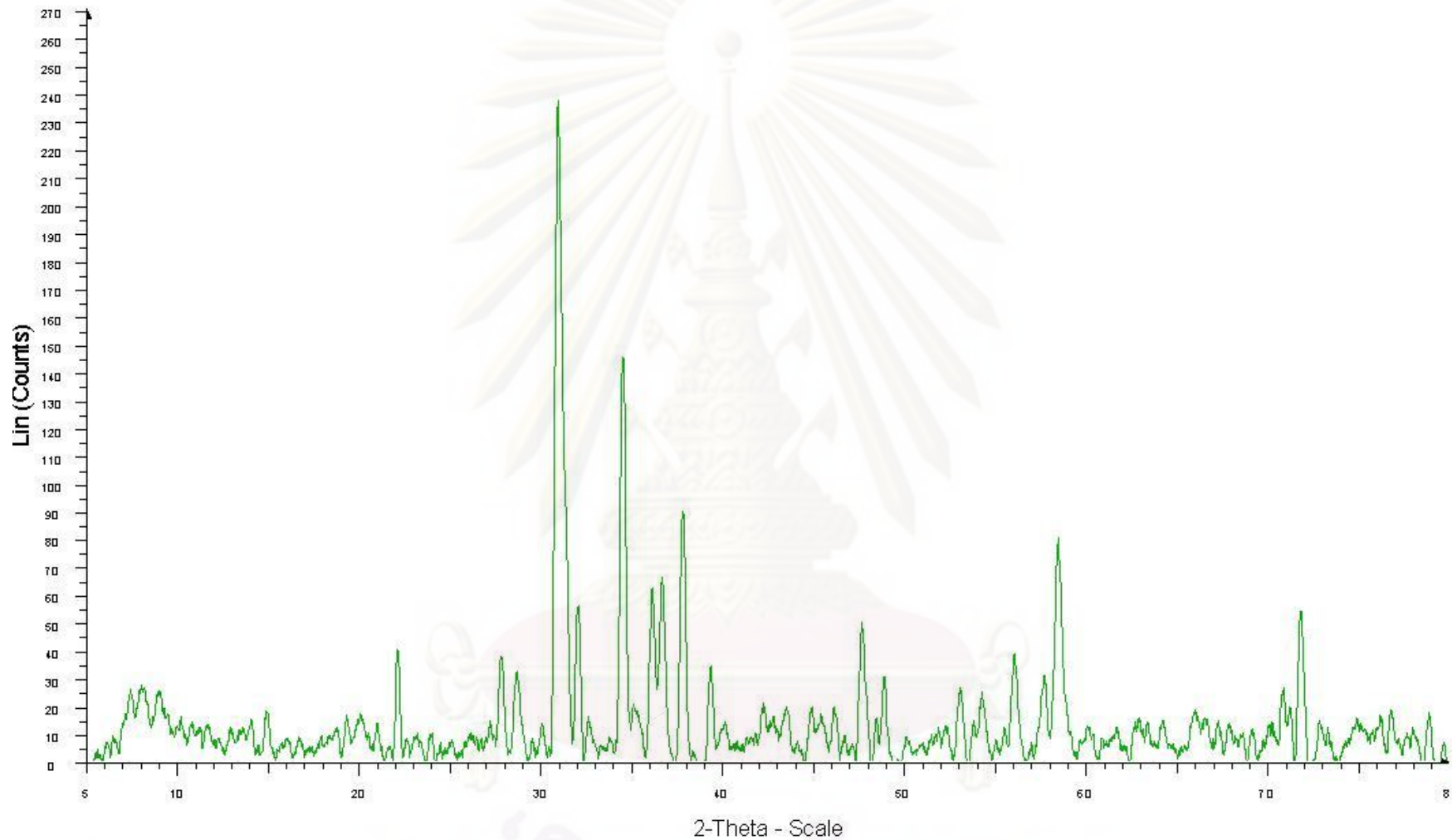
File: TKL1-05.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1233564928 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.00 ° - X:
 Operations: Smooth 0.266 | Background 1.000,1.000 | Import

รูปที่ 4.71 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-05



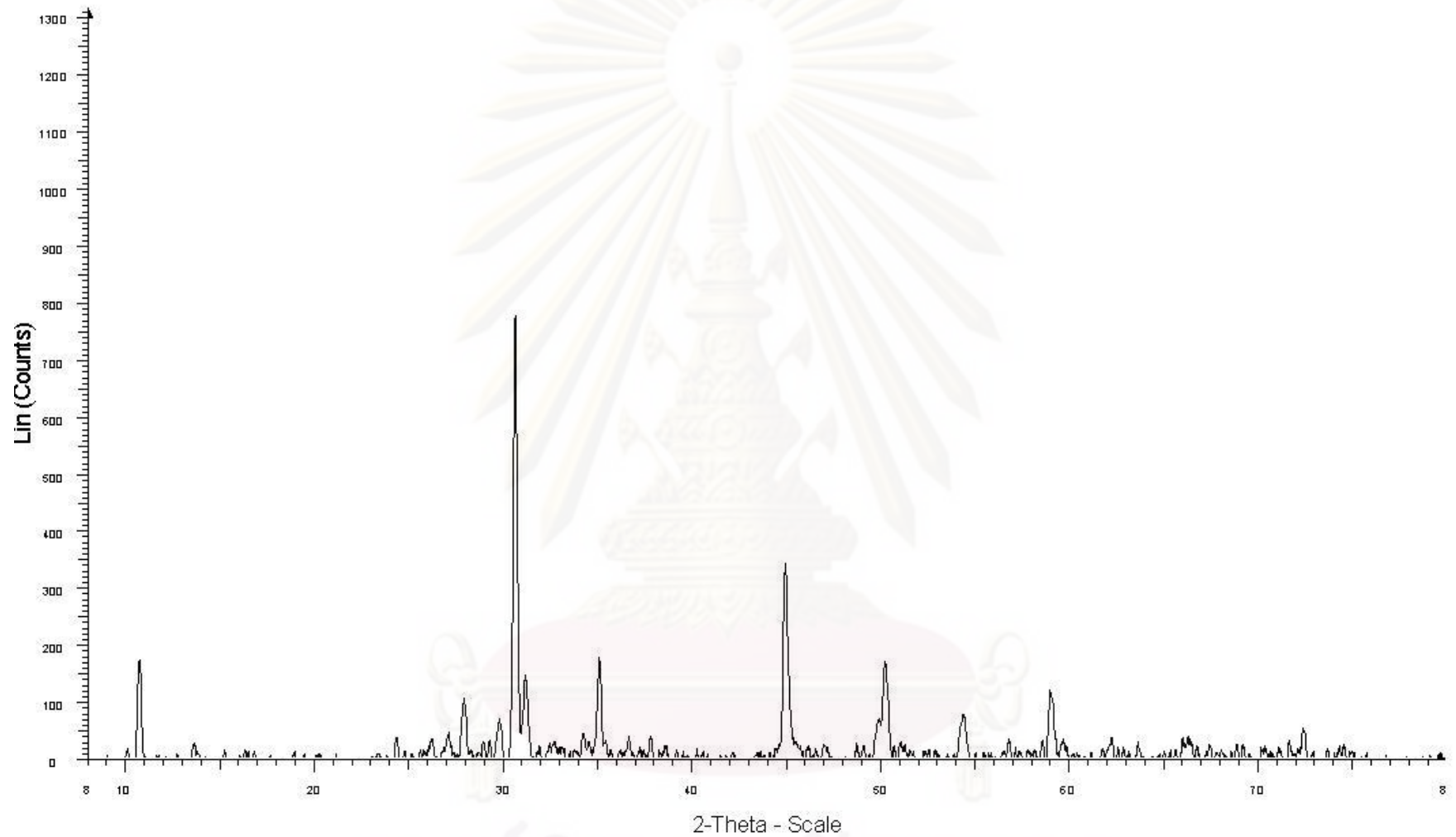
File: TKL1-06.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1233572992 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.00 ° - X:
 Operations: Smooth 0.266 | Background 1.000,1.000 | Import

รูปที่ 4.72 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-06



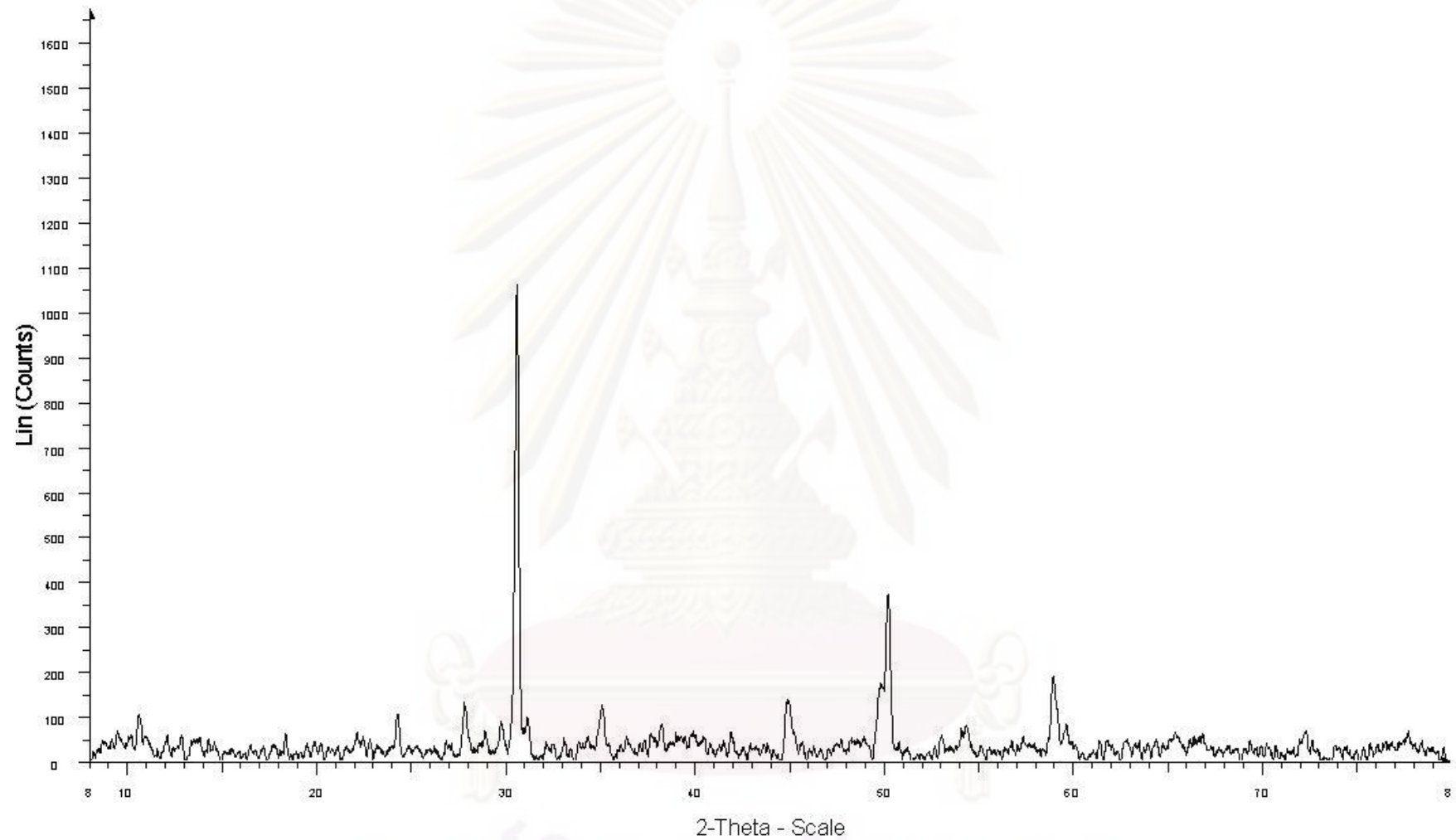
File: TKL1-07.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1233580288 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.00 ° - X:
 Operations: Smooth 0.266 | Background 1.000,1.000 | Import

รูปที่ 4.73 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-07



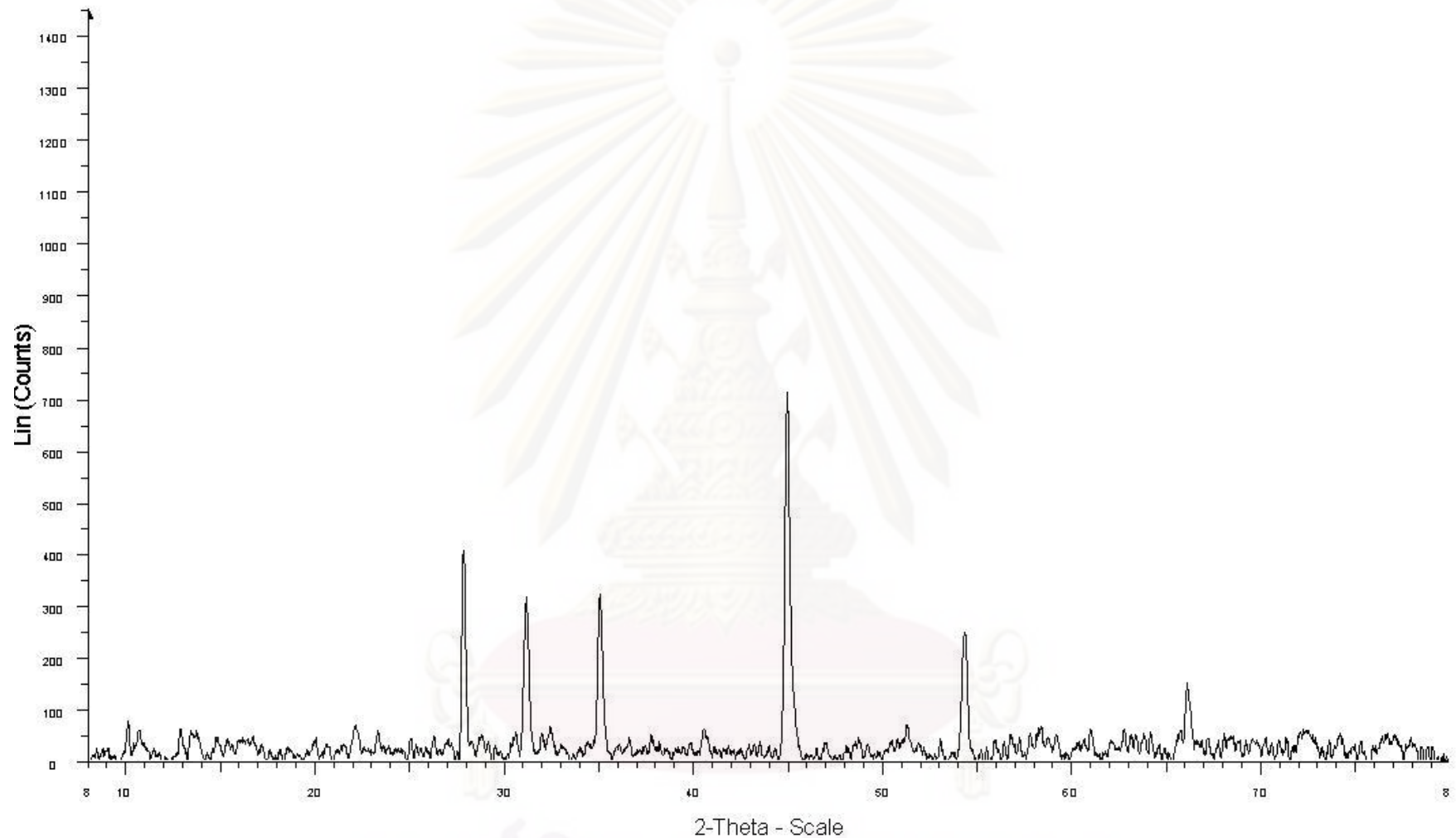
File: TKL4-01 (FP Feed).raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 8.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 2.4 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1251990144 s - 2-Theta: 8.000 ° - Theta: 4.000 ° - Chi: 0.00 ° - Phi:
 Operations: Background 1.202,1.000 | Smooth 0.150 | Import

รูปที่ 4.74 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL4-01



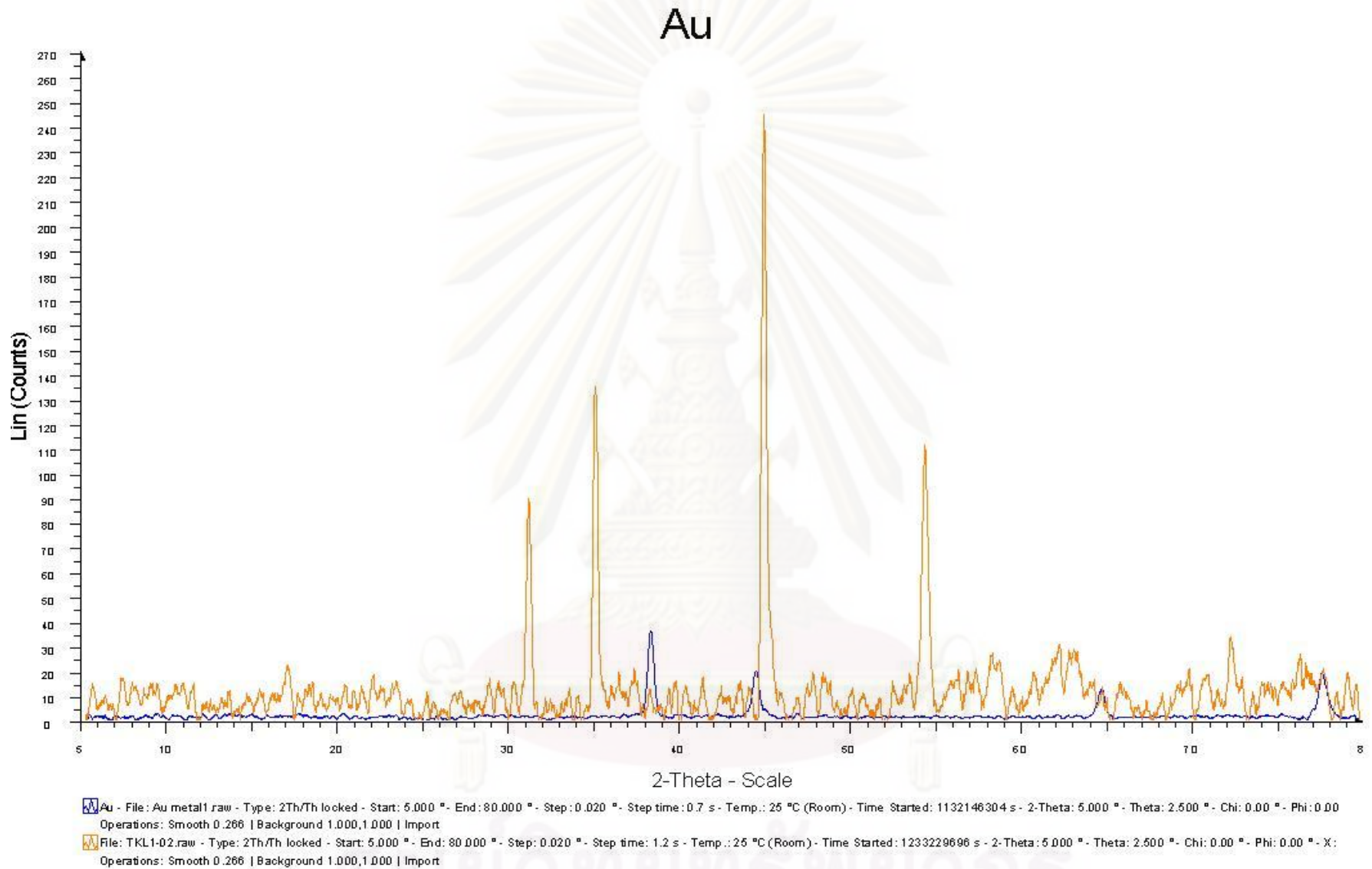
File: TKL4-02 (FP Conc).raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 8.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 2.4 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1251995776 s - 2-Theta: 8.000 ° - Theta: 4.000 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: Operations: Smooth 0.150 | Background 1.202,1.000 | Import

รูปที่ 4.75 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL4-02



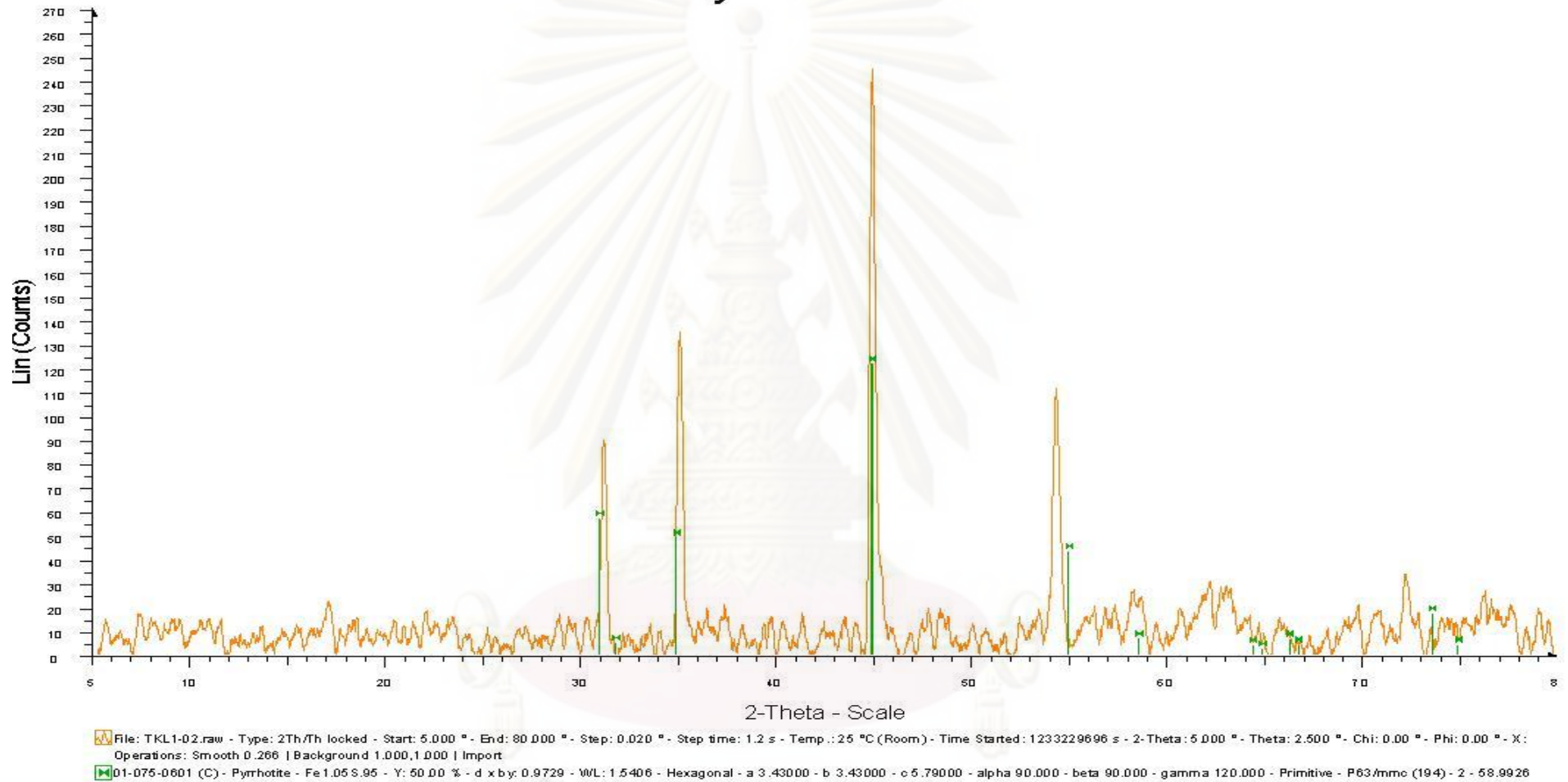
File: TKL4-03 (FP Tail).raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 8.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 3.6 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1252005632 s - 2-Theta: 8.000 ° - Theta: 4.000 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.202,1.000 | Import

รูปที่ 4.76 ผลการวัด (Measurement) และค่า d-spacing โดยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL4-03

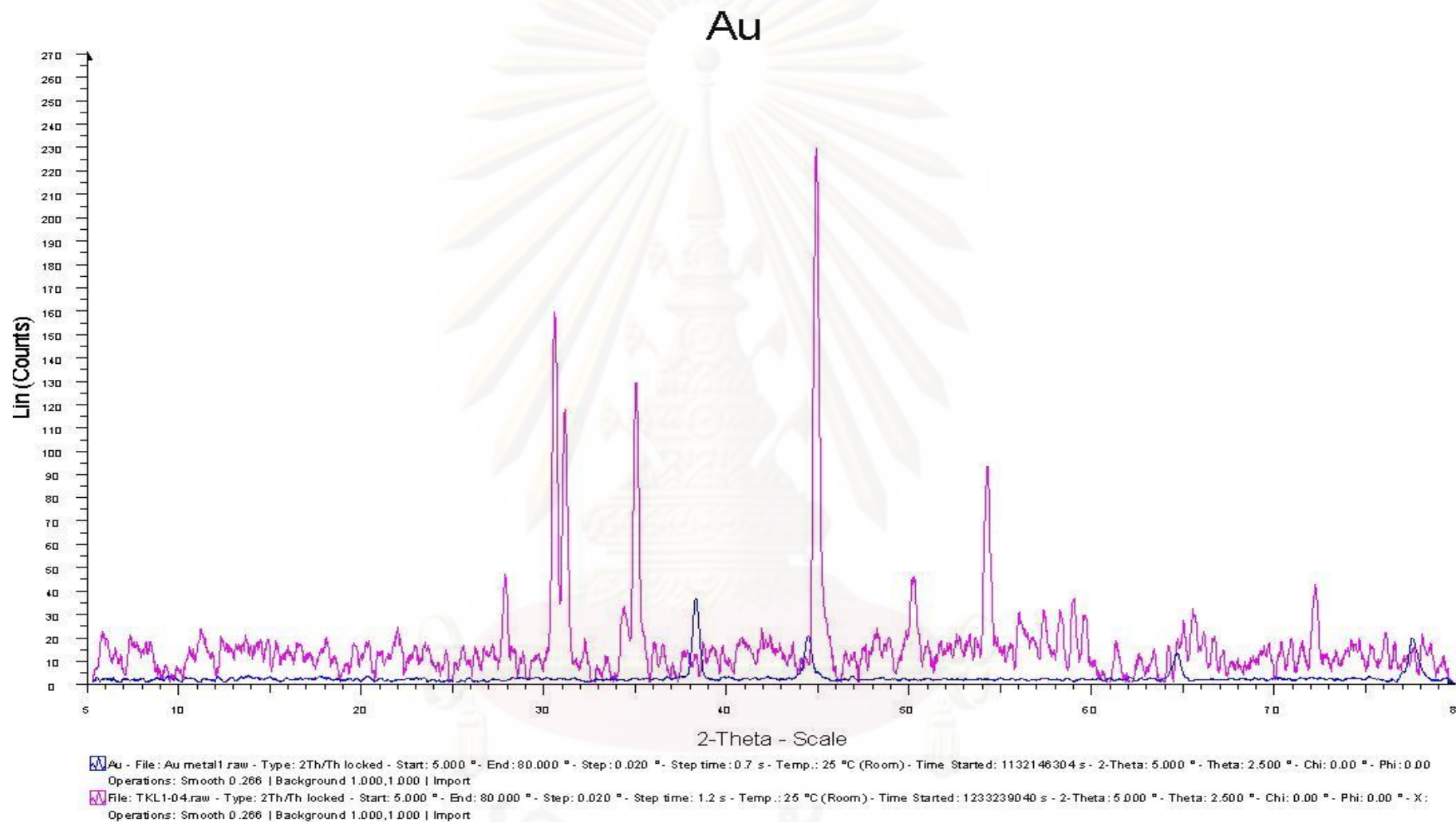


รูปที่ 4.77 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-02 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพิก (Search match) กับรูปแบบพิกในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของทองคำ

Pyrrhotite

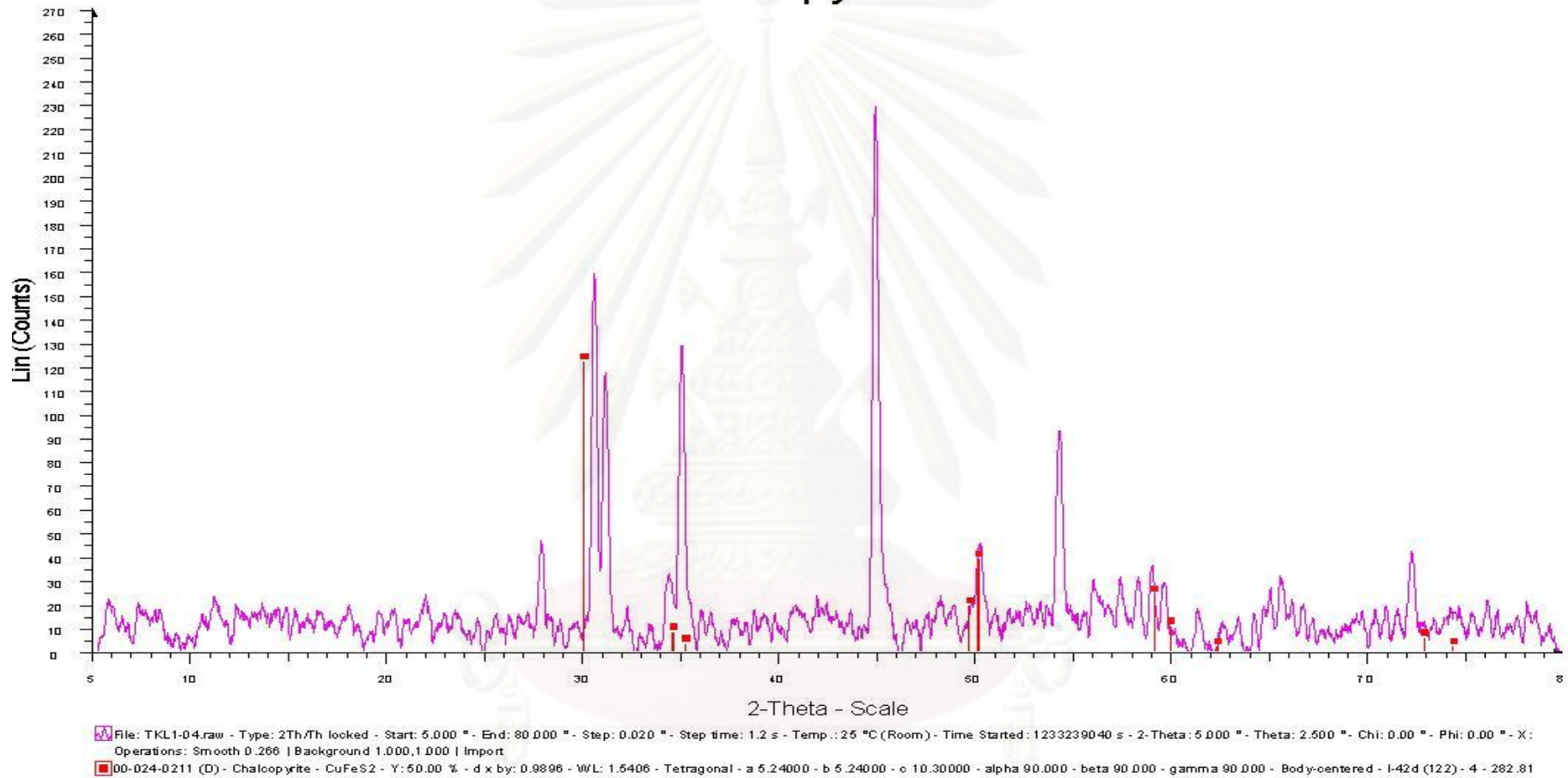


รูปที่ 4.78 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-02 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพิก (Search match) กับรูปแบบพิกในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแร่ไพร์ไรต์



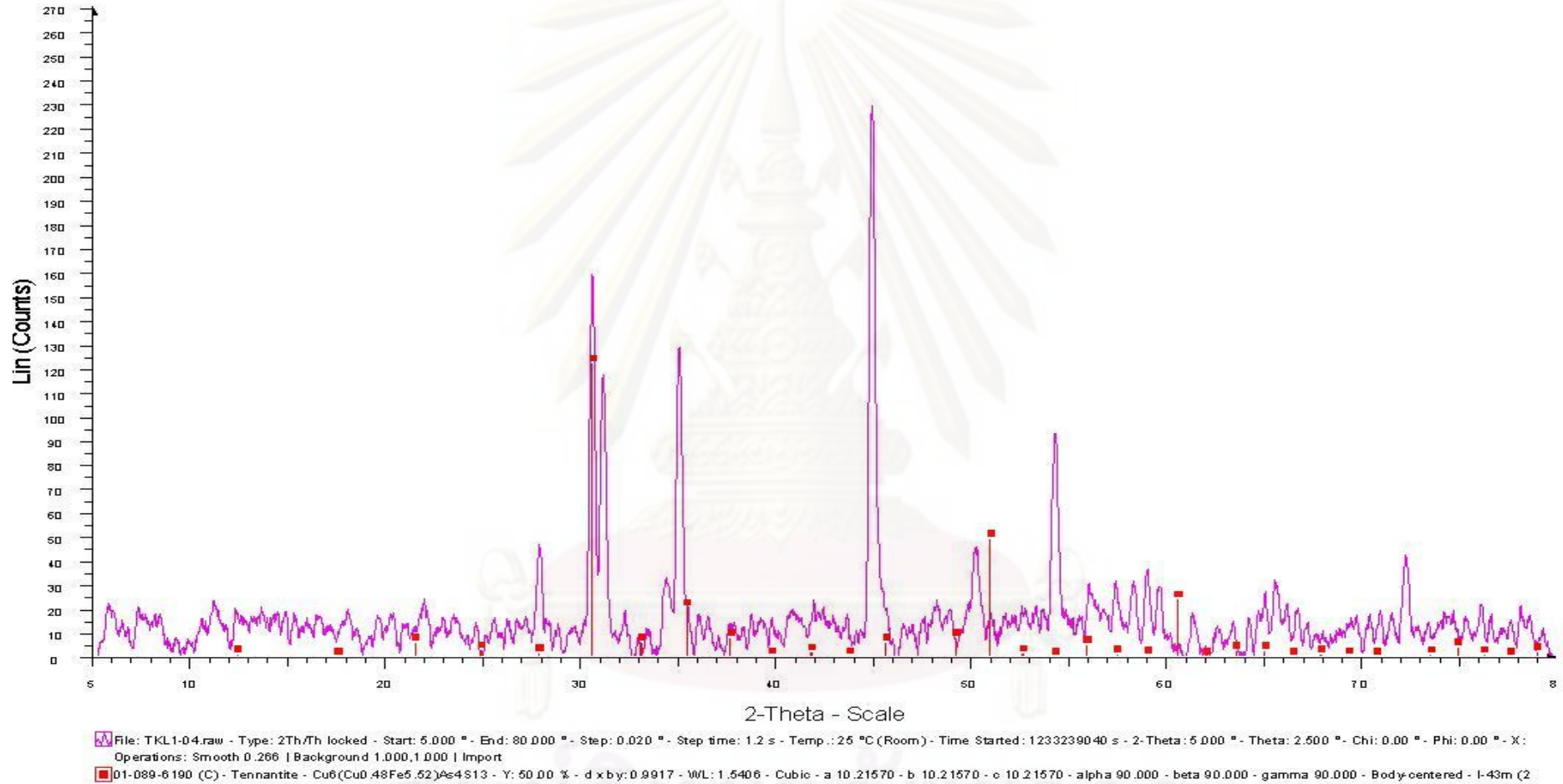
รูปที่ 4.79 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-04 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพีค (Search match) กับรูปแบบพีคในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของทองคำ

Chalcopyrite

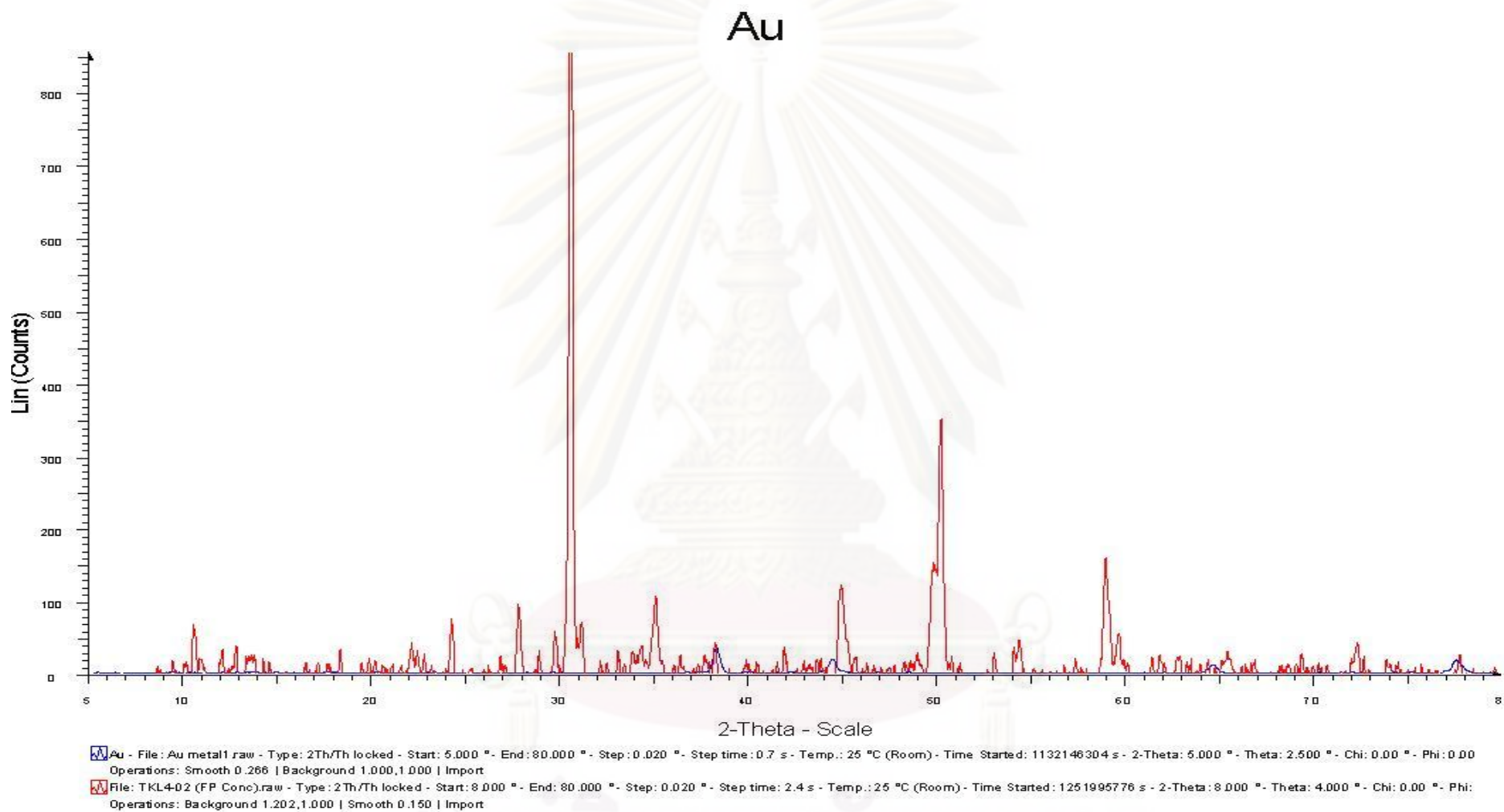


รูปที่ 4.80 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-04 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพีค (Search match) กับรูปแบบพีคในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แร่คาลโคไพไรต์

Tennantite

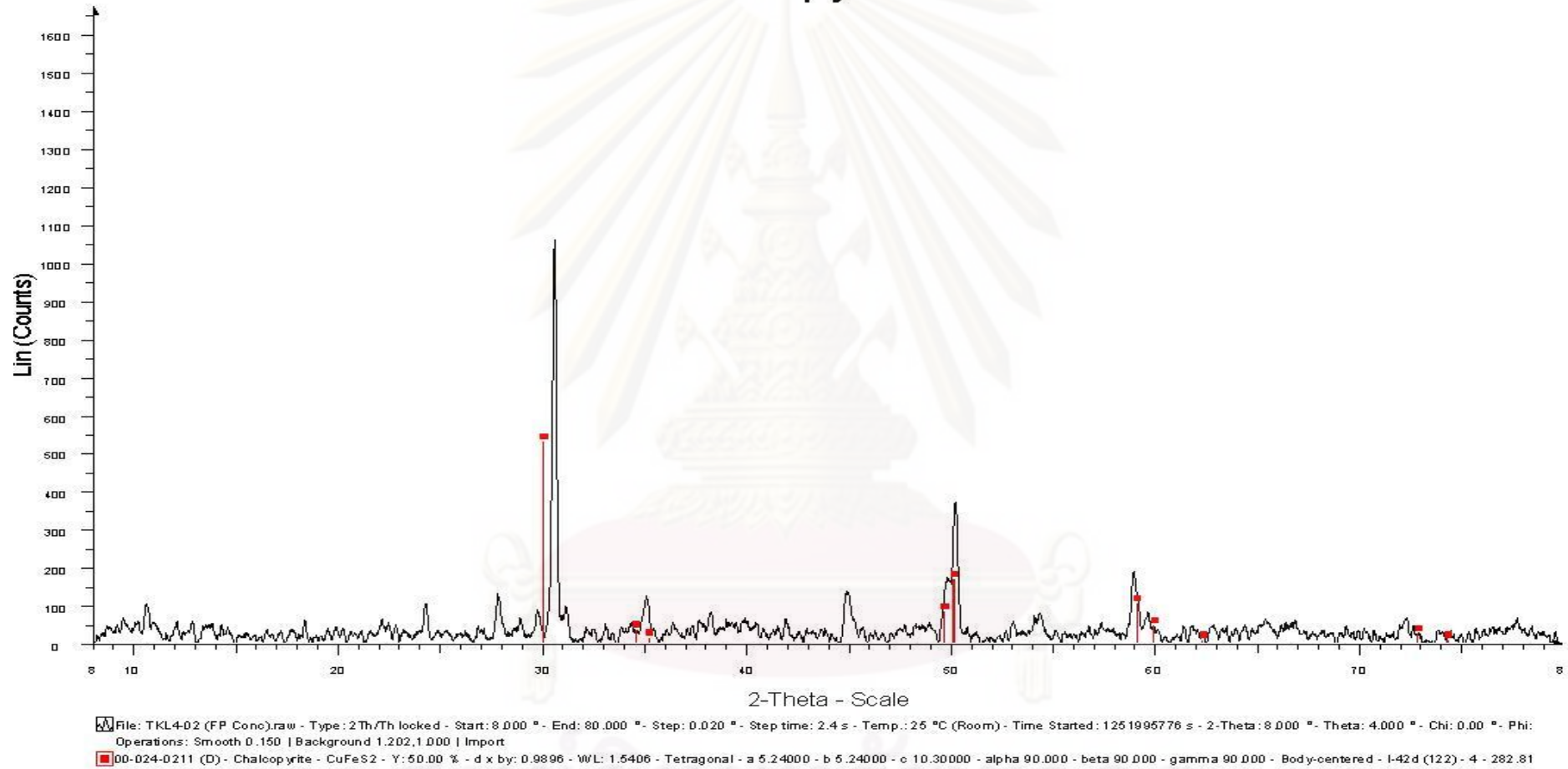


รูปที่ 4.81 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL1-04 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพิก (Search match) กับรูปแบบพิกในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แร่เทนแนนไทต์



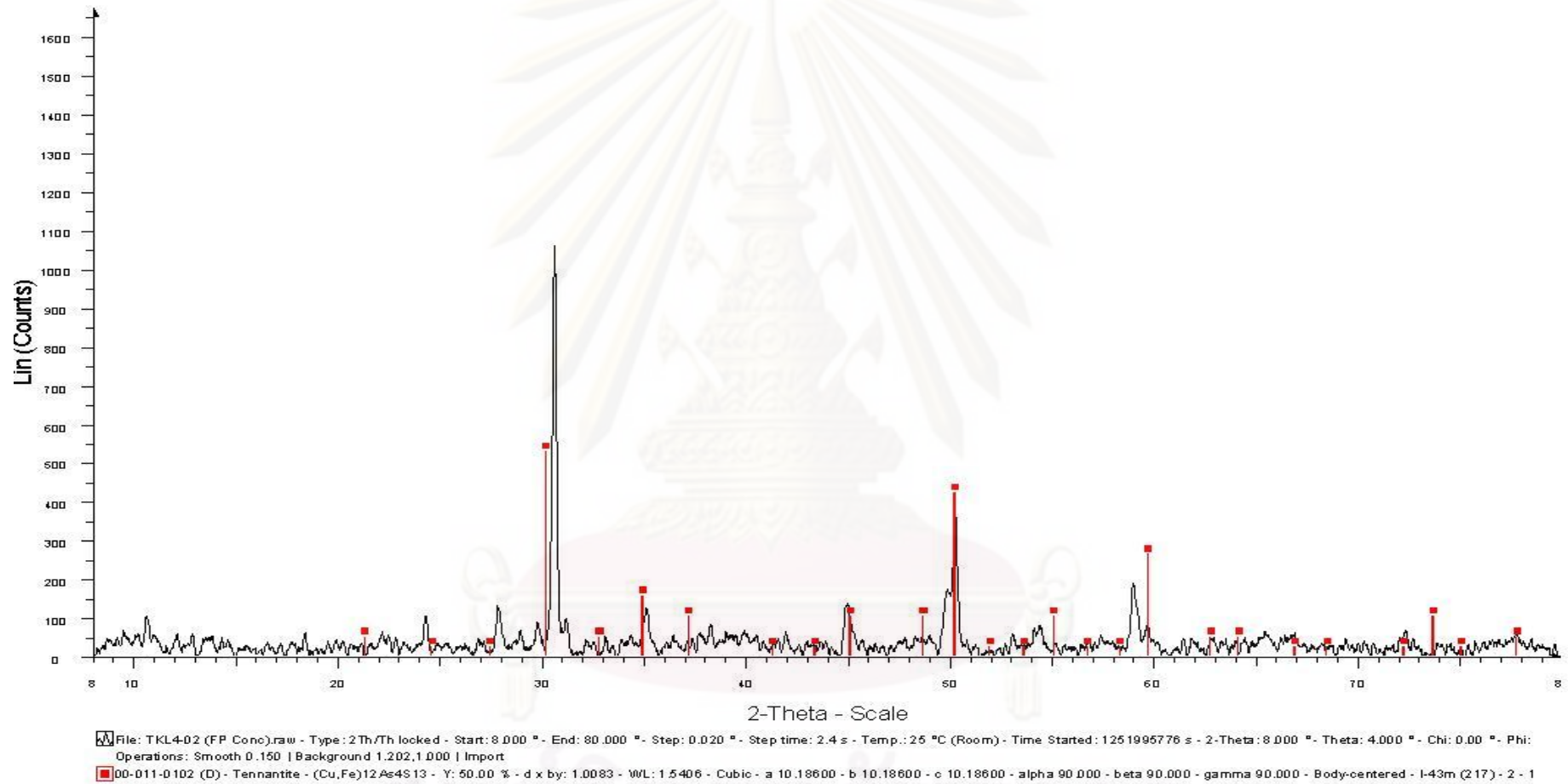
รูปที่ 4.82 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL4-02 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพีค (Search match) กับรูปแบบพีคในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของทองคำ

Chalcopyrite



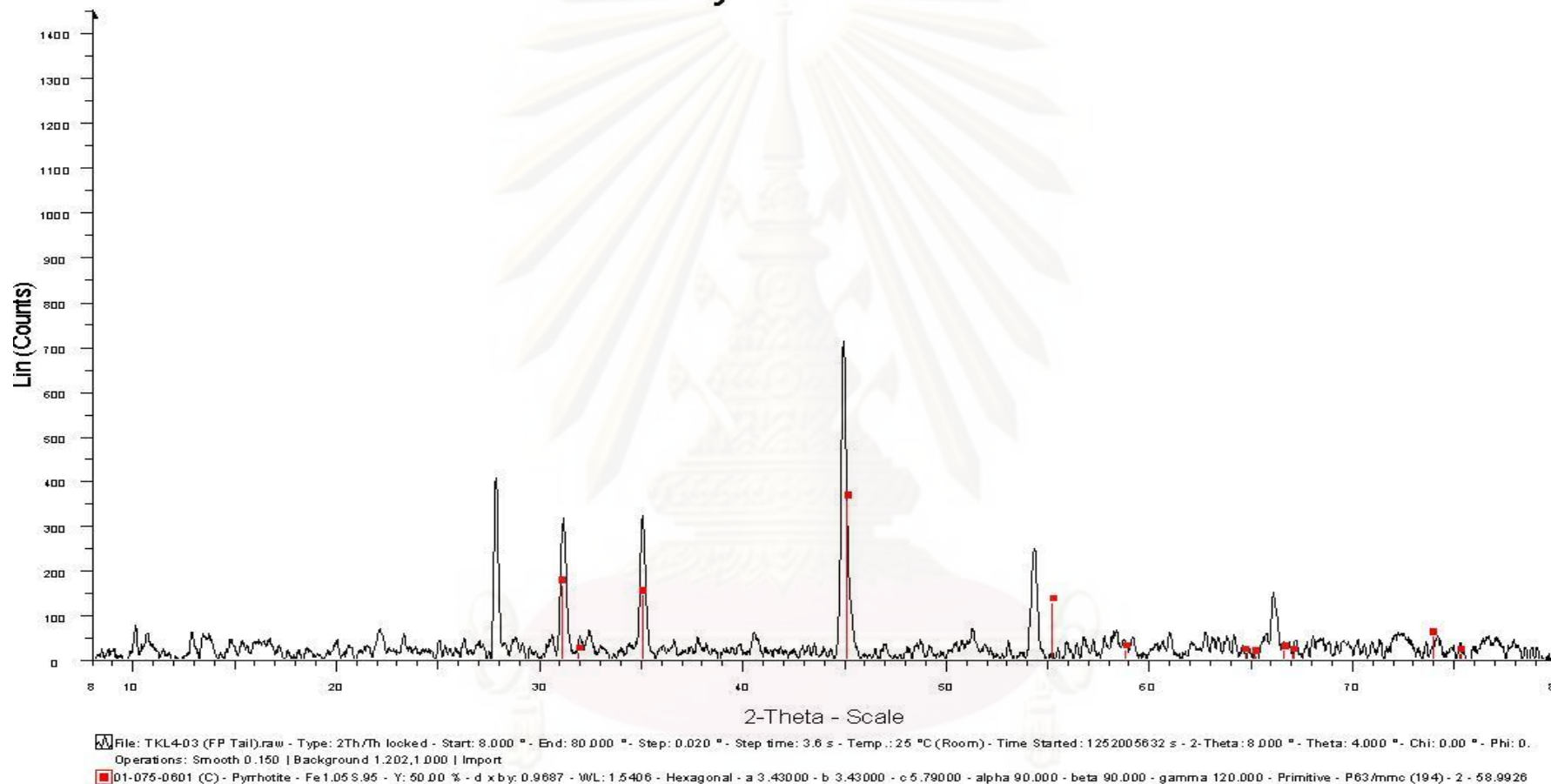
รูปที่ 4.83 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL4-02 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพิก (Search match) กับรูปแบบพิกในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แร่คาลโคไพไรต์

Tennantite



รูปที่ 4.84 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL4-02 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพิก (Search match) กับรูปแบบพิกในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แร่เทนแนนไทต์

Pyrrhotite



รูปที่ 4.85 ผลการจำแนกชนิดแร่ ของตัวอย่างแร่หมายเลข TKL4-03 โดยวิธีเปรียบเทียบรูปแบบของพิกัด (Search match) กับรูปแบบพิกัดในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แร่พิไรไรท์

4.5 สรุปผล และข้อคิดเห็นในการศึกษาทางแร่วิทยา

จากข้อมูลรายงานธรณีวิทยาของแหล่งแร่ภูทับฟ้า และจากผลการศึกษาโดยอาศัยการศึกษาหลายๆ วิธีร่วมกัน ได้แก่ การศึกษาภายใต้ กล้องจุลทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์ธาตุแบบ EPMA ตลอดจนการศึกษาโดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนนั้น สรุปได้ว่าแร่ในกลุ่มซัลไฟด์ที่อยู่ลึกลงไปของแหล่งแร่ภูทับฟ้านั้น มีการเกิดของแร่ทองแดงซัลไฟด์ หรือ แร่คาลโคไพไรต์ (CuFeS_2) ที่เกิดจากการ Exsolution ขึ้นจากแร่ไพไรต์ (FeS_2) ที่อุณหภูมิสูง โดยมีไอออนของ Cu เข้าไปแทนที่ไอออนของโครงสร้างเดิมเรียกว่า Solid-Solution (สารละลายของแข็ง)

และจากผลการศึกษาของ Surasak Yamned, 1999 เรื่อง Ore Mineragraphy ของแหล่งแร่นี้ ทำให้พบไพไรต์และคาลโคไพไรต์ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการพบทองคำที่เป็นเม็ดอิสระ (Free Gold) ในตัวอย่างที่ได้นำมาศึกษา

สำหรับการกระจายตัวของธาตุ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และจากการทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ระหว่างทองคำ ทองแดง เหล็ก และซัลเฟอร์ ทำให้ทราบว่าทองคำนั้นไม่ได้กระจายตัวอยู่กับทองแดง (Au-Cu) แต่ทองคำจะกระจายตัวอยู่กับเหล็ก (Au-Fe) คือแร่ไพไรโรไทต์มากกว่าอยู่แบบ ทองคำ อิสระ (Au) และมากกว่าอยู่กับ เหล็ก และทองแดง (Au-Fe-Cu) และมากกว่าอยู่กับทองแดง (Au-Cu) ส่วนการกระจายตัวของทองแดงนั้นจะอยู่ร่วมกับเหล็ก (Fe-Cu) ซึ่งเป็นแร่คาลโคไพไรต์มากกว่าอยู่แบบทองแดงอิสระ (Cu)

หัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ (Cu-Fe-S) ที่ได้จากการทดลองลอยแร่ขึ้นมานั้นสรุปได้ว่าเป็นแร่คาลโคไพไรต์ ที่ยังคงมีแร่เหล็กซัลไฟด์ (Fe-S) ที่อยู่ในรูปของแร่ไพไรโรไทต์หลงเหลืออยู่ โดยอาศัยการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ การวิเคราะห์ธาตุแบบ EPMA และการจำแนกชนิดแร่โดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนที่ไม่พบไพไรต์ และแร่เหล็กซัลไฟด์อื่น รวมไปถึงการวิเคราะห์จากคุณสมบัติของแร่คาลโคไพไรต์ ที่จะต้องมีส่วนประกอบของทองแดงอยู่ที่ประมาณ 34% แต่ในตัวอย่างที่ลอยมาทั้งหมดมีประมาณแค่ครึ่งเดียวคือ 17% นั้นแสดงว่าหัวแร่ทองแดงคาลโคไพไรต์ยังไม่สะอาด โดยมีส่วนผสมของแร่เหล็กไพไรโรไทต์ปะปนอยู่

ปัญหาในการศึกษาด้วย EPMA นั้นพบว่า การดูลักษณะของแร่และการกำหนดตำแหน่งของบริเวณที่ต้องการศึกษาด่วน EPMA เพื่อหาทองคำ ทองแดง และเหล็กนั้น เป็นไปได้ยาก เนื่องจากภาพที่เห็นจากเครื่อง EPMA เป็นภาพขาว-ดำ ที่ได้จากการใช้อิเล็กตรอนส่อง ซึ่งเป็นปัญหาเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การศึกษาแร่ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เพื่อกำหนดตำแหน่งของบริเวณที่สนใจศึกษา จะเป็นวิธีหนึ่งเพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการศึกษาด้วย EPMA ต่อไปและไม่ทำให้เสียเวลาอีกด้วย

แนวทางในการศึกษาต่อคือ พรีโรว์ไต์เป็นแร่ที่สามารถติดแม่เหล็กได้ ถ้าหากมีการนำเอาตัวอย่างแร่ที่ศึกษามาแยกด้วยแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่ง แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทองคำที่พบมากในส่วนของแร่เหล็กซัลไฟด์ หรือทองแดงซัลไฟด์ หรือที่ ังค์ ก็จะสามารถหาแนวทางในการเก็บกลับคืนทองคำ และทองแดงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และเหมาะสมที่สุดได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การศึกษาการเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ โดยกระบวนการลอยแร่

กระบวนการลอยแร่เป็นกระบวนการที่สำคัญและแพร่หลายที่สุดในกระบวนการแต่งแร่ทองคำที่มีเกรดต่ำและตัวแร่เป็นแร่เชิงซ้อนซึ่งไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการแต่งแร่แบบปกติ กระบวนการลอยแร่จึงเป็นกระบวนการแบบเลือกแต่ง (Selective process) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการแต่งแร่เชิงซ้อน ของแร่ซัลไฟด์ที่ประกอบด้วย แร่ทองแดง ซัลไฟด์ที่เป็นแร่คาลโคไพไรต์ กับแร่เหล็กซัลไฟด์ที่เป็นแร่พิริโรไทต์ได้

เหมืองแร่ทองคำ ภูทับฟ้า ของ บริษัท ทุ่งคำ จำกัด แร่จากหน้าเหมือง (Run-of-Mine หรือ ROM) ซึ่งเป็นแร่ปฐมภูมิจะถูกตักใส่รถบรรทุกและทำการขนส่งไปไว้ที่เก็บกองแร่ (ROM Pad) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 จากหน้าเหมืองซึ่งอยู่ภายในกระบวนการผลิต ที่บริเวณเก็บกองแร่นี้ แร่จะถูกเทลงโดยตรงลงในช่องป้อนแร่เพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิต หรือ อาจจะทำกรเทกองลงไปบนกองแร่ที่อยู่ใกล้ๆ กับช่องป้อนแร่ก็ได้ หลังจากนั้นจึงใช้รถตักทำการตักแร่จากกอง เก็บไปใส่ลงในช่องป้อนแร่เพื่อเข้าสู่กระบวนการย่อยต่อไป



รูปที่ 5.1 ที่เก็บกองแร่ (ROM Pad)

ระบบการย่อย ในกระบวนการผลิตทองคำของ บริษัท ทุ่งคำ จำกัด ประกอบด้วยเครื่องย่อยแบบ Primary jaw crusher หนึ่งเครื่อง และเครื่องย่อย Secondary cone crusher อีกสองเครื่อง โดยเครื่องย่อยแบบ Jaw crusher จะสามารถทำงานได้เป็นอิสระจากเครื่องย่อยแบบ Cone crusher ส่วนแร่ซัลไฟด์ซึ่งเป็นแร่ที่แข็งจะต้องทำการย่อยแยกต่างหากเนื่องจากความแข็งของสินแร่

การย่อยครั้งที่สอง และครั้งที่สาม ด้วยเครื่องย่อยแบบ Cone crusher จึงถูกใช้ในการลดขนาดแร่ให้ได้ประมาณ 35 มม. และแร่ที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกส่งไปยังกองเก็บแร่โดยการใส่สายพานลำเลียง (รูปที่ 5.2)



รูปที่ 5.2 แสดงเครื่องย่อยและบดสินแร่ของบริษัท หุ่นคำ จำกัด

แร่ที่ผ่านการย่อยแล้ว จะถูกส่งไปทำการบดละเอียดขั้นที่หนึ่งและสองโดยการลดขนาดอนุภาคแร่โดยใช้ SAG Mill และ Ball mill แร่ที่ผ่านการบดจาก SAG Mill และ Ball mill แล้วจะถูกปั๊มจากส่วนรองรับแร่ที่ผ่านการบดไปยังไซโคลนเพื่อทำการคัดแยกขนาด โดยไซโคลนจะทำงานที่แรงดันเฉลี่ยประมาณ 1.0 PSI

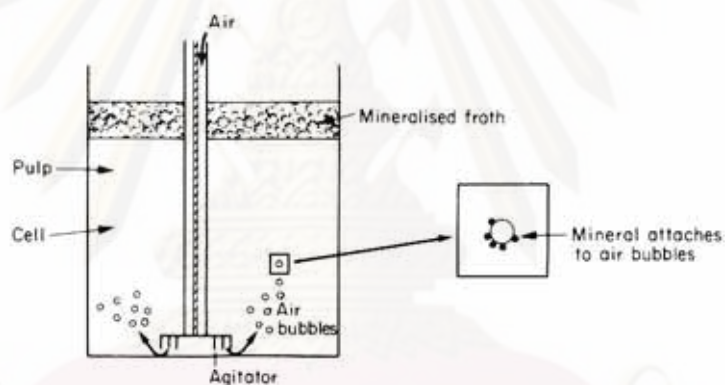
กระบวนการลอยแร่เป็นกระบวนการที่ไวต่อความหนาแน่นของแร่ป้อน ดังนั้นสินแร่ที่ถูกบดจาก Ball mill ซึ่งผ่านการคัดขนาดมาแล้วและมี % solid อยู่ระหว่าง 35-40% จะตกลงมาโดยแรงโน้มถ่วงผ่านไปยังตระแกรงสั่น ซึ่งสามารถคัดแยกวัสดุอื่นๆ เช่น เศษไม้ เส้นลวด และพลาสติกต่างๆ ซึ่งปะปนมากับแร่ ออกไปทิ้งเป็นขยะ ส่วนแร่ที่ผ่านตระแกรงคัดแยกขยะมาแล้วจะถูกปั๊มไปยังถังปรับสภาพซึ่งจะมีการใส่สารเคมีเข้าไปทำการปรับสภาพแร่ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการลอยแร่ต่อไป ในส่วนของแร่ที่ยังบดไม่ ได้ขนาด จะถูกส่งกลับเข้าสู่ Ball mill เพื่อทำการบดซ้ำอีกครั้ง ซึ่งในส่วนของ Ball mill และไซโคลนนี้จะทำงานเป็นระบบปิด (Closed circuit)

การวิเคราะห์ขนาดแร่ที่ออกจากไซโคลนในส่วนของแร่ที่บดได้ขนาด (Overflow) แล้วนั้นเป็นหลักฐานสำคัญในการ กระบวนการ ลอยแร่ เพื่อให้ได้ขนาดในการบดที่ดีที่สุด ซึ่งต้องการอยู่ที่ 80% passing ที่ขนาด 53 ไมครอน ซึ่งหมายความว่า ตัวอย่างที่ผ่านการบดได้ขนาด แล้วนั้นจะต้องผ่านตระแกรงคัดขนาด ขนาด 53 ไมครอน อย่างน้อย 80%

การวิเคราะห์ขนาดของ Overflow ที่ผ่านจากไซโคลอนจะถูกทำเพื่อเป็นตัวระบุประสิทธิภาพในการบดละเอียด และยังช่วยให้ระบบมีการบดที่ดีอีกด้วย

5.1 การศึกษาหลักการลอยแร่ (B.A. Wills, 2006)

การลอยแร่ (Mineral Flotation) อาศัยคุณสมบัติที่แตกต่างทางเคมี ฟิสิกส์ที่ผิวของเม็ดแร่ โดยที่เม็ดแร่ต่างชนิดกัน เมื่ออยู่ในน้ำจะมีแรงดึงดูดกับน้ำไม่เท่ากัน คือเปียกน้ำไม่เท่ากัน เมื่อฟองอากาศเข้าไปในเม็ดแร่ปนน้ำนี้ เม็ดแร่ที่ไม่เปียกน้ำจะมีโอกาสเกาะติดฟองอากาศได้ดีกว่าเม็ดแร่ที่เปียกน้ำ ฟองอากาศจะพาเอาเม็ดแร่ที่เกาะติดลอยขึ้นสู่น้ำ เมื่อปาดฟองตอนบนออกจะได้ส่วนที่เรียกว่า ส่วนลอยขึ้นมา (Float หรือ Froth) ส่วนที่ไม่เกาะติดฟองอากาศจะจมอยู่ในน้ำตามเดิม เรียกว่าส่วนจม (Sink) การลอยแร่ ใช้งานแพร่หลายในการคัดแยกและปรับปรุงคุณภาพแร่โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มแร่ซัลไฟด์ รูปที่ 5.3 แสดงการลอยแร่ด้วยเซลล์ลอยแร่



รูปที่ 5.3 เครื่องมือลอยแร่ (Mineral Flotation Cell) (B.A. Wills, 2006)

ในทางปฏิบัติ การลอยแร่จะต้องใช้น้ำยาเคมีหลายชนิดเข้าช่วยเพื่อเปลี่ยนสภาพของผิวแร่ให้มีคุณสมบัติเหมาะกับการลอยแร่ได้ดียิ่งขึ้น กล่าวคือทำให้เม็ดแร่ที่ต้องการจะลอยมีคุณสมบัติเกาะติดฟองได้ดี ส่วนเม็ดแร่อื่นที่ไม่ต้องการจะไม่สามารถเกาะติดฟองอากาศได้ เรียกว่าเป็นการลอยแร่โดยตรง (Direct flotation) หรือในทางตรงกันข้ามสามารถลอยแร่ที่ไม่ต้องการขึ้นมาจากแร่ที่ต้องการได้ เรียกว่าการลอยแร่กลับ (Reverse flotation) การลอยแร่ออกจากกันต้องใช้ น้ำยาเคมี (Chemical reagent) หลายชนิดเข้าช่วยเพื่อเปลี่ยนสภาพของผิวเม็ดแร่ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการลอยได้ดียิ่งขึ้น เช่นทำให้เม็ดแร่ที่ต้องการจะลอยมีคุณสมบัติเกาะฟองอากาศเหนียวเพียงพอ ไม่แตกง่าย เหมาะที่จะทำให้แร่เกาะฟองอากาศขึ้นมา และมักต้องสารเคมีบางชนิดเพื่อช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ให้เหมาะสม น้ำยาเคมีแต่ละชนิดมักใช้ในปริมาณเพียง

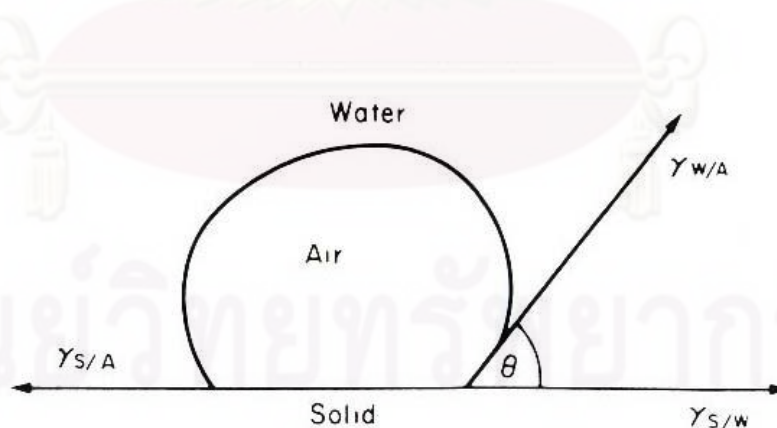
เล็กน้อย จึงไม่ทำให้ส่วนประกอบทางเคมีของเม็ดแร่เปลี่ยนแปลงไปหากมีคุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป ก็จะเปลี่ยนไปเฉพาะผิวของเม็ดแร่เป็นชั้นบางๆ เท่านั้น

ขนาดของเม็ดแร่ที่จะทำการลอยขึ้นมาจะต้องไม่มีขนาดใหญ่ หรือเล็กจนเกินไป เพราะถ้าเม็ดแร่มีขนาดใหญ่ฟองอากาศอาจไม่สามารถรับน้ำหนักเม็ดแร่ได้ เม็ดแร่อาจหลุดออกไป หรือไม่ฟองอากาศนั้นจะแตกเสียก่อนที่จะพ่นผิวน้ำ ทำให้การแยกไม่ได้ผล แต่ถ้าเม็ดแร่มีขนาดละเอียดมากเกินไปก็จะทำให้การแยกไม่ได้ผลเช่นกัน เนื่องจากฝุ่นของเม็ดแร่ที่ไม่ต้องการให้ลอยขึ้นมาอาจลอยติดขึ้นมาอยู่กับฟองอากาศ หรือหากมีขนาดละเอียดจนเกินไป เม็ดแร่จะไม่สามารถแทรกชั้นน้ำที่ห่อหุ้มฟองอากาศอยู่ได้ ขนาดของเม็ดแร่ที่เหมาะสมต่อการแยกด้วยวิธีการลอยน้ำอาจแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยแล้วแต่ชนิดของเม็ดแร่ แต่โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 65 ถึง 325 เมช หรือ 45 ถึง 212 ไมครอน

5.1.1 หลักการลอยแร่

การลอยแร่จะต้องใช้หลักของฟิสิกส์เคมี ของเม็ดแร่ (Physico-chemical Property of mineral) โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดแร่ น้ำ สารเคมี และฟองอากาศ จาก รูปที่ 5.4 จะเห็นว่า เมื่อแรงดึงทำให้เกิดมุมสัมผัส (Contact Angle) หรือ θ ซึ่งเป็นมุมระหว่างผิวของเม็ดแร่กับฟองอากาศในสถานะสมดุลจะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\gamma_{s/a} = \gamma_{s/w} + \gamma_{w/a} \cos\theta \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.4 แสดงภาวะสมดุลระหว่างเม็ดแร่ (ของแข็ง) กับฟองอากาศและน้ำ (B.A. Wills, 2006)

โดยที่ $\gamma_{s/a}$, $\gamma_{s/w}$ และ $\gamma_{w/a}$ คือพลังงานผิว (Surface energy) ระหว่างของแข็ง - พองอากาศ ของแข็ง - น้ำ และน้ำ - พองอากาศ ตามลำดับ พลังงานที่จะใช้แยกพองอากาศออกจากเม็ดแร่เรียกว่า Work of Adhesion ซึ่งเท่ากับพลังงานที่ใช้แยกของแข็ง - พองอากาศ เพื่อสร้างการแยกระหว่างผิวของแข็ง - น้ำ และพองอากาศ - น้ำ นั่นคือ

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a} + \gamma_{s/w} - \gamma_{s/a} \quad (5.2)$$

และเมื่อรวมกับสมการ (5.1) จะได้ว่า

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a} (1 - \cos\theta) \quad (5.3)$$

จะเห็นว่า เมื่อ θ มีค่ามากขึ้น ค่า Work of adhesion จะมากตาม จึงแยกผิวระหว่างเม็ดแร่กับอากาศได้ยากขึ้น นั่นคือ การลอยแร่จะทำได้ง่าย ขึ้น หรือ Floatability ของเม็ดแร่จะเพิ่มขึ้นตามค่ามุมสัมผัส เรียกว่า เม็ดแร่เกาะติดพองได้ดี (Aerophillic)

5.1.2 ข้อมูลพื้นฐาน

มีกระบวนการมากมายที่เกี่ยวข้องกับการสกัดละลายทองออกมาจากตัวแร่ เมื่อแหล่งแร่ชั้นบนซึ่งประกอบด้วยแร่ออกไซด์เป็นหลักเริ่มหมดไป ชั้น แร่แร่ทรานซิชั่น ซึ่งเป็นแร่ที่มีองค์ประกอบผสมระหว่างออกไซด์และซัลไฟด์จึงเริ่มมีการนำออกมาใช้ ซึ่งแร่ แร่ทรานซิชั่นสามารถทำการแต่งแร่ได้เหมือนกับการแต่งแร่ออกไซด์แบบปกติ โดยการฟลูต การลอย บดละเอียด ทำการคัดแยกขนาด และการชะละลายทองแบบ CIP (Carbon in Pulp) หรือ CIL (Carbon in Leach) ได้

แร่ทรานซิชั่น นี้จะมีความแข็งมากกว่าแร่ออกไซด์ ในกระบวนการบดละเอียดจึงเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการละลายแบบ CIP หรือ CIL ซึ่งลูกบอลเหล็กจะถูกเติมเข้าไปในหม้อบดมากขึ้นเพื่อเพิ่มกำลังการบดให้สูงขึ้น

ปริมาณการใช้สารเคมีสำหรับการแต่งแร่ แร่ทรานซิชั่นก็จะสูงกว่าแร่ออกไซด์ด้วย สารเคมีเหล่านี้ ได้แก่ โซดาไฟ ออกซิเจน และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ในปี พ.ศ.2548 ตัวอย่างแร่จากบริษัททุ่งคำ จำกัด ได้ถูกส่งไปที่เมืองเพิร์ธ ประเทศออสเตรเลีย เพื่อให้ห้องปฏิบัติการของบริษัท Ammtec ทำการทดสอบการชะละลายตัวอย่างแร่ เหล่านี้ และก่อนหน้านี้นี้ ได้มีการทดสอบอื่นๆ ไปแล้วโดยห้องปฏิบัติการ Metcon ในเมืองซิดนีย์ ผลจากการทดสอบเหล่านี้และการทดสอบต่อๆ มาในปี 2550 คล้ายกัน ทำให้ยืนยันได้

ถึงการมีแหล่งแร่ซัลไฟด์ขนาดใหญ่ และทำให้เกิดเป็นที่มาของการเริ่มต้นโครงการการลอยแร่

แร่ปฐมภูมิส่วนใหญ่เป็นแร่ ไพริโรไทต์ (FeS) ซึ่งเป็นแร่ซัลไฟด์แบบดูดติดแม่เหล็ก แร่ไฟไรต์ (FeS₂) และแร่คาลโคไพไรต์ (CuFeS₂) ซึ่งพบเป็นส่วนน้อย ในขณะที่แร่อาร์เซนไพไรต์ (FeAsS) และ ทอง (Au) ที่เป็นเม็ดอิสระ (Free gold) นั้นพบได้น้อยมาก

5.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่

สารเคมีที่ใช้กันโดยทั่วไปในกระบวนการลอยแร่ ได้แก่

- สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น (Activator)
- สารเคมีที่ใช้ในการจับแร่ (Collector)
- สารเคมีที่ใช้ในการทำฟอง (Frother)
- สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ (Regulators or Modifier)

1. สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น (Activator)

แร่โดยทั่วไปไม่สามารถที่จะทำการลอยแร่ได้ดีด้วยการใช้สารเคมีที่ใช้ในการจับแร่ เพียงอย่างเดียว จะต้องมีการเติมสารที่ใช้ในการกระตุ้นผิวแร่ก่อน สารเคมีเหล่านี้จะไปทำการกระตุ้นสภาพเคมีทางธรรมชาติของพื้นผิวแร่ทำให้พื้นผิวของแร่เริ่ม มีสภาพเป็นแร่ที่ไม่เปียกน้ำ (หรือทำปฏิกิริยาได้ดีกับอากาศ) เพื่อให้เหมาะสมกับสารจับแร่ โดยทั่วไปสารเหล่านี้จะเป็นเกลือที่ ละลายน้ำได้ซึ่งเป็นสารละลายมีขั้ว ขั้วเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของแร่ สารที่ใช้ในการ กระตุ้นเหล่านี้ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการจับ พื้นผิวของแร่ที่ต้องการกับสารที่ใช้จับแร่ สารที่ใช้ ใน การกระตุ้นสำหรับการศึกษานี้คือ คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulphate) (CuSO₄) ซึ่งเป็น สารกระตุ้นที่เหมาะสมกับแร่ กลุ่ม Zinc sulphide และ Iron sulphide เช่น แร่ไฟไรต์ และแร่ไพริโร- ไทต์ ซึ่งมีแร่มีค่า เช่น ทอง และนิกเกิล อยู่ภายใน

2. สารที่ใช้ในการจับแร่ (Collector)

สารที่ใช้ในการจับแร่เป็นสารเคมีที่สำคัญที่สุดในกระบวนการลอยแร่ สารที่ ใช้จับ แร่นี้จะถูกเติมลงไปในช่วงขั้นตอนการปรับสภาพเพื่อไปดูดซับไว้ที่ผิวของแร่และทำให้เกิดชั้นที่ไม่เปียก น้ำเกิดขึ้น โดยไปเคลือบอยู่รอบๆ ผิวของแร่ซัลไฟด์ ทำให้แร่กลายเป็นแร่ที่ไม่เปียก และสามารถจับ ตัวกับฟองอากาศได้ แร่ซัลไฟด์จึงสามารถที่จะจับตัวของมันเองเข้ากับฟองอากาศและสามารถที่ จะลอยขึ้นมาสู่ด้านบนได้

สารที่ใช้ในการจับแร่ที่ใช้กันโดยทั่วไปและอย่างกว้างขวางคือ Xanthogenates โดยทางเทคนิครู้จักกันในชื่อของ Xanthate และ Xanthate derivatives สาร Xanthate จะไม่มีเสถียรภาพที่ pH ต่ำๆ และไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการลอยแร่ในตัวกลางที่มีความเป็นกรด

Xanthate ที่ใช้สำหรับการศึกษาในครั้งนี้คือ Sodium Ethyl Xanthate (SEX) บริษัท Orica ในการลอยแร่ฟิโรไทต์ และใช้ Aero 3894A ของบริษัท Cytec Industries สำหรับลอยแร่คาลโคไพไรต์

3. สารที่ใช้ในการทำฟอง (Frother)

สารที่ใช้ในการทำฟอง เป็นสารเคมีตัวแรกที่ได้มีการพัฒนาขึ้นสำหรับการลอยหัวแร่โดยการใช้ฟอง และยังให้คงเป็นส่วนหนึ่งของสารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่อยู่ โดยที่สารที่ใช้ทำฟองจะไปทำปฏิกิริยาในส่วนที่เป็นของเหลว (ตัวกลาง) แต่จะไม่มีผลต่อส่วนที่เป็นพื้นผิวของแร่ ในการเกิดฟองเนื่องจากความสามารถของสารที่ใช้ทำฟองที่ไปดูดซับอยู่ ในอากาศที่อยู่ภายในตัวกลาง เพราะว่าเกิดการกระตุ้นที่ผิวหน้าของอากาศทำให้แรงตึงผิวลด ลง จึงเกิดเป็นฟองอากาศที่มีเสถียรภาพขึ้น

สารที่ใช้ทำฟองที่ดีจะต้องสามารถผลิตฟองที่มีลักษณะที่แน่นอน และจะต้องมีคุณสมบัติของฟิล์มที่ถูกต้องจึงจะทำให้แร่ที่มีค่าสามารถแนบติดไปกับผิวหน้าของฟองได้โดยที่แร่ที่ไม่ต้องการไม่สามารถที่จะแนบติดไปได้ ฟองที่ได้จะต้องมีความเสถียรเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักของแร่และสามารถที่จะเคลื่อนย้ายแร่ไปสู่ปาก เซลล์ลอยแร่จนไปสู่ทางออกเพื่อทำการเก็บแร่เหล่านั้นคืนมาได้ ฟองที่เกิดขึ้น สามารถที่จะแตกและเกิดขึ้นใหม่ ได้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้ น้ำและกากแร่ที่ไม่ต้องการ ตกกลับเข้าไปอยู่ใน Slurry ได้ ฟองที่เกิดขึ้นจะต้องไม่มีเสถียรภาพมากจนกระทั่งไม่เกิดการแตกขึ้นภายในช่องทาง ออกของแร่และช่องเก็บรวบรวมแร่ แต่จะต้องสามารถเกิดฟองขึ้นใหม่อีกครั้งได้ เมื่อมีการเติมอากาศเข้าไปในขั้นตอนการลอยแร่ขั้นต่อไป มา สารทำฟองจะถูกเติมเข้าไปใน Slurry เพื่อทำให้ฟอง อากาศที่กระจายตัวอยู่มีเสถียรภาพมากขึ้น จึงสามารถเพิ่มการแนบติดของแร่กับฟองอากาศได้ และจะต้องละลายในน้ำได้

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของถังที่ทำการตกตะกอนแร่ และการเกิดฟองที่มากเกินไปภายใน เซลล์ที่ใช้ในการลอยแร่ เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงแต่งแร่มากมาย และสารทำฟองที่ดีจะต้องมีกำลังในการจับแร่ที่ต้องการเพียงเล็กน้อย และทำให้เกิดฟองซึ่งมีเสถียรภาพมากพอที่จะเคลื่อนย้ายแร่จากการลอยแร่บริเวณผิวหน้าของ เซลล์ออกไปสู่ช่องทาง ออกของเซลล์ลอยแร่ได้อย่างสะดวก

ในการศึกษาครั้งนี้คือสารที่ใช้ในการทำฟอง (Frother) คือ DSF 004A ของบริษัท

4. สารที่ใช้ในการปรับสภาพ (Modifier)

สารที่ใช้ในการปรับสภาพ ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการลอยแร่ เพื่อทำการปรับปรุงปฏิกิริยาของการจับแร่ โดยอาจจะเพิ่มหรือลด ผลของการไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำบนพื้นผิวของแร่ สารปรับสภาพจึงสามารถที่จะแบ่งได้เป็น สารที่ใช้กระตุ้น สารที่ใช้กด และ สารปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง สำหรับการศึกษาลอยแร่ในครั้งนี้ ใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 10% ในการปรับสภาพความเป็นกรด สำหรับลอยแร่ไพไรไรต์ และใช้ปูนขาวในการปรับสภาพต่าง สำหรับลอยแร่คาลโคไพไรต์

5. สารที่ใช้กด (Depressant)

สารที่ใช้กด ถูกนำมาใช้เพื่อทำการเพิ่มการเลือกจับในการลอยแร่ โดยการสร้างรูปแบบของการทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี (ชอบน้ำ) เพื่อเป็นการป้องกันการลอยผงฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการบดและจากตัวแร่เอง ซึ่งจะทำให้การลอยแร่เป็นไปได้ยาก สารที่ใช้กด จะเคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาคแร่ ทำให้การดูดซับสารที่ใช้ในการจับแร่เป็นไปอย่างช้าๆ ดังนั้นสารที่ใช้กดโดยทั่วไปจึงถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันแร่ที่ไม่ต้องการลอย ลอยร่วมมาด้วยในการลอยแร่

สารที่ใช้กด มีแตกต่างกันหลายประเภท แต่สามารถที่จะแบ่งเป็นกลุ่มๆ ได้ดังนี้

- สารที่ใช้กดที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic depressant)
- สารที่ใช้กดที่เป็นสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ (Natural organic depressant)
- สารที่ใช้กดที่เป็นโพลีเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymeric depressant)

ในการทดลองครั้งนี้ไม่ใช้สารที่ใช้ในการกด

5.1.4 การออกแบบวงจรเซลล์ลอยแร่

การออกแบบวงจรเซลล์ลอยแร่ในการศึกษาค้างนี้ คือ ระบบของการลอยทองแดง มี %Solid อยู่ที่ 35-38% ซึ่งเหมาะกับการลอยแร่ ถ้าความหนาแน่นของแร่ที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการมากกว่านี้ Slurry จะเริ่มมีความหนืดซึ่งจะทำให้การกวนผสมไม่ดี และยิ่งไปขัดขวางการไหลของอากาศทำให้การลอยแร่ช้าลงเป็นไปไม่ได้ยาก ในทางกลับกัน หากความหนาแน่นของแร่ป้อนต่ำจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เวลาในการทำ ปฏิกิริยาในกระบวนการลอยแร่ลดลง ซึ่งทำให้มีเวลาไม่เพียงพอในการแยกอย่างมีประสิทธิภาพ ขนาดของแร่ที่ผ่านการบดแล้วควรมีขนาดเล็กกว่า 53 ไมครอน อย่างน้อย 80%

แร่คาลโคไพไรต์ จะถูกลอยได้ดีที่ pH ของตัวกลางมีค่าสูงซึ่งอยู่ระหว่าง 10-11 อย่างไรก็ตาม ปูนขาวจะถูกเติมเข้าไปใน Slurry เพื่อทำการปรับ pH สารเคมีอื่นๆ เช่นสารจับแร่

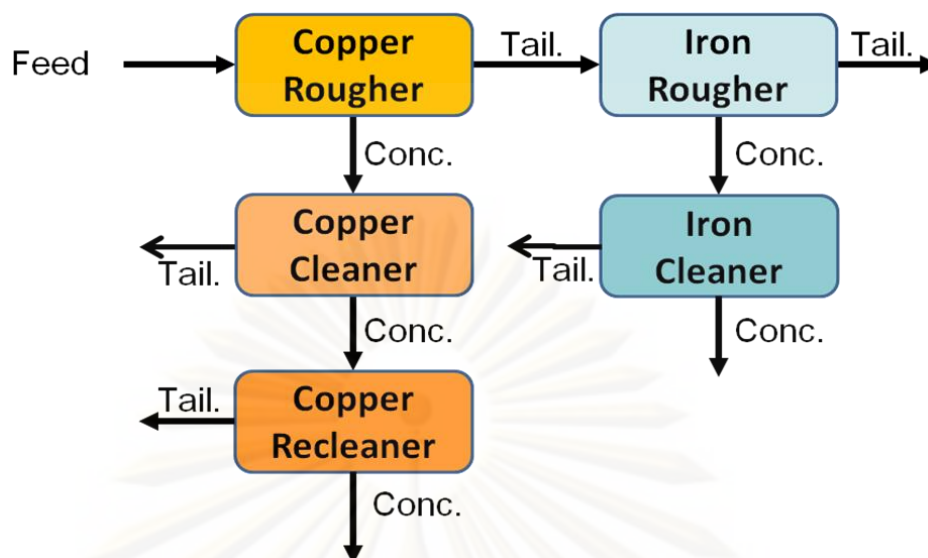
(Collector) ซึ่งก็คือ Aero 3894A ของบริษัท Cytec Industries และตัวสารทำฟอง (Frother) ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้คือ DSF 004A ของบริษัท Orica จะถูกเติมเข้าไปเช่นกัน การปรับสภาพให้เป็นต่างด้วยปูนขาว มีความจำเป็นเพื่อให้แน่ใจว่าแร่ซัลไฟด์ที่จะทำการลอยนั้นมีความสามารถในการลอยมากขึ้น

แร่ที่ปรับสภาพ ในเซลล์ลอยแร่แล้ว จะมีอากาศที่มีแรงดันต่ำ เป่าผ่านลงไปทางแกนของหมุนของใบพัดภายใน เซลล์ และอากาศนี้จะกระจายตัวไปเป็นฟองอากาศเล็กๆ โดยใบพัดที่หมุนกววนอยู่ ฟองอากาศเล็กๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะลอยขึ้นสู่ด้านบนของ เซลล์ลอยแร่ แร่ซัลไฟด์ที่ถูกทำให้ไม่เปียกน้ำ (ทำปฏิกิริยากับอากาศ) โดยสารเคมีในการลอยแร่แล้วนั้น จะแนบติดตัวมันเองเข้ากับฟองอากาศที่ลอยขึ้นไป ทำให้เกิดเป็นหัวแร่ที่ลอยขึ้นมา เพื่อเข้าสู่กระบวนการขั้นต่อไป

แร่คาลโคไพไรต์ที่ลอยขึ้นมา จะถูกนำไปทำให้สะอาด ในขั้นตอนการทำความสะอาดครั้งที่ 1 (Copper cleaner) และถูกนำไปทำให้สะอาดขึ้นในขั้นตอนการทำความสะอาดครั้งที่ 2 (Copper recleaner) เพื่อทำการเพิ่มคุณภาพของหัวแร่ที่ได้ ซึ่งจะได้เป็นหัวแร่คาลโคไพไรต์ที่มีปริมาณโลหะทองคำและทองแดงสูง หัวแร่ที่ได้จะถูกนำมาทำการกรอง และไล่น้ำออกให้อยู่ในรูปของเค้ก เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะมีค่าต่อไป

ในส่วน ของหางแร่ที่ได้จากการลอยแร่ทองแดง ในขั้นตอนแรก แล้วนั้น จะนำไปปรับสภาพเพื่อทำการลอยแร่ ไพริไรท์ ซึ่งสามารถลอยได้ดีในช่วง pH ที่ประมาณ 7-8 ดังนั้น จึงมีการเติม กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ลงไปเพื่อปรับสภาพ ลด pH ลง และ คอปเปอไรต์ซัลเฟต Copper sulphate ($CuSO_4$) จะถูกเติมเข้าไปในขั้นตอนการปรับสภาพ เพื่อเป็นตัวกระตุ้น สารเคมีที่ใช้เป็นสารจับแร่ (Collector) ซึ่งก็คือ Sodium Ethyl Xanthate (SEX) ของบริษัท Orica และตัวสารทำฟอง (Frother) DSF 004A ของบริษัท Orica จะถูกเติมเข้าไปเช่นกัน หัวแร่ไพริไรท์ที่ได้นี้จะถูกนำไปทำให้สะอาดขึ้น (Iron cleaner) เพื่อทำการเพิ่มคุณภาพของหัวแร่ ที่ได้ ซึ่งจะเป็นหัวแร่ไพริไรท์ที่มีปริมาณเหล็กสูง หัวแร่เหล็กที่ได้จะถูกนำมากรองและไล่น้ำออกให้อยู่ในรูปของเค้กเพื่อการวิเคราะห์ต่อไป ส่วนหางแร่จากการลอย แร่คาลโคไพไรต์ และแร่ไพริไรท์ ก็จะถูกนำมากรองและไล่น้ำออกให้อยู่ในรูปของเค้กเพื่อการวิเคราะห์ต่อไป เช่นเดียวกัน ระบบการลอยแร่ มีวงจรการออกแบบการลอยแร่ ชุดที่ 1 ดังรูปที่ 5.5 ต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 การออกแบบวงจรการลอยแร่ ชุดที่ 1

5.2 การทดลองลอยแร่

ในการศึกษาการเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์นั้น ด้วยกระบวนการศึกษาทางแร่วิทยาร่วมกับกระบวนการลอยแร่ นั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองลอยแร่ โดยอาศัยการอ้างอิงข้อมูลการทดลองคัดเลือกตัวแปรที่มีผลต่อการลอยแร่ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด จากการทดลองลอยแร่ของทางบริษัท ทุ่งคำ จำกัด เพื่อลดขั้นตอนในการปฏิบัติงานและเลือกใช้สารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่ ที่ได้ผลในการเก็บกลับคืนมากที่สุด ได้แก่ สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น (Activator) สารเคมีที่ใช้ในการจับแร่ (Collector) สารเคมีที่ใช้ในการทำฟอง (Frother) สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ ความเป็นกรด-ด่าง รวมไปถึงน้ำที่ใช้ในกระบวนการ ขนาดของอนุภาคเม็ดแร่ เปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำหนักรวม (%Solid) ระยะเวลาปรับสภาพ ระยะเวลาในการลอย ตลอดจนความเร็วรอบของเซลล์ลอยแร่ ซึ่งนับเป็นตัวแปรทั้งสิ้นในกระบวนการลอยแร่

ในการทดลองลอยแร่ นั้น ผู้วิจัยได้ศึกษาถึงตัวแปร และเงื่อนไขที่ทำให้การลอยแร่ นั้น ได้รับผลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยได้ทำการทดลองลอยแร่เพื่อนำไปศึกษาทางด้านแร่วิทยา จำนวน 1 ครั้งและทำการตรวจสอบผลการทดลองอีกจำนวน 2 ครั้ง เพื่อนำผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะมีค่า มาเปรียบเทียบกัน หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการศึกษาทางด้านแร่วิทยาแล้วนั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองลอยแร่อีกครั้งหนึ่ง เพื่อเปลี่ยนเงื่อนไขในการทดลองให้สอดคล้องกับสมมุติฐาน จากการศึกษาทางด้านแร่วิทยา ประกอบกับบริษัท ทุ่งคำ จำกัด ได้เริ่มทดสอบการทำงานของระบบลอยแร่ ผู้วิจัยจึงได้นำตัวอย่างหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ ที่มีปริมาณโลหะทองคำและทองแดง มาทดลองเพิ่มเติมอีกด้วย

ขั้นตอนการดำเนินงาน อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การทดลองลอยแร่ซัลไฟด์ ครั้งที่ 1 เพื่อนำไปศึกษาด้านแร่วิทยา
2. การทดลองลอยแร่ซัลไฟด์ ครั้งที่ 2 และ 3 เพื่อนำผลการวิเคราะห์มาตรวจสอบ
3. การทดลอง ลอยแร่ซัลไฟด์ ครั้งที่ 4 เพื่อปรับเงื่อนไขให้สอดคล้องกับสมมุติฐานจากการศึกษาทางด้านแร่วิทยา
4. การทดลองลอยหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ จากโรงงานลอยแร่ ของบริษัท หุ่นคำจำกัด ขณะทำการทดสอบเครื่องจักร

5.2.1 การทดลองลอยแร่ซัลไฟด์ครั้งที่ 1 เพื่อศึกษาทางด้านแร่วิทยา

5.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย แสดงในรูปที่ 5.6

1. เซลล์ลอยแร่ขนาดทดลองในห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ essa จำนวน 1 เครื่อง พร้อมเซลล์ลอยแร่ ขนาด 5 ลิตร และ 1.5 ลิตร อย่างละ 1 ชิ้น
2. เครื่องมือวัด กรด- ด่าง (pH Meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo จำนวน 1 เครื่อง
3. ขวดรูปชมพู่ (เอทิลเมเยอร์ ฟลาสก์) ขนาด 1 ลิตร จำนวน 2 ขวด
4. บีกเกอร์ขนาด 100 มล. จำนวน 2 ชิ้น
5. ตาชั่ง

5.2.1.2 สารที่ใช้ในการวิจัย

1. ตัวอย่างแร่
2. ปูนขาว
3. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 10%
4. คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) (รูปที่ 5.7)
5. Collectors: Aero 3894A ของบริษัท Cytec Industries
6. Frother: DSF 004A ของบริษัท Orica
7. Sodium Ethyl Xanthate (SEX) ของบริษัท Orica

5.2.1.3 วิธีการวิจัย

1. ชั่งตัวอย่างแร่ 1 กิโลกรัม ด้วยเครื่องชั่ง ใสในถาด (รูปที่ 5.8) เพื่อนำไปบดละเอียดด้วย Rod Mill ให้มีขนาดเล็กกว่า 53 ไมครอน อย่างน้อย 80% โดยผสมน้ำ 0.5 ลิตรลงไป เป็นเวลา 30 นาที (ดังรูปที่ 5.9 ก และ ข)



รูปที่ 5.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 5.7 คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)



รูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างแร่ซัลไฟด์ 1 กิโลกรัม บนเครื่องชั่ง



รูปที่ 5.9 (ก) การเตรียมตัวอย่างการบดแร่ด้วย Rod Mill



รูปที่ 5.9 (ข) การเตรียมตัวอย่างการบดแร่ด้วย Rod Mill

2. นำตัวอย่างที่ได้จากการบดไปเข้าเซลล์ลอยแร่ขนาด 5 ลิตร แล้วเติมน้ำลงไปอีก 3 ลิตร เพื่อปรับ %Solid ให้ได้ประมาณ 30 %Solids

3. ปรับสภาพของ Slurry ให้เป็นค่าที่ pH 10 ด้วยปูนขาว 3 กรัม เป็นเวลา 1 นาที ปรับความเร็วรอบของเครื่องที่ 500-600 rpm

4. เติม Collectors: Aero 3894A โดยใช้ Syringe ช่วย จำนวน 3 หยด หยดละประมาณ 7 กรัมโดยน้ำหนัก

5. เติม Frother: DSF 004A โดยใช้ Syringe ช่วย จำนวน 0.5 หยด หยดละประมาณ 8 กรัมโดยน้ำหนัก

6. หลังจากปรับสภาพแล้วเป็นเวลา 1 นาทีจึงเริ่มเปิด ฟองอากาศ ได้หัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ที่ลอยขึ้นมา รอจนหมดแล้วนำไปสู่ขั้นตอนต่อไป (รูปที่ 5.10)

7. จากนั้นหางแร่ที่จมอยู่นั้น ปรับสภาพเพื่อที่จะลอยเหล็ก ซัลไฟด์ (Rougher) โดยปรับ pH ให้อยู่ที่ประมาณ 6.5-7 ด้วย กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 5 นาที

8. ชั่งน้ำหนักคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เติมน้ำลงไป 0.04 กรัม



รูปที่ 5.10 แสดงหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ที่ลอยขึ้นมา

9. เติม Collectors: Sodium Ethyl Xanthate (SEX) ในปริมาณ 42 มิลลิลิตร และเติม Frother: DSF 004A โดยใช้ Syringe ช่วย จำนวน 0.5 หยด ประมาณ 4 กรัมโดยน้ำหนัก ปรับสภาพเป็นเวลา 1 นาที

10. จากนั้นเริ่มเปิดฟองอากาศ เพื่อให้ได้หัวแร่เหล็กซัลไฟด์เป็นเวลาประมาณ 4 นาที

11. ทำความสะอาด (Cleaner) หัวแร่เหล็กซัลไฟด์อีกครั้งด้วยการเติม Sodium Ethyl Xanthate (SEX) อีกจำนวน 14 มิลลิลิตร และรักษาสภาพ pH ไว้ที่ 6.5-7 ทิ้งไว้ 1 นาที แล้วเปิดฟองอากาศอีกครั้ง ได้หัวแร่เหล็กซัลไฟด์ จนลอยขึ้นมาหมด

12. สำหรับหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ที่ลอยขึ้นมารอบแรกนั้น นำมาทำความสะอาด (Cleaner) ด้วยเซลล์ลอยแร่ขนาด 1.5 ลิตร ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ด้วยปูนขาวที่ pH 10 แล้วเติม Collectors: Aero 3894A จำนวน 3 หยด หยดละ 7 กรัม เป็นเวลา 1 นาที

13. จากนั้นเปิดฟองอากาศ จนหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ลอยขึ้นมาหมด ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

14. ทำควา มสะอาดหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์อีกครั้งหนึ่ง (Recleaner) ด้วยการเติม Collectors: Aero 3894A อีกจำนวน 3 หยด หยดละ 7 กรัม แล้วเติม Frother: DSF 004A จำนวน ½ หยด ปรับสภาพเป็นเวลา 1 นาที โดยรักษาระดับ pH ให้ได้ 10 อยู่ตลอดเวลา

15. จากนั้นเปิดฟองอากาศ จนหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ลอยขึ้นมาหมด ใช้เวลาประมาณ 7 นาที

16. จากนั้นนำหัวแร่และหางแร่ทั้งหมดที่ได้จากการทดลองไปทำให้แห้ง โดยใช้กระดาษกรอง และเครื่อง Filter Press (รูปที่ 5.11)

17. จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยความร้อนจากไฟ สปอตไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งเร็วกว่าการอบด้วยเตาอบไฟฟ้า

18. นำตัวอย่างทั้งหมดไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

5.2.1.4 ผลการวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการวิเคราะห์ ปริมาณโลหะมีค่าในการทดลองลอยแร่ครั้งที่ 1 เพื่อศึกษาทางด้านแร่วิทยา

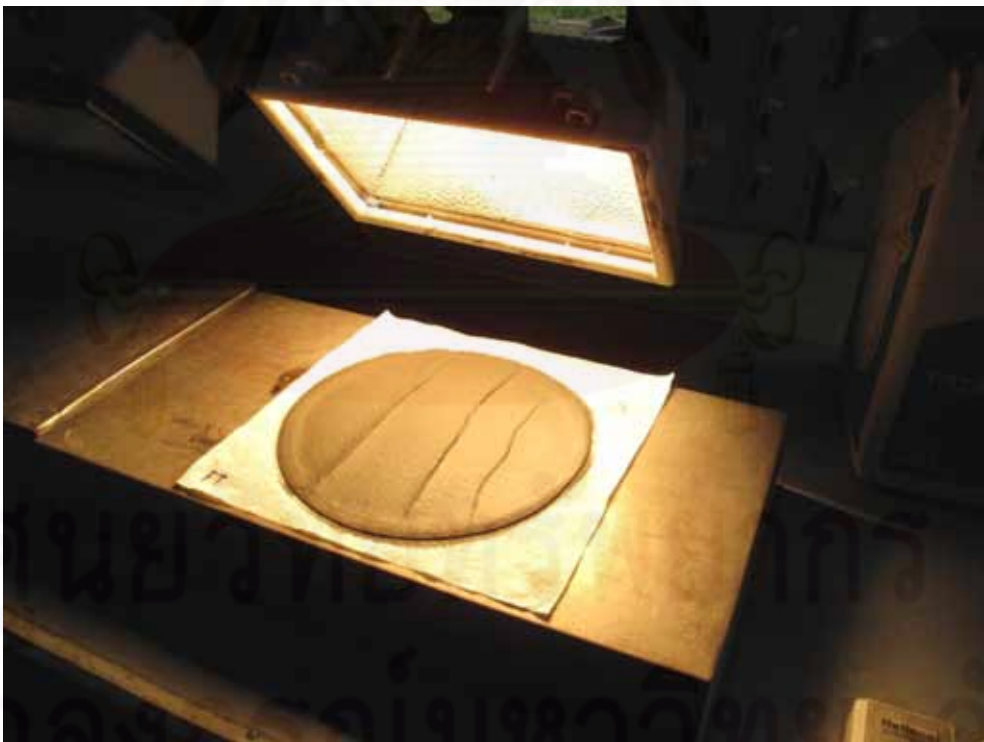
Sample ID	Au (ppm)	Cu (%)	Fe (%)	S (%)	Ag (ppm)
Feed TKL1-01	10.79	0.74	33.37	16.82	2.77
Tailing TKL1-07	0.44	0.01	9.88	2.31	2.84
Copper Recleaner Conc TKL1-04	55.03	5.51	40.44	28.61	8.22
Copper Recleaner Tail TKL1-05	2.03	0.09	37.71	20.71	4.18
Copper Cleaner Tail TKL1-06	1.31	0.05	32.47	16.85	2.79
Iron Cleaner Conc TKL1-02	2.44	0.06	55.71	35.82	4.14
Iron Cleaner Tail TKL1-03	1.45	0.04	29.96	13.14	5.75

หมายเหตุ การทดลองลอยแร่ในครั้งนี้เพื่อนำตัวอย่างไปศึกษาทางด้านแร่วิทยา จึงไม่ได้มีการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง เพื่อทำสมดุลมวล (Mass Balance)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.11 แสดง Filter Press ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.12 แสดงการอบให้แห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงไฟสปอตไลท์

5.2.2 การทดลองลอยแร่ซัลไฟด์ ครั้งที่ 2 และ 3

ขั้นตอนการทดลอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เสีนไซและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง จะเหมือนกันกับกา รทดลองครั้งแรก แต่จะแตกต่างกันที่แร่ป้อน ที่มีปริมาณโลหะ ทองคำ ทอง แแดง และเหล็กต่างกัน ได้แก่ตัวอย่างหมายเลข 45 และ 47 และมีการชั่งน้ำหนัก ตัวอย่างทั้งหมด เพื่อนำไปคำนวณสมมูลมวลและหา %Distribution และ %Recovery ต่อไป

5.2.2.1 ผลการวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

5.2.3 การทดลองลอยแร่ซัลไฟด์ ครั้งที่ 4 หลังจากศึกษาด้านแร่วิทยา

ผลจากการศึกษาทางด้านแร่วิทยาพบว่าหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ที่ลอยขึ้นมา นั้น ยังมีแร่เหล็กซัลไฟด์ติดอยู่ด้วยอีกจำนวนหนึ่ง ซึ่งทองคำนั้นสามารถพบได้ในแร่เหล็กซัลไฟด์ และ ต้องการแยกทองคำซึ่งเป็นโลหะมีค่าออกมา จึงออกแบบวงจรการลอยแร่ใหม่ (ชุดที่ 2) สำหรับการลอยแร่ครั้งที่ 4 ดังรูปที่ 5.13

5.2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เซลล์ลอยแร่ขนาดทดลองในห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ essa จำนวน 1 เครื่อง พร้อมเซลล์ลอยแร่ ขนาด 5 ลิตร และ 1.5 ลิตร อย่างละ 1 ชิ้น
2. เครื่องมือวัด กรด- ด่าง (pH Meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo จำนวน 1 เครื่อง
3. ขวดรูปชมพู่ (เออเลนเมเยอร์ ฟลาสก์) ขนาด 1 ลิตร จำนวน 2 ขวด
4. ปีกเกอร์ขนาด 100 มล. จำนวน 2 ชิ้น
5. ตาชั่ง

5.2.3.2 สารที่ใช้ในการวิจัย

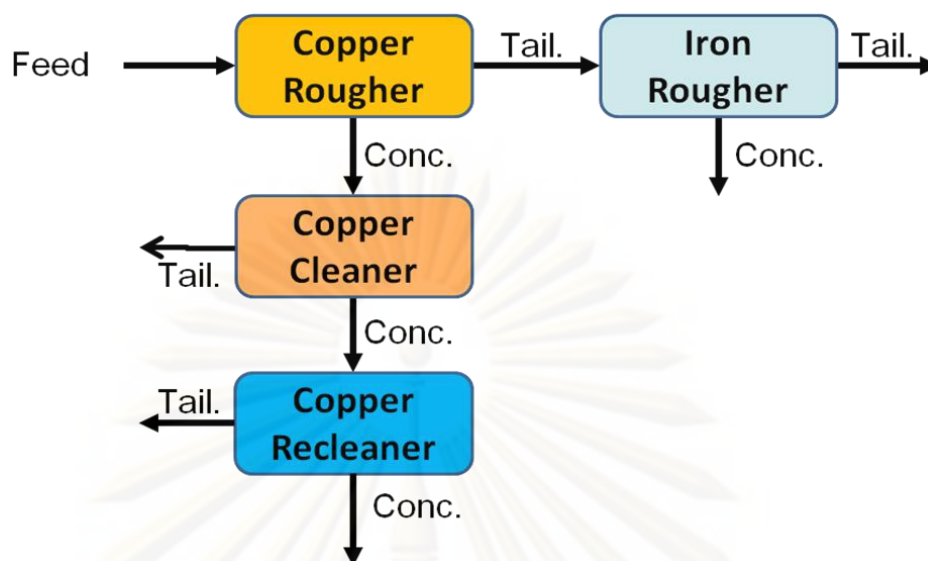
1. ตัวอย่างแร่
2. ปูนขาว
3. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 10%
4. คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$)
5. Collectors: Aero 3894A ของบริษัท Cytec Industries
6. Frother: DSF 004A ของบริษัท Orica
7. Sodium Ethyl Xanthate (SEX) ของบริษัท Orica

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ และการกระจายตัวของโลหะมีค่ามีค่าในการทดลองลอยแร่ครั้งที่ 2 ตัวอย่างหมายเลข 45

Sample ID: 45	Solid							Distribution				
	Au (ppm)	Cu (%)	Fe (%)	S (%)	Ag (ppm)	Weight (g)	Weight (%)	% Au	% Cu	% Fe	% S	% Ag
Feed	1.81	0.69	40.90	24.39	4.78	970.10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Tailing	0.21	0.01	23.70	11.75	3.72	471.60	48.61	5.64	1.04	28.17	23.42	37.83
Copper Recleaner Conc	35.05	17.95	50.69	32.40	12.82	35.00	3.61	69.87	93.70	4.47	4.79	9.68
Copper Recleaner Tail	11.76	0.17	30.87	34.12	8.54	6.00	0.62	4.02	0.15	0.47	0.87	1.11
Copper Cleaner Tail	2.29	0.30	53.48	32.76	4.63	61.60	6.35	8.02	2.73	8.30	8.53	6.15
Iron Cleaner Conc	0.36	0.05	60.37	38.91	5.27	237.40	24.47	4.87	1.84	36.12	39.04	26.98
Iron Cleaner Tail	0.84	0.02	56.25	34.86	5.34	158.50	16.34	7.58	0.53	22.47	23.35	18.25

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ และการกระจายตัวของโลหะมีค่ามีค่าในการทดลองลอยแร่ครั้งที่ 3 ตัวอย่างหมายเลข 47

Sample ID: 47	Solid							Distribution				
	Au (ppm)	Cu (%)	Fe (%)	S (%)	Ag (ppm)	Weight (g)	Weight (%)	% Au	% Cu	% Fe	% S	% Ag
Feed	2.00	0.72	43.21	26.73	5.88	992.62	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Tailing	0.36	0.02	14.67	10.98	1.71	355.93	35.86	6.45	0.75	12.17	14.73	10.43
Copper Recleaner Conc	31.93	15.81	50.04	33.86	14.30	41.42	4.17	66.62	91.80	4.83	5.29	10.15
Copper Recleaner Tail	3.02	0.45	47.89	32.27	8.17	26.64	2.68	4.05	1.69	2.97	3.24	3.73
Copper Cleaner Tail	0.91	0.10	52.83	28.93	7.99	65.12	6.56	2.98	0.87	8.02	7.10	8.91
Iron Cleaner Conc	0.79	0.07	63.43	38.38	8.06	468.83	47.23	18.63	4.60	69.33	67.82	64.74
Iron Cleaner Tail	0.72	0.06	32.90	13.95	3.43	34.68	3.49	1.26	0.29	2.66	1.82	2.04



รูปที่ 5.13 แสดงการออกแบบวงจรลอยแร่เพื่อแยกแร่เหล็กซัลไฟด์ออกจากหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ ชุดที่ 2

5.2.3.3 วิธีการวิจัย

1. ชั่งตัวอย่างแร่ 1 กิโลกรัม ด้วยเครื่องชั่ง ใสในถาดเพื่อนำไปบดละเอียดด้วย Rod Mill ให้มีขนาดเล็กกว่า 53 ไมครอน อย่างน้อย 80% โดยผสมน้ำ 0.5 ลิตรลงไป เป็นเวลา 30 นาที

2. นำตัวอย่างที่ได้จากการบดไปเข้าเซลล์ลอยแร่ขนาด 5 ลิตร แล้วเติมน้ำลงไปอีก 3 ลิตร จนถึงระดับขีดวัดของเซลล์ เพื่อปรับ %Solid ให้ได้ประมาณ 30 %Solids

3. ปรับสภาพของ Slurry ให้เป็นด่างที่ pH 10-11 ด้วยปูนขาว 2 กรัม เป็นเวลา 1 นาที ปรับความเร็วรอบของเครื่องที่ 500-600 rpm

4. เติม Collectors: Aero 3894A โดยใช้ Syringe ช่วย จำนวน 3 หยด หยดละประมาณ 7 กรัมโดยน้ำหนัก

5. เติม Frother: DSF 004A โดยใช้ Syringe ช่วย จำนวน 0.5 หยด หยดละประมาณ 8 กรัมโดยน้ำหนัก

6. ปรับสภาพเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ให้น้ำยาและอนุภาคของเม็ดแร่ทำปฏิกิริยากันมากขึ้น จึงเริ่มเปิดฟองอากาศ จะได้หัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ที่ลอยขึ้นมา รอจนลอยขึ้นหมดแล้วนำไปสู่ขั้นตอนต่อไป

7. จากนั้นนำหางแร่ที่จมอยู่นั้น ปรับสภาพเพื่อที่จะลอยเหล็ก
ซัลไฟด์ (Rougher) โดยปรับ pH ให้อยู่ที่ประมาณ 6.5-7 ด้วย กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น
10%
8. ชั่งน้ำหนักคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
เติมลงไป 0.04 กรัม
9. เติม Collectors: Sodium Ethyl Xanthate (SEX) ในปริมาณ
42 มิลลิลิตร และเติม Frother: DSF 004A โดยใช้ Syringe ช่วย จำนวน 0.5 หยด ประมาณ 4
กรัมโดยน้ำหนัก ปรับสภาพเป็นเวลา 5 นาที
10. จากนั้นเริ่มเปิดฟองอากาศ เพื่อให้ได้หัวแร่เหล็กซัลไฟด์ ที่
ลอยขึ้นมา รอจนลอยขึ้น เป็นเวลาประมาณ 5 นาที
11. สำหรับหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ที่ลอยขึ้นมารอบแรกนั้น นำมา
ทำความสะอาด (Cleaner) ด้วยเซลล์ลอยแร่ขนาด 1.5 ลิตร ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ด้วย
ปูนขาวที่ pH 10 แล้วเติม Collectors: Aero 3894A จำนวน 3 หยด หยดละ 7 กรัม เป็นเวลา 5
นาที
13. จากนั้นเปิดฟองอากาศ จนหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ลอยขึ้นมา
หมด ใช้เวลาประมาณ 5 นาที
14. ทำความสะอาดหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์อีกครั้งหนึ่ง (Iron
Cleaner) โดยปรับ pH ให้อยู่ที่ประมาณ 6.5-7 ด้วย กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 10% และ
เติม Collectors: Sodium Ethyl Xanthate (SEX) ในปริมาณ 21 มิลลิลิตร เติม Frother: DSF
004A โดยใช้ Syringe ช่วย จำนวน 0.5 หยด ประมาณ 4 กรัมโดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟต
($CuSO_4$) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เติมลงไป 0.04 กรัม ปรับสภาพเป็นเวลา 5 นาที โดยรักษาระดับ
pH ให้ได้ 4-5 อยู่ตลอดเวลา
15. จากนั้นเปิดฟองอากาศ จนหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ลอยขึ้นมา
หมด ใช้เวลาประมาณ 30 นาที
16. จากนั้นนำหัวแร่และหางแร่ทั้งหมดที่ได้จากการทดลองไป
ทำให้แห้ง โดยใช้กระดาษกรอง และเครื่อง Filter Press
17. จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยความร้อนจากไฟ สปอตไลต์ ซึ่งเร็ว
กว่าการอบด้วยเตาอบไฟฟ้า
18. นำตัวอย่างทั้งหมดไป ชั่งน้ำหนักและ วิเคราะห์ใน
ห้องปฏิบัติการ

5.2.3.4 ผลการวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 5.4

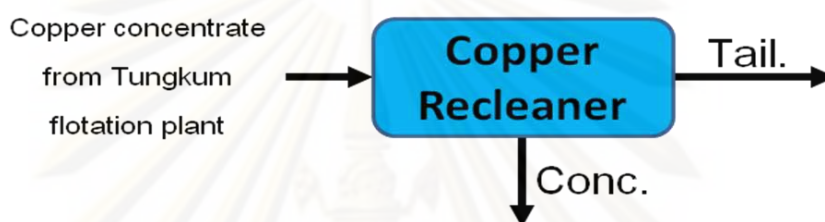
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะและปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่าในการทดลองลอยแร่ครั้งที่ 4

Sample ID: High Au	Solid							Distribution				
	Au (ppm)	Cu (%)	Fe (%)	S (%)	Ag (ppm)	Weight (g)	Weight (%)	% Au	% Cu	% Fe	% S	% Ag
Feed	11.87	0.53	37.98	37.98	6.68	996.40	100.00	100.00	100.00	100.00	NA	100.00
Copper Recleaner Conc	124.39	12.01	30.87	36.87	14.48	40.70	4.08	42.81	92.49	3.32	3.97	8.85
Copper Recleaner Tail	27.49	4.10	38.69	NA	8.74	3.10	0.31	0.72	2.41	0.32	NA	0.41
Copper Cleaner Tail	21.36	0.19	34.85	12.31	7.71	20.60	2.07	3.72	0.74	1.90	0.67	2.39
Iron Rougher Conc	15.93	0.06	49.33	38.29	9.08	300.90	30.20	40.53	3.46	39.22	30.45	41.05
Iron Rougher Tail	2.30	0.01	33.14	12.76	4.99	631.10	63.34	12.27	1.03	55.27	21.28	47.31

* NA ไม่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ได้ เนื่องจากตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีน้อยมาก

5.2.4 การทดลองลอยหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์จากกระบวนการผลิต

หลังจากได้ทำการทดลองลอยแร่เหล็กซัลไฟด์ (Copper recleaner) จากหัวแร่ซัลไฟด์ ผลปรากฏว่า แร่ที่ลอยขึ้นมากลับเป็นแร่ทองแดงซัลไฟด์เป็นส่วนใหญ่ ประกอบกับบริษัท พุ่งคำ จำกัด ได้เริ่มทดสอบการทำงานของโรงงานลอยแร่ (Test run) ผู้วิจัยจึงได้นำตัวอย่างหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์มาทดลองลอยแร่เหล็กซัลไฟด์ออกอีกครั้งหนึ่ง โดยมีวิธีการเช่นเดียวกับการทดลองลอยแร่ครั้งที่ 4 ซึ่งมีการออกแบบวงจรการลอยแร่ใหม่ (ชุดที่ 3) สำหรับการลอยแร่ครั้งที่ 5 ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 แสดงการออกแบบวงจรลอยแร่ ชุดที่ 3 เพื่อแยกแร่เหล็กซัลไฟด์ออกจากหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ที่มาจากการทดสอบกระบวนการผลิต (Test run)

5.2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เซลล์ลอยแร่ขนาดทดลองในห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ essa จำนวน 1 เครื่อง พร้อมเซลล์ลอยแร่ ขนาด 5 ลิตร
2. เครื่องมือวัด กรด-ด่าง (pH Meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo จำนวน 1 เครื่อง
3. ขวดรูปชมพู่ (เออเลนเมเยอร์ ฟลาสก์) ขนาด 1 ลิตร จำนวน 1 ขวด

4. บีกเกอร์ขนาด 100 มล. จำนวน 1 ชิ้น
5. ตาชั่ง

5.2.4.2 สารที่ใช้ในการวิจัย

1. ตัวอย่างแร่
2. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 10%
3. คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$)
4. Frother: DSF 004A ของบริษัท Orica
5. Sodium Ethyl Xanthate (SEX) ของบริษัท Orica

5.2.4.3 วิธีการวิจัย

1. ชั่งตัวอย่างแร่ 1 กิโลกรัม จากกระบวนการผลิตหัวแร่ทองแดง ซัลไฟด์ ซึ่งนำมาจาก Filter Press ของโรงงานผลิตหัวแร่ทองแดง และเป็นตัวอย่างที่อบแห้งแล้ว
2. นำตัวอย่างที่ได้ไปเข้าเซลล์ลอยแร่ขนาด 5 ลิตร แล้วเติมน้ำลงไปอีก 3 ลิตร จนถึงระดับขีดวัดของเซลล์ เพื่อปรับ %Solid ให้ได้ประมาณ 30 %Solids
3. ปรับสภาพของ Slurry ให้เป็นกรดที่ pH 4-5 ปรับสภาพ ด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 10%
4. ชั่งน้ำหนักคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเติมลงไป 0.08 กรัม
5. เติม Collectors: Sodium Ethyl Xanthate (SEX) ในปริมาณ 42 มิลลิลิตร และเติม Frother: DSF 004A โดยใช้ Syringe ช่วย จำนวน $\frac{1}{2}$ หยด หยดละประมาณ 8 กรัมโดยน้ำหนัก ปรับสภาพเป็นเวลา 5 นาที
6. จากนั้นเริ่มเปิดฟองอากาศ เพื่อให้ได้หัวแร่เหล็กซัลไฟด์ที่ลอยขึ้นมา รอจนลอยขึ้น เป็นเวลาประมาณ 30 นาที
7. จากนั้นนำหัวแร่และหางแร่ทั้งหมดที่ได้จากการทดลองไปทำให้แห้ง โดยใช้กระดาษกรอง และเครื่อง Filter Press
8. จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยความร้อนจากไฟ สปอตไลต์ ซึ่งเร็วกว่าการอบด้วยเตาอบไฟฟ้า
9. นำตัวอย่างทั้งหมดไปชั่งน้ำหนักและ ทำการ วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

5.2.4.4 ผลการวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 5.5

5.3 สรุป และอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนของค่าและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ โดยใช้วิธีการลอยแร่ นั้น จากตารางที่ 5.1 ถึง 5.7 สรุปได้ว่า เมื่อแร่ป้อนมีปริมาณโลหะทองคำสูง (มากกว่า 10 ppm) จะมีปริมาณเหล็กต่ำ (น้อยกว่า 40 %Fe) และเมื่อแร่ป้อนมีปริมาณทองคำต่ำ (ต่ำกว่า 3 ppm) จะมีปริมาณเหล็กสูง (มากกว่า 40 %Fe) โดยที่ปริมาณของทองแดง ไม่ได้มีผลกับปริมาณของทองคำและเหล็ก

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ และปริมาณการกระจายตัวของโลหะมีค่ามีค่าในการทดลองลอยหัวแร่ทองแดงซัลไฟด์

Sample ID: Copper Conc	Solid							Distribution				
	Au (ppm)	Cu (%)	Fe (%)	S (%)	Ag (ppm)	Weight (g)	Weight (%)	% Au	% Cu	% Fe	% S	% Ag
Feed	44.44	13.53	25.26	29.87	18.78	991.60	100.00	99.24	99.82	100.68	99.92	71.99
Conc	56.80	17.88	22.30	34.82	15.28	743.90	75.02	95.89	99.17	66.23	87.45	61.04
Tail	5.97	0.35	34.84	14.91	8.23	247.70	24.98	3.36	0.65	34.45	12.47	10.95

ผลจากการทดลองลอยแร่ ครั้งที่ 2 และ 3 (ดูตารางที่ 5.2 และ 5.3) พบว่า ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนในหัวแร่ทองแดงจากปริมาณทองคำ 1.81 ppm เพิ่มเป็น 35.05 ppm 69.87% Recovery (ตารางที่ 5.2) และปริมาณทองคำ 2.00 ppm Au เพิ่มเป็น 31.93 ppm Au ที่ 66.62% Recovery (ตารางที่ 5.3) สำหรับปริมาณทองแดงจะเพิ่มจาก 0.69%Cu เป็น 17.95 %Cu ที่ 93.70% Recovery (ตารางที่ 5.2) และเพิ่มจาก 0.72 %Cu เป็น 15.81 %Cu ที่ 91.80% Recovery (ตารางที่ 5.3) ขณะที่หัวแร่เหล็กจะเพิ่มปริมาณเหล็กจาก 40.90%Fe เป็น 60.37%Fe ที่ 36.12% Recovery (ตารางที่ 5.2) และปริมาณเหล็กจาก 43.21% เป็น 63.43% ที่ 69.33% Recovery (ตารางที่ 5.3) ซึ่งนำนักหัวแร่ทองแดงที่ลอยขึ้นมา คิดเป็น ประมาณ 4 % จากแร่ป้อน สำหรับการลอยแร่ครั้งที่ 3 และเห็นได้ชัดเจนว่าในหัวแร่ทองแดงนั้น ยังมีปริมาณของ เหล็กเหลืออยู่เป็นอันดับรองลงมาซึ่งอยู่ที่ 50.69 %Fe และ 50.04 %Fe ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้อง กับผลการศึกษาด้านแร่วิทยา

จากสมมุติฐานจากการศึกษาทางด้านแร่วิทยา ในบทที่ 4 พบว่า ในหัวแร่ทองแดง ที่ลอยขึ้นมานั้น โลหะทองคำมีการกระจายตัวอยู่กับเหล็กเป็นส่วนใหญ่ หรือเกือบทั้งหมด มีเพียง ส่วนน้อยหรือแทบไม่มีการกระจายตัวอยู่กับทองแดงเลย การทดลองลอยแร่ในครั้งนี้ จึงเป็น การทดลองลอยแร่เหล็กขึ้นมาจากหัวแร่ทองแดง เพื่อหาว่ามีปริมาณของทองคำปนอยู่ในหัวแร่ เหล็กที่ลอยขึ้นมาจากแร่ป้อนซึ่งเป็นหัวแร่ทองแดงหรือไม่ ผลปรากฏว่า หัวแร่เหล็กที่ลอยขึ้นมาได้ นั้นมีปริมาณของโลหะทองคำ 124.39 ppm จากแร่ป้อน 11.87 ppm ที่ 42.81 %Recovery และ ทองแดง 12.0098 %Cu ที่ 92.49 %Recovery ซึ่งนำนักหัวแร่เหล็กที่ลอยขึ้นมา คิดเป็น 4.08 % จากแร่ป้อน ซึ่งหางแร่เหล็กที่จมอยู่นั้น มีเพียง 0.31 % ของแร่ป้อน

จากผลการทดลองลอยแร่ครั้งที่ 4 ผู้วิจัยจึงได้นำหัวแร่ทองแดงที่ลอยได้จากการ ทดลองเดินเครื่องจักรลอยแร่ในโรงงานลอยแร่ ของบริษัท หุ่นคำ จำกัด มาลอยเอาหัวแร่เหล็ก ออกไป ซึ่งผลการทดลองมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดลองที่ 4 คือทองคำและทองแดง สามารถ ลอยขึ้นมาได้อีก แต่ในส่วนของหางแร่นั้นจะมีปริมาณของเหล็กอยู่ที่ 34.45 % จากแร่ป้อน ซึ่ง สามารถทำให้หัวแร่ที่ลอยขึ้นมานั้น มีปริมาณของทองคำและทองแดงมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณ ของเหล็กที่อยู่ในหัวแร่นั้นยังเหลืออยู่อีก 66.23 % ซึ่งจะมีปริมาณของแร่ในกลุ่ม ทองแดง เหล็ก ซัลไฟด์ อยู่ด้วย

เนื่องจากตัวอย่างแร่ที่ได้จากการทดลองเดินเครื่องจักรลอยแร่นั้น มีปริมาณน้ำยาที่ใช้ สำหรับลอยแร่ทองแดงเหลืออยู่มากเพียงพอ และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ เวลาที่ใช้ใน การลอยแร่นั้นมากและมีเสถียรภาพกว่า ทำให้การลอยแร่เหล็กไม่ได้ประสิทธิภาพเท่าที่ควร ในการ ลอยแร่เหล็กซ้ำอีกรอบ ควรมีการปรับสภาพแร่ป้อนและคัดเลือกน้ำยาลอยแร่ชนิดอื่นที่สามารถกด แร่ทองแดงให้จม และทำให้แร่เหล็กลอยขึ้นมาได้ การทดลองลอยแร่ เหล็กซ้ำในครั้งนี้จึง เปรียบเสมือนกับการทำความสะอาดหัวแร่ทองแดงให้มีปริมาณของทองคำและทองแดงมากขึ้น

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงจากสินแร่ซัลไฟด์ของแหล่งแร่ภูทับฟ้า เนื่องจากสินแร่ซัลไฟด์มีทองแดงซัลไฟด์และเหล็กซัลไฟด์ เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนของทองคำและทองแดงในกระบวนการละลายด้วยสารละลายไซยาไนด์มีค่าลดลง ฉะนั้นหากเราสามารถ แยกทองแดง และเหล็ก ออกให้ได้มากที่สุด ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนทองคำและทองแดงก็จะมีมากขึ้นด้วย

จากข้อมูลรายงานธรณีวิทยาของแหล่งแร่ภูทับฟ้า ผลจากการศึกษาโดยอาศัยการศึกษาหลายๆ วิธีรวม กัน ได้แก่ การศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์ธาตุแบบ EPMA ตลอดจนการศึกษาโดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน นั้น สรุปได้ว่าแร่ในกลุ่มซัลไฟด์ที่อยู่ลึกลงไปนั้น มีการเกิดของแร่ทองแดงซัลไฟด์ หรือคาลโคไพไรต์ (CuFeS_2) ที่เกิดจากการ Exsolution ขึ้นจากแร่ไพไรต์ (FeS_2) ที่อุณหภูมิสูง โดยมีไอออนของ Cu เข้าไปแทนที่ไอออนของโครงสร้างเดิมเรียกว่า Solid-Solution (สารละลายของแข็ง)

และจากผลการศึกษาของ Surasak Yamned, 1999 เรื่อง Ore Mineralgraphy ของแหล่งแร่นี้ ทำให้พบไพไรต์และคาลโคไพไรต์ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการพบทองคำที่เป็นเม็ดอิสระ (Free Gold) ในตัวอย่างที่ได้นำมาศึกษา

สำหรับการกระจายตัวของแร่ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และจากการทำภาพทับซ้อนกัน (Mapping) ระหว่างทองคำ ทองแดง เหล็ก และซัลเฟอร์ ทำให้ทราบได้ว่าทองคำนั้นไม่ได้กระจายตัวอยู่กับทองแดง (Au-Cu) แต่ทองคำจะกระจายตัวอยู่กับเหล็ก (Au-Fe) คือแร่ไพไรต์มีมากกว่าอยู่แบบทองคำอิสระ (Au) มากกว่าอยู่กับเหล็กและทองแดง (Au-Fe-Cu) และมากกว่าอยู่กับทองแดง (Au-Cu) ส่วนการกระจายตัวของทองแดงนั้นจะอยู่ร่วมกับเหล็ก (Fe-Cu) ซึ่งเป็นแร่คาลโคไพไรต์ มากกว่าอยู่แบบทองแดงอิสระ (Cu)

สำหรับกระบวนการลอยแร่ นั้น สามารถสรุปได้ว่า แร่ในกลุ่มซัลไฟด์ของบริษัท ทุ่งคำ จำกัด หลังจากผ่านขั้นตอนของการลอยแร่แล้ว หิวแร่ทองแดง จะมีความ สามารถ ในเก็บกลับคืนโลหะทองคำอยู่ที่ 66.62 ถึง 69.87 %Recovery ซึ่งสามารถทำให้ทองคำมีปริมาณมากขึ้น จาก 1.8-2 ppm เป็น 30 ppm โลหะทองแดงสามารถเก็บกลับคืนได้ถึง 91.80 ถึง 93.70 %Recovery โดยปริมาณของโลหะทองแดง สามารถเพิ่มได้จาก 0.5-0.7 %Cu เป็น 15-17 %Cu สำหรับหิวแร่เหล็ก จะสามารถเก็บกลับคืนได้ที่ประมาณ 40 %Recovery ซึ่งเหล็กส่วนที่หายไปนั้นจะอยู่ในหางแร่จากกระบวนการลอยแร่ ซึ่ง หางแร่ยังมีทองคำเหลืออยู่ เพื่อเตรียมที่จะเข้าสู่กระบวนการละลายด้วยสารละลายไซยาไนด์ต่อไป

หัวแร่ทองแดงซัลไฟด์ (Cu-Fe-S) ที่ได้จากการทดลองลอยแร่ขึ้นมา นั้นสรุปได้ว่าเป็นแร่คาลโคไพไรต์ ที่ยังคงมีแร่เหล็กซัลไฟด์ (Fe-S) ที่อยู่ในรูปของแร่พิริโรไทต์หลงเหลืออยู่ โดยอาศัยการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ การวิเคราะห์ธาตุแบบ EPMA และการจำแนกชนิดแร่โดยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนที่ไม่พบไพไรต์ และแร่เหล็กซัลไฟด์อื่น รวมไปถึงการวิเคราะห์จากคุณสมบัติของแร่คาลโคไพไรต์ ที่จะต้องมีส่วนประกอบของทองแดงอยู่ที่ประมาณ 34% แต่ในตัวอย่างที่ลอยมาทั้งหมดมีประมาณแค่ครึ่งเดียวคือ 17%

แนวทางในการศึกษาต่อคือ พิริโรไทต์เป็นแร่ที่สามารถติดแม่เหล็กได้ ถ้าหากมีการนำเอาตัวอย่างแร่ที่ศึกษามาแยกด้วยแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่ง แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทองคำพบมากไป ในส่วนของแร่เหล็กซัลไฟด์ หรือทองแดงซัลไฟด์ หรือทั้งคู่ ก็จะสามารถหาแนวทางในการเก็บกลับคืนทองคำ และทองแดงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และเหมาะสมที่สุดได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมทรัพยากรธรณี . รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดทำแผนแม่บทด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อการ
พัฒนาทรัพยากรธรณีในเขตเศรษฐกิจแร่ (เขตแหล่งแร่ทองคำ จังหวัดพิจิตร
พิษณุโลกและเพชรบูรณ์). กองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี, 2545
กรมทรัพยากรธรณี. รายงานและเอกสารเผยแพร่ด้านแร่ ตามประเภทแร่ทองคำ (BOOKGOLD),
2522, 97 หน้า

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาแหล่งแร่และการ
ทำเหมืองแร่ทองคำของประเทศไทย ประจำปีงบประมาณ 2550. ศูนย์บริการ
วิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการส่งเสริมและพัฒนาการ
ทำเหมืองแร่ทองคำ ปีงบประมาณ 2551. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2550

บริษัท ทุ่งคำ จำกัด . รายงานลักษณะธรณีวิทยาแหล่งแร่ ชนิดสินแร่ ทองคำ เงิน และทองแดง
ประทานบัตรที่ 26968/15574, 26969/15575, 26970/15576, 26971/15558 และ
26972/15559. 2550, 36 หน้า

บริษัท ทุ่งคำ จำกัด . แผนผังโครงการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยวิธีเหมืองหอบ สำหรับคำขอประทาน
บัตรที่ 66/2538 ร่วมแผนผังโครงการเดียวกันกับคำขอประทานที่ 62/2538,
63/2538, 64/2538 และ 65/2538. 2538, 124 หน้า

บริษัท เอส.พี.เอส.คอนซัลติ้งเซอร์วิส จำกัด. รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการ
เหมืองแร่ทองคำ (คำขอประทานบัตรที่ 62-67/2538) บริษัท ทุ่งคำ จำกัด. บริษัท
เอส.พี.เอส.คอนซัลติ้งเซอร์วิส จำกัด, 2540.

ประพงษ์ มงคลวิทย์ . รายงานเรื่องการแต่งแร่ทองคำ ประกอบรายวิชา 2106320 Mineral
Processing II. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ภิญโญ มีชำนะ. เอกสารประกอบคำสอนรายวิชา Mineral and Process Engineering. ภาควิชา
วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,
2551, 413 หน้า

สุวิทย์ สัมปัตตะวนิช และงามพิศ อังคทะวานิช. ทองแดง. เอกสารเศรษฐกิจธรณีวิทยา เล่มที่ 11, กอง
เศรษฐกิจธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี, 2518, 51 หน้า

ภาษาอังกฤษ

B.A. Wills. Mineral Processing Technology. 7th edition, Pergamon Press, 2006

Colin D. Gribble and Allan J. Hall, Department of Geology & Applied Geology, University of Glasgow. Optical Mineralogy Principle & practice. England: University College London Press, 1992.

David J. Vaughan and James R. Craig. Mineral chemistry of metal sulfides. Vali-Ballou Press, Inc., Binghamton, NY, United States of America: Cambridge University Press, 1978.

Espiell et al., F. Espiell, A. Roca, M. Cruells and C. Núñez. Gold and silver recovery by cyanidation of arsenopyrite ore. 141–151 pp., 1986.

Fagan, P.A. (1998) Development of an ion chromatographic system suitable for monitoring the gold cyanidation process. [Online] 1988. Available from: <http://www.library.unsw.edu.au/~thesis/adt-root/uploads/approved/adt-NUN1999.0040/public/Chapter1.pdf> [2009, January 8]

Filmer, A.O., Lawrence, P.R. and Hoffmann, W. A Comparison of Cyanide, Thiourea and Chlorine as Lixiviant for Gold. Gold: Mining, Metallurgy and Geology, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, 279 p., 1984.

Hedley, N. and H. Tabachnick. Chemistry of Cyanidation. Mineral Dressing Note American Cyanamid Company. New York, 23-29 p., 1958.

Hubert Schmidbaur. Gold Progress in Chemistry, Biochemistry and Technology. West Sussex PO19 1UD, England: John Wiley & Sons Ltd, 1999.

James R. Craig and David J. Vaughan. Ore Microscopy and Ore Petrography. United States of America: John Wiley & Sons Ltd, 1981.

J.C. Yannopoulos. The Extractive Metallurgy of Gold. United States of America: Van Nostrand Reinhold, 1991.

John Marsden, Iain House. The Chemistry of Gold Extraction. England: Ellis Horwood Limited, 1992.

Makipirtti I, Simo A. (Nakkila, FI), Polvi, Veikko M. (Pori, FI), Saari, Kaarlo M. J. (Vanha-Ulvila, FI), Setälä, Pekka T. (Nakkila, FI). Process for the separation of gold and silver from complex sulfide ores and concentrates. [Online]. 1984.

Available from: <http://www.sumobrain.com/patents/4431614.html> [2009, January 8]

Metcon Laboratories PTY Limited., METALLURGICAL TESTING OF PRIMARY AND OXIDE SAMPLES FROM THE LOEI PROSPECT (THAILAND). September 1995, 67 p.

Paul Dalley, Brad Ellis. Treatment of Ores Containing Reactive Iron Sulphides. [Online]. Multi Mix Systems Pty Ltd: Available from: www.multimix.com.au/DOCUMENTS/Technical%20Bulletin1.PDF [2008, December 7]

T.K. Rose and W.A.C. Newman. The Metallurgy of Gold. London: Charles Griffin and Company Ltd., 1937.

Somsak Roumkid, Chatchai Toso, George Brech., TUNGKUM GOLD PROJECT-PIT SLOPE DESIGN T1 AND T1-8 PITS. March 2002, 22 p.

Surasak Yamned. Ore Mineragraphy of Thung Kham Deposits, Amphoe Muang, Changwat Loei. Thailand: A senior project submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science, Department of Geology, Chulalongkorn University, March 1999.

Stenhouse, J. F., Armstrong. W. M. Trans.-Can. Inst. Min. Met., 1952.

Tongchai Rodmanee. Genetic Model of Phu Thap Fah Gold Deposit. April 2000.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย พีท หอมชื่น เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ.2527 ที่อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 เมื่อสำเร็จการศึกษา ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทสาขา วิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 จนถึงปัจจุบัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย