

รายงานวิชาการ

การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในแร่โอลิเมนที่ได้จากกระบวนการผลิตทรายแก้ว

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

รายงานวิชาการ

การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในแร่โอลิเมนต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตทรายแก้ว

นายณรงค์ ยืนยงหัตถกรรม

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

อธิบดีกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

นายวิษณุ ทับเที่ยง

จัดพิมพ์โดย กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ (662) 202 3888 โทรสาร (662) 354 0392

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2563
จำนวน 20 เล่ม

ข้อมูลการลงรายการบรรณานุกรม

ณรงค์ ยืนยงหัตถการณ์.

การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในแร่โอลเมนิต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตทรายแก้ว/

โดย ณรงค์ ยืนยงหัตถการณ์. กรุงเทพฯ :

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2563.

116 หน้า : ภาพประกอบ : ตาราง ; 30 ซม.

รายงานวิชาการ

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ได้นำหัวแร่ดิบจากกระบวนการแต่งแร่ทรายแก้วจากทรายเหลือทิ้งของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด จังหวัดนครราชสีมา และหัวแร่ดิบจากกระบวนการแต่งแร่ทรายแก้วจากแหล่งของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด จังหวัดระยอง มาเพิ่มความเข้มข้นด้วย Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้ง แล้วนำหัวแร่เข้มข้นดังกล่าวไปผ่านกระบวนการแต่งแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ได้หัวแร่โอลิเมไนต์สะอาด

หัวแร่โอลิเมไนต์สะอาดของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ได้รับการคัดเลือกให้เป็นตัวอย่างสำหรับการทดลองทางโลหวิทยา โดยทำการตรวจสอบคุณภาพด้วยเครื่องมือ XRF และ XRD ในเบื้องต้น หลังจากนั้น ใช้เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) เป็นจุดประสงค์หลักในการศึกษา โดยเริ่มทำการเผาแร่แบบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลาต่าง ๆ เพื่อศึกษาเฟสที่ได้ของแร่ภายหลังการเผา จากนั้นแร่ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที ถูกนำไปเผารีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง โดยมีถ่านโค้กเป็นรีดิวเซอร์ ในอัตราส่วนแร่:ถ่านเท่ากับ 5:3 คงอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ เพื่อให้ธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบของแร่โอลิเมไนต์เปลี่ยนสภาพเป็นเหล็กที่สามารถสลายตัวภายใต้การชะล้างด้วยน้ำ

แร่ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และเผารีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที ถูกนำไปกวนพ่นอากาศที่ระยะเวลาในการกวนต่าง ๆ ในน้ำที่มีสารแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH₄Cl) เป็น Buffer ปกป้องค่า pH ของสารละลายสูง เหล็กที่สลายตัวออกจากแร่และแขวนลอยอยู่ในสารละลายน้ำและแอมโมเนียมคลอไรด์จะถูกชะล้างไป หลังจากศึกษาผลการกวนพ่นอากาศที่ระยะเวลาต่าง ๆ กันแล้ว แร่ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และเผารีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที และกวนพ่นอากาศนาน 30 นาที ถูกนำมาศึกษาการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์ นาน 30 นาที เพื่อให้เหล็กออกไซด์และมลทินอื่น ๆ สลายตัวออกไปที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

จากการศึกษานี้พบว่า หัวแร่ดิบจากแหล่งทรายแก้วธรรมชาติและทรายแก้วจากแหล่งทรายก่อสร้างที่ถูกทิ้งไป สามารถนำมาเพิ่มมูลค่าโดยการเพิ่มความเข้มข้นด้วยเครื่องมือแต่งแร่จนเป็นแร่โอลิเมไนต์ที่มีคุณภาพดี เมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางโลหวิทยายังสามารถเพิ่มสัดส่วนของธาตุไทเทเนียมจาก 41.63% เป็น 53.51% ทำให้มูลค่าของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

ทั้งนี้ยังได้นำเสนอกระบวนการต้นแบบที่ประกอบด้วยกระบวนการแต่งแร่ด้วย Reichert Spiral แม่เหล็กถาวร ไฮโดรไซโคลอน ตะแกรงหมุน เซลล์ลอยแร่ ที่คาดว่าจะมีความสะดวก รวดเร็ว ประหยัด ง่ายต่อการพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมต่อเนื่องจากกระบวนการแต่งแร่เดิม

ABSTRACT

Rejected concentrate (Tailing) of Reichert Spiral's silica sand processing plants from CPAC located in Nakhonratchasima province and Natural Sandglass Co., Ltd. Located in Rayong province were studied in an attempt to enrich their feasibly qualities with a series of additional fifth duplicating Reichert Spiralling on every concentrate product. The end products from the fifth stage were dried and fed to induced roll magnetic separator where magnetic products were collected as ilmenite minerals.

The ilmenite minerals from Natural Sandglass Co., Ltd. processing plant were used for further metallurgical treatment, namely Becher process, the background XRF/XRD of which were investigated. Induction furnace was used as one of the major purpose to study.

First, an amount of the said ilmenite mineral was induced to the oxidation temperature $1,150^{\circ}\text{C}$ at various soaking periods where mineral was believed to change in its phases. After cooling down, the oxidized products at soaking period of 60 minute were used as feeds to the second stage of pyrometallurgical process, reduction process. The oxidized minerals were then mixed with coke and induced to the temperature $1,360^{\circ}\text{C}$ at various periods where the ferric iron phase in the mineral was believed to be reduced to a metallic iron which could be rusted by water in the next stage.

Reduced minerals from the second stage at the soaking period of 30 minute were then stirred and aerated further on the third stage called aeration. The aeration technique involved the solution of water and 1% ammonium chloride (NH_4Cl) as pH buffer. The aeration was intent to rust the metallic iron dispatching from the reduced minerals to suspend in the water and washed away. Toward this stage, the aeration was done at various periods. The washed product of the aeration stage at 30 minute aerated period was finally selected as feed to the extraction stage.

The extraction stage involved the use of 0.5 molar sulfuric acid (H_2SO_4). Stirred thoroughly with the selected product from the aeration stage for the period of 30 minute at room temperature and normal atmospheric pressure. The end product was washed. All products from ever stage were always examined under XRF/XRD techniques.

This study concluded that rejected concentrate (Tailing) of Reichert Spiral's silica sand processing plants both from silica sand deposits and proper construction sand deposits could be value added under proper mineral processing technique to get good quality ilmenite minerals while these minerals could yield a better proportion of titanium element from 41.63% to 53.51% after passing through metallurgical treatment.

The pilot scale mineral processing equipment, induction furnace, aeration and extraction cells set up were all together proposed in this paper.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ

- บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างแร่และผลวิเคราะห์แร่
- บริษัท ทอพซิลิกา จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และ Reichert Spiral
- บริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)
- เจ้าหน้าที่กลุ่มนวัตกรรมอุตสาหกรรมแร่ กองนวัตกรรมวัสดุและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการแต่งแร่และสกัดแร่
- นายตรีทิพย์ ศุภสุนทรกุล นายณรินทร์ มหายศนันท์ และนางสาวอาทิตย์ยา สุวคันธกุล กลุ่มจัดหาแหล่งวัตถุดิบอุตสาหกรรม กองบริหารจัดการวัตถุดิบอุตสาหกรรม กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ที่ให้ความอนุเคราะห์การดำเนินการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่องมือ XRF และ XRD
- ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ดำเนินการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่องมือ XRF และ XRD

ณรงค์ ยืนยงหัตถกรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
ABSTRACT	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	vii
สารบัญรูป	viii
1. บทนำ	1-1
1.1 วัตถุประสงค์	1-3
1.2 ขอบเขตการศึกษา	1-3
1.3 แนวทางการศึกษา	1-3
1.4 ประโยชน์	1-4
2. ลักษณะแร่ที่นำมาศึกษา	2-1
2.1 แร่ทรายแก้ว (Silica Sand)	2-1
2.1.1 แหล่งทรายแก้วในประเทศไทย	2-1
2.1.2 กระบวนการผลิตแร่ทรายแก้วจากแหล่งแร่และผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต	
ทรายก่อสร้างในประเทศไทย	2-4
2.1.3 ประโยชน์ของทรายแก้ว	2-9
2.2 แร่อิลเมนไนต์ (Ilmenite)	2-12
2.2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของแร่อิลเมนไนต์	2-12
2.2.2 การกำเนิดของแร่อิลเมนไนต์	2-14
2.2.3 แหล่งกำเนิดของแร่อิลเมนไนต์	2-14
2.2.4 การใช้ประโยชน์แร่อิลเมนไนต์	2-14
2.2.5 คุณลักษณะของอิลเมนไนต์ในต่างประเทศ	2-15
2.2.6 คุณลักษณะของอิลเมนไนต์ในแหล่งทรายของประเทศไทย	2-16
2.3 แร่รูไทล์ (Rutile)	2-16
2.4 ไทเทเนียม (Titanium)	2-17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. ทฤษฎีและเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในแร่โอลเมนไนต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตทรายแก้ว	3-1
3.1 การเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่หนัก	3-3
3.1.1 การคัดขนาดด้วยตะแกรง	3-3
3.1.2 การปรับปริมาณของแข็งในน้ำ (%solid) ด้วยไฮโดรไซโคลอน	3-4
3.1.3 การแต่งแร่ด้วยเครื่องสไปรอล (Reichert Spiral)	3-5
3.1.4 การแต่งแร่ด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Separation)	3-9
3.1.4.1 คุณสมบัติการดูดติดแม่เหล็ก	3-9
3.1.4.2 อุปกรณ์สำหรับแยกแร่โดยอาศัยอำนาจแม่เหล็ก (Magnetic Separator)	3-10
3.2 การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา	3-12
3.2.1 กระบวนการไทรอน (Tiron Process)	3-12
3.2.2 กระบวนการอิชิวาร่า (Ishiwara Process)	3-12
3.2.3 กระบวนการเบนนิไลต์ (Benilite Process)	3-13
3.2.4 กระบวนการไซโร (CSRIO Process)	3-14
3.2.5 กระบวนการมิตซูบิชิ (Mitsubishi Process)	3-14
3.2.6 กระบวนการไฮโดรคลอรีเนชัน (Hydrochlorination Process)	3-16
3.2.7 กระบวนการ Becher (Becher Process)	3-17
3.2.7.1 การทำออกซิเดชันแร่โอลเมนไนต์ (Oxidation)	3-18
3.2.7.2 การรีดักชันแร่โอลเมนไนต์ภายหลังกระบวนการออกซิเดชัน (Reduction)	3-20
3.2.7.3 การกวนพ่นอากาศ (Aeration)	3-22
3.2.7.4 การสกัดหรือการละลายแร่ด้วยสารละลายเคมี (Chemical Extraction)	3-24
3.3 เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา	3-26
3.3.1 การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Melting)	3-26
3.3.1.1 หลักการของเทคโนโลยี	3-26
3.3.1.2 ส่วนประกอบของเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ	3-28
3.3.2 เครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกวน (Sub-A Flotation Cell)	3-30
3.3.3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF)	3-32
3.3.4 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer, XRD)	3-34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. การดำเนินการศึกษา	4-1
4.1 การเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่หนัก	4-1
4.1.1 วิธีการทดลอง	4-1
4.1.2 ผลการทดลอง	4-1
4.2 การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา	4-8
4.2.1 การออกซิเดชัน	4-9
4.2.1.1 วิธีการทดลอง	4-9
4.2.1.2 ผลการทดลอง	4-10
4.2.2 การรีดักชัน	4-13
4.2.2.1 วิธีการทดลอง	4-13
4.2.2.2 ผลการทดลอง	4-15
4.2.3 การกวนพ่นอากาศ	4-19
4.2.3.1 วิธีการทดลอง	4-19
4.2.3.2 ผลการทดลอง	4-21
4.2.4 การสกัดด้วยสารเคมี	4-24
4.2.4.1 วิธีการทดลอง	4-24
4.2.4.2 ผลการทดลอง	4-24
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	5-1
5.1 สรุปผลการศึกษา	5-1
5.2 ข้อเสนอแนะ	5-3
 บรรณานุกรม	 xiii
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF ของแร่โอลิเมนไนต์	ก-1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตแร่ดีบุกและอลูมิเนียมในประเทศไทยปี 2557 – 2561 (เมตริกตัน)	1-2
ตารางที่ 2.1 ปริมาณการผลิตทรายแก้ว จังหวัดระยอง ปี 2557 – 2561 (เมตริกตัน)	2-1
ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของทรายแก้วที่ผลิตได้ในประเทศไทย จากแหล่งในจังหวัดระยอง สำหรับใช้ใน อุตสาหกรรม	2-2
ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดมาตรฐานของทรายแก้วโดย U.S. Bureau of Standard	2-2
ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของแร่อลูมิเนียมที่ผลิตได้ในสหรัฐอเมริกา ผลิตโดย P.W.Gillibrand Co. ในแคลิฟอร์เนียจากแหล่ง Oak Spring alluvial	2-15
ตารางที่ 2.5 การผลิตแร่อลูมิเนียมเกรดซัลเฟต (Sulphate grade) โดยมีเครื่องหมายการค้าว่า Yoganup และมีแหล่งที่ Capel, Western Australia	2-15
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเฉพาะของแร่ที่ใช้ในการแยกแร่	3-2
ตารางที่ 3.2 ข้อดี-ข้อเสียของการแต่งแร่ด้วยเครื่องสไปรอล	3-6
ตารางที่ 3.3 ผลการรีดักชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ	3-22
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักของหัวแร่หนักเข้มข้นที่ผ่าน Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้ง	4-8
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์หัวแร่หนักเข้มข้นที่ผ่าน Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้ง	4-8
ตารางที่ 4.3 น้ำหนักของแร่หลังผ่านการแต่งด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า	4-8
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์หัวแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการแต่งด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า	4-8
ตารางที่ 4.5 รายละเอียดผลการเผาหัวแร่อลูมิเนียม (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลาต่าง ๆ	4-10
ตารางที่ 4.6 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน	4-16
ตารางที่ 4.7 ผลการเผาแร่อลูมิเนียม (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ	4-16
ตารางที่ 4.8 ผลการเผาแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันที่ อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที และทำการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ที่เวลาต่าง ๆ	4-23
ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์แร่อลูมิเนียมหลังจากการเพิ่มความเข้มข้นและการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีทางโลหวิทยา	4-25

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ราคาส่งออกแร่โอลิเมนไนต์	1-2
รูปที่ 2.1 แผนที่แสดงแหล่งทรายแก้วของประเทศไทย	2-3
รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตทรายก่อสร้างและการเกิดผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างและทรายแก้วที่ได้	2-5
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างทรายดิบ ทรายก่อสร้าง กรวดและทรายหยาบ ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต ทรายก่อสร้าง ทรายแก้วจาก Reichert Spiral และหัวแร่หนัก	2-6
รูปที่ 2.4 ผลวิเคราะห์ตัวอย่างทรายเหลือทิ้งจากขบวนการล้างทรายก่อนปรับปรุงคุณภาพ	2-7
รูปที่ 2.5 ผลวิเคราะห์ตัวอย่างทรายเหลือทิ้งจากขบวนการล้างทรายหลังปรับปรุงคุณภาพ	2-8
รูปที่ 2.6 บน) แร่โอลิเมนไนต์ (ล่าง) รูปผลึกของแร่โอลิเมนไนต์	2-12
รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างภาคตัดแนวตั้งของคอร์ันดัมหรือฮีมาไทต์ แสดงเฉพาะประจุบวก (ข) โครงสร้างภาคตัดแนวตั้งของโอลิเมนไนต์ แสดงเฉพาะประจุบวก	2-13
รูปที่ 2.8 แสดงองค์ประกอบธรรมชาติของแร่ออกไซด์ในระบบ $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	2-14
รูปที่ 2.9 ราคาส่งออกแร่ลูโคซีน (ไทเทเนียมไดออกไซด์)	2-19
รูปที่ 3.1 ตะแกรงอยู่กับที่ (Grizzly)	3-3
รูปที่ 3.2 ตะแกรงหมุน (Trommel)	3-4
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลน	3-5
รูปที่ 3.4 เครื่องสไปรอล ที่กลุ่มแต่งแร่และใช้ประโยชน์แร่ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่	3-7
รูปที่ 3.5 ลักษณะการไหลของแร่ในเครื่องสไปรอล	3-8
รูปที่ 3.6 ลักษณะการไหลของอนุภาคแร่ที่แยกโดยเครื่องสไปรอล	3-8
รูปที่ 3.7 เส้นแรงที่เกิดกับเม็ดแร่ในการแยกแร่ด้วยสไปรอล	3-8
รูปที่ 3.8 แสดงการแยกเศษเหล็กที่ปนกับแร่ก่อนเข้ากระบวนการแต่งแร่ ทั้งแบบ Pulley และแบบแขวน	3-10
รูปที่ 3.9 ลักษณะลูกกลิ้งและการทำงานของลูกกลิ้งในเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบลูกกลิ้ง	3-10
รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบลูกกลิ้ง (Drum Magnetic Separator)	3-11
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะการทำงานของเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบจาน (Rapid Magnetic Separator)	3-11
รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบจาน (Rapid Magnetic Separator)	3-11
รูปที่ 3.13 แผนผังกระบวนการไทรอน (Tiron Process)	3-12
รูปที่ 3.14 แผนผังกระบวนการอิชิวาร่า (Ishiwara Process)	3-13
รูปที่ 3.15 แผนผังกระบวนการเบนนิไลต์ (Benilite Process)	3-13
รูปที่ 3.16 แผนผังกระบวนการไซโร (CSRIO Process)	3-14

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.17 แผนผังกระบวนการมิตซูบิชิ (Mitsubishi Process)	3-15
รูปที่ 3.18 แผนผังกระบวนการไฮโดรคลอรีเนชัน (Hydrochlorination Process)	3-16
รูปที่ 3.19 แผนผังกระบวนการ Becher (Becher Process)	3-18
รูปที่ 3.20 การกระจายของเฟสระหว่างการออกซิเดชัน	3-19
รูปที่ 3.21 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อการออกซิเดชันแร่โอลิเมนไนต์	3-19
รูปที่ 3.22 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิ 1,000 °C ที่เวลาต่าง ๆ	3-20
รูปที่ 3.23 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,200 °C ที่เวลาต่าง ๆ	3-21
รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการเพิ่มคุณภาพแร่โอลิเมนไนต์เป็นรีดิวซ์โอลิเมนไนต์และรูไทล์สังเคราะห์	3-23
รูปที่ 3.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ในรีดิวซ์โอลิเมนไนต์ภายหลังการกวนพ่นอากาศ	3-23
รูปที่ 3.26 ผลของชนิดของสารละลายที่มีต่อปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ในรีดิวซ์โอลิเมนไนต์ภายหลังการกวนพ่นอากาศ	3-24
รูปที่ 3.27 ผลของอัตราการรีดักชันที่มีต่อการชะละลายแร่	3-25
รูปที่ 3.28 ผลของการออกซิเดชันและรีดักชันที่มีต่อการชะละลายโอลิเมนไนต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก	3-25
รูปที่ 3.29 ผลของอุณหภูมิในการออกซิเดชันที่มีต่ออัตราการชะละลาย	3-26
รูปที่ 3.30 ผลของอุณหภูมิในการรีดักชันที่มีต่ออัตราการชะละลาย	3-26
รูปที่ 3.31 เตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ	3-27
รูปที่ 3.32 เบ้าหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ	3-27
รูปที่ 3.33 โครงสร้างของเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ	3-28
รูปที่ 3.34 ขดลวดเหนี่ยวนำของเตาหลอม	3-29
รูปที่ 3.35 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า	3-29
รูปที่ 3.36 แสดงเครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกว	3-31
รูปที่ 3.37 แสดงลักษณะของใบพัดที่ใช้ขณะกว และสร้างแรงหนีศูนย์กลางเพื่อดูดอากาศ	3-31
รูปที่ 3.38 แสดงลักษณะและการทำงานของเครื่องกวแร่แบบดูดอากาศขณะกว	3-31
รูปที่ 3.39 ส่วนประกอบตัวเครื่อง XRF แบบพกพาของ OLYMPUS	3-32
รูปที่ 3.40 หลักการทำงานของเครื่อง XRF	3-33
รูปที่ 3.41 แสดง Limits of Detection ของเครื่องวิเคราะห์ XRF แบบพกพาของ OLYMPUS	3-33
รูปที่ 3.42 แสดงหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	3-34
รูปที่ 3.43 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer) แบบพกพาของ OLYMPUS	3-34

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในแร่โอลเมนิต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตทรายแก้ว	4-2
รูปที่ 4.2 แร่หนักจากกระบวนการแต่งทรายแก้วด้วยไฮโดรไซโคลอนและ Reichert Spiral ของ (ก) บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และ (ข) บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด	4-3
รูปที่ 4.3 แสดงกองหัวแร่หนัก (ทิ้ง) ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ที่ใช้ในการศึกษานี้	4-3
รูปที่ 4.4 Reichert Spiral ที่ใช้ในการศึกษานี้	4-4
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการปรับช่องแบ่งเก็บหัวแร่หนักกับทรายในอัตราส่วน 30:70	4-4
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของแร่บนราง Reichert Spiral	4-5
รูปที่ 4.7 แสดงวิธีการเก็บหัวแร่หนักเพื่อใช้เป็นแร่ป้อนในครั้งต่อไป	4-5
รูปที่ 4.8 แสดงการแยกแร่โอลเมนิต์จากหัวแร่หนักด้วยเครื่องแยกแร่แม่เหล็กไฟฟ้า (Induced Roll)	4-6
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแร่หนัก (ทิ้ง) และแร่หนัก (ทิ้ง) หลังผ่าน Reichert Spiral 5 ครั้ง ของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด	4-6
รูปที่ 4.10 แสดงแร่หลังผ่านเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Induced Roll) (ซ้าย) ทรายสกปรก (ขวา) แร่โอลเมนิต์	4-7
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายเม็ดแร่โอลเมนิต์หลังผ่านเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Induced Roll) (ก) บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (ข) บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด	4-7
รูปที่ 4.12 แสดงสถานที่ทดลอง ณ บริษัท โกลบอล คอนซัลตติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด	4-9
รูปที่ 4.13 แร่โอลเมนิต์ขณะเร่งอุณหภูมิเผาออกซิเดชันประมาณ 800 °C	4-10
รูปที่ 4.14 แสดงผลวิเคราะห์แร่โอลเมนิต์ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ด้วยเครื่อง XRD แบบพกพาของ OLUMPUS	4-11
รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างหัวแร่โอลเมนิต์หลังเผา (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลา 30 นาที	4-11
รูปที่ 4.16 แสดงผลการเผาหัวแร่โอลเมนิต์ (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลาต่าง ๆ	4-12
รูปที่ 4.17 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลเมนิต์ (ออกซิเดชัน) ที่ 1,150 °C ที่เวลา 30 นาที	4-12
รูปที่ 4.18 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลเมนิต์ (ออกซิเดชัน) ที่ 1,150 °C ที่เวลา 60 นาที	4-12
รูปที่ 4.19 แสดงการเผาไรต์กั้นโดยไม่ปิดฝาเบ้าหลอม	4-13
รูปที่ 4.20 (ก) แสดงลักษณะของเบ้าหลอมที่มีการปิดฝาก่อนเริ่มเผาไรต์กั้นเพื่อให้มีบรรยากาศภายในเป็น CO (ข) แสดงลักษณะของเบ้าหลอมที่มีการปิดฝาลดอุณหภูมิเพื่อให้มีบรรยากาศภายในเป็น CO	4-14
รูปที่ 4.21 แร่โอลเมนิต์หลังเผาไรต์กั้นที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที	4-14
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบแร่โอลเมนิต์ (บน) หลังเผาไรต์กั้น (ล่าง) ก่อนเผาไรต์กั้น	4-15

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.23 ก) ลักษณะของโอลิเมนไนต์หลังเผาที่รีดักชันในเบ้า ข) แร่โอลิเมนไนต์หลังเผาที่รีดักชันเมื่อเทจากเบ้า	4-16
รูปที่ 4.24 (ซ้าย) แร่โอลิเมนไนต์หลังเผาที่รีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 10 นาที (ขวา) สะเก็ดโลหะที่ได้จากการเผาที่รีดักชันขยาย 10 เท่า	4-16
รูปที่ 4.25 แสดงผลการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) 60 นาที ที่อุณหภูมิ 1,150 °C และรีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ	4-17
รูปที่ 4.26 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (รีดักชัน) ที่ 1,360 °C ที่เวลา 20 นาที	4-18
รูปที่ 4.27 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (รีดักชัน) ที่ 1,360 °C ที่เวลา 30 นาที	4-18
รูปที่ 4.28 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (รีดักชัน) ที่ 1,360 °C ที่เวลา 60 นาที	4-19
รูปที่ 4.29 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (รีดักชัน) ที่ 1,360 °C ที่เวลา 90 นาที	4-19
รูปที่ 4.30 การเตรียมสารละลาย 1% NH ₄ Cl ในน้ำ	4-20
รูปที่ 4.31 การเก็บตัวอย่างโอลิเมนไนต์หลังเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที ก่อนทำการกวนพ่นอากาศ	4-20
รูปที่ 4.32 ความเร็วรอบของใบพัดที่ใช้ในการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ด้วยเครื่อง Flotation Sub-A	4-21
รูปที่ 4.33 แสดงการทำการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ในน้ำที่ผสมสาร 1% NH ₄ Cl	4-22
รูปที่ 4.34 ลักษณะแร่โอลิเมนไนต์หลังกวนพ่นอากาศ (Aeration) ในสารละลาย 1% NH ₄ Cl นาน 180 นาที	4-22
รูปที่ 4.35 ผลการเผาแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันที่ อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที และทำการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ที่เวลาต่าง ๆ	4-23
รูปที่ 4.36 ตัวอย่างส่วนผสมแร่และสารละลายกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ ภายหลังกัฏกรदनาน 30 นาที (ซ้าย) ในเครื่องกวนพ่นอากาศ (ขวา) ส่วนผสมที่ผ่านกระบวนการแล้วก่อนเทสารละลายทิ้ง	4-25
รูปที่ 4.37 ก) แร่ภายหลังการกวนพ่นอากาศและกัฏด้วยกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ ข) แร่ภายหลังการกวนพ่นอากาศ	4-25
รูปที่ 4.38 ผลวิเคราะห์แร่โอลิเมนไนต์หลังผ่านการเพิ่มความเข้มข้น และการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา	4-26
รูปที่ 4.39 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่ 1,150 °C นาน 60 นาที รีดักชันที่ 1,360 °C นาน 30 นาที และกวนพ่นอากาศนาน 30 นาที	4-26
รูปที่ 4.40 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที รีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที กวนพ่นอากาศนาน 30 นาที และผ่านการกัฏกรदन 0.5 โมลาร์ นาน 30 นาที	4-26

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.1 แสดงการจัดเครื่องมือเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่ดิบอิลเมไนต์ชุดที่ 1 2 3 4 และ 5	5-4
รูปที่ 5.2 แสดงสายพานแยกแร่ผ่านลูกกลิ้งแม่เหล็กกำลังสูง (Permanent Magnetic Separator)	5-5
รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะของแร่และการเคลื่อนผ่านของแร่อิลเมไนต์เข้าสู่และออกจากแร่	5-6
รูปที่ 5.4 แสดงประตูปิดเปิดกรณีจำเป็นต้องนำแร่ที่มีการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ออกจากแร่	5-6
รูปที่ 5.5 แสดงอนุกรมของเครื่องกวนส่วนผสม เซลล์ลอยแร่แบบต่อเนื่องและชุดแยกสารแขวนลอยด้วยไฮโดรไซโคลน	5-7
รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการจัดเรียงอุปกรณ์ล้างทำความสะอาดแร่และคัดแยกสารแขวนลอย	5-8
รูปที่ 5.7 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์เพื่อสกัดแร่ด้วยกรดซัลฟูริก ล้างทำความสะอาดและทำลายความเป็นกรดของสารละลายและสารแขวนลอยที่เหลือ	5-9

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการไทเทเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งนอกจากจะนำไปผลิตเป็นโลหะไทเทเนียมแล้ว ยังใช้ในอุตสาหกรรมทำสี (Paint Pigment) โดยเฉพาะแม่สีขาว อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นสารเติมในกระดาษเพื่อปรับปรุงความทึบแสงและความสามารถในการพิมพ์ เป็นฟลักซ์ในอุตสาหกรรมลวดเชื่อม อุตสาหกรรมพลาสติกมีการเจือแม่สีไทเทเนียมเพื่อด้านแสงอุลตราไวโอเลตที่ทำให้พลาสติกเสื่อม จึงทำให้ปริมาณสำรองของรูไทล์ซึ่งเป็นแร่ที่ประกอบด้วยไทเทเนียมออกไซด์ 95-98% ลดต่ำลง ทั้งนี้ตัวเลขประมาณการปริมาณสำรองของรูไทล์ในโลกน้อยกว่า 10 ล้านตัน

เนื่องจากสินแร่ที่สำคัญของไทเทเนียมคือ อิลเมไนต์ (Ilmenite) และรูไทล์ (Rutile) ซึ่งอยู่ในรูปของออกไซด์ทั้งคู่ โดยที่อิลเมไนต์เป็นแร่ออกไซด์ของเหล็กและไทเทเนียมมีสูตรทางเคมี FeTiO_3 ส่วนรูไทล์เป็นแร่ออกไซด์ของไทเทเนียม มีสูตรทางเคมี TiO_2 โดยเฉพาะแร่อิลเมไนต์ซึ่งแต่เดิมเป็นแร่ราคาถูก มีปริมาณสำรองมากในประเทศไทย แร่ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะเกิดปนอยู่กับแร่ดีบุก (Cassiterite, SnO_2) ซึ่งหลังจากแยกเอาหัวแร่ดีบุกออกไปแล้ว แร่อิลเมไนต์จะอยู่ในส่วนของหางแร่ดีบุกที่เรียกกันว่า อามังหรือมูลแร่ (Amang) มูลแร่เหล่านี้จะประกอบด้วยแร่อิลเมไนต์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือแร่เป็นแร่หนัก (Heavy Mineral) ชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะกองไว้ตามเหมืองดีบุกต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก เนื่องจากปัจจุบันการผลิตแร่ดีบุกและแร่อิลเมไนต์ในประเทศไทยมีน้อยมาก (ตารางที่ 1.1) อีกทั้งยังไม่สามารถนำแร่อิลเมไนต์มาใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่า นอกจากผลิตเพื่อส่งออกเป็นวัตถุดิบไปยังประเทศต่าง ๆ เช่น เกาหลีใต้ มาเลเซีย และญี่ปุ่น ด้วยการแยกแร่อิลเมไนต์ออกจากแร่หนักชนิดอื่น ๆ เช่น โมนาไซต์ (Monazite) เซอร์คอน (Zircon) โคลัมไบต์ (Columbite) แทนทาลิต (Tantalite) การ์เนต (Garnet) และซีนไทม์ (Xenotime) โดยการใช้เครื่องแยกแม่เหล็ก เครื่องแยกแร่ไฟฟ้าสถิตและไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์วิจัยเพื่อเพิ่มคุณภาพของแร่อิลเมไนต์เพื่อผลิตไทเทเนียมออกไซด์หรือรูไทล์สังเคราะห์ ซึ่งมีคุณภาพและราคาสูงขึ้นกว่าแร่อิลเมไนต์มาก

แม้ว่าราคาแร่อิลเมไนต์ในปัจจุบันจะสูงขึ้นมาก (รูปที่ 1.1) และยังไม่เป็นเหตุจูงใจให้มีการผลิตแร่อิลเมไนต์ แต่เนื่องจากอุตสาหกรรมผลิตแร่ทรายแก้วมีกำลังการผลิตสูง เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการป้อนโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ภายในประเทศ ทำให้ได้มูลแร่เหลือทิ้งไว้เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้จากการตรวจสอบพบว่า มูลแร่ดังกล่าวมีแนวโน้มพบแร่อิลเมไนต์ ในขณะที่การผลิตแร่อิลเมไนต์เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องสามารถเพิ่มมูลค่าได้อย่างมาก ได้แก่ การผลิตแม่สีสังเคราะห์ อะนาเทส (Anatase) ลวดเชื่อม เป็นต้น ซึ่งต้องการธาตุไทเทเนียมสูง การเพิ่มปริมาณธาตุไทเทเนียมในเนื้อแร่อิลเมไนต์ จำเป็นจะต้องมีการสกัดโลหะหนักที่ปนอยู่ในโมเลกุลของแร่อิลเมไนต์ออก โดยทั่วไปมีทั้งแบบสกัดด้วยสารละลายและการหลอมละลายด้วยความร้อน ในการศึกษานี้ การสกัดโลหะหนักจะทำต่อเนื่องจากกระบวนการแต่งแร่กากทรายเหลือทิ้ง (แร่หนัก) จากกระบวนการผลิตทรายแก้ว โดยมีแนวคิด

ให้ใช้กระบวนการที่ง่าย สะดวก ซึ่งกระบวนการ Becher Process ที่ใช้กันอยู่ในประเทศออสเตรเลียมีความเหมาะสม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อหลอมละลายเหล็กและไม่ใช้สารเคมีอันตรายที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน อีกทั้งในปัจจุบันมีการนำเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) มาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตแร่ดีบุกและอิลเมไนต์ในประเทศไทยปี 2557 – 2561 (เมตริกตัน)
(Department of Primary Industries and Mines, 2019)

แร่	2557	2558	2559	2560	2561
ดีบุก	156	72	92	541	75
อิลเมไนต์	-	-	-	8	41

Customer Name: LKAB Minerals Asia Pacific Ltd.
Address: 3407 China Resources Building,
26 Harbour Road, Wanchai, Hong Kong
Tel : 852-2827-3000 Fax : 852-2827-5574

PI No. : 19-013
Date : January 23, 2019
Loading : Bangkok, Thailand
Loading Yard : Bangkok, Thailand
Discharge : South Manila, Philippines

PROFORMA INVOICE

Quantity	Description of Commodity	Unit Price	Amount
8 MT	Ilmenite 60 %	USD.370.00/MT CFR South Manila, Philippines	USD.2,960.00 <u>USD.2,960.00</u>

(Say: Two Thousand Nine Hundred Sixty Only)
Shipment : Within End January or End February 2019.
Packing : In 1 MT bag
Payment : By T/T covering 100% against the following Documents:
- Full set of original clean on board (Ocean B/L only).
- Commercial Invoice in 2 copies.
- Packing List in 2 copies.
- Certificate of analysis issue by Australian Laboratory Services Ltd. in 2 copies.

Advising Bank : The Siam Commercial Bank Public Company Limited (Chidlom Branch)
1060 Petchburi Road, Phayatai, Bangkok 10400 THAILAND (Swift: SICOTHBK)
Beneficiary : SAKORN MINERALS CO., LTD.
128/167-8 PHAYATAI PLAZA 15TH FL., PHAYATAI ROAD, TUNG PHAYATAI,
RATCHATHEWEE, BANGKOK 10400 THAILAND

Remark :
1. Transshipment allowed.
2. All bank charges outside Thailand are for applicant's account.
3. +/- 5% for both quantity and amount allowed.

For and on behalf of
SAKORN MINERALS CO., LTD.

สำเนาถูกต้อง
(นางสาวอรรณพ พลอยงาม)
ผู้อำนวยการบริษัทอรรณพปฏินิจ จำกัด



Authorized Signature

F-HO-01, Rev. 0

Date: 02/02/2558

รูปที่ 1.1 ราคาส่งออกแร่อิลเมไนต์

1.1 วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1) เพื่อศึกษาผลการเพิ่มคุณภาพทรายแก้วในส่วนที่เป็นกากแร่หรือหัวแร่โอลิเมไนต์
- 2) การเพิ่มคุณภาพจากกากแร่โอลิเมไนต์ให้มีคุณภาพสูงขึ้นเพียงพอ
- 3) การเตรียมองค์ประกอบของไทเทเนียมโดยวิธีสกัดด้วยสารละลายเพื่อให้ได้สารประกอบไทเทเนียมที่มีคุณภาพสูง สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมี หรือนำไปผลิตเป็นโลหะไทเทเนียมในอนาคต
- 4) เสนอแนวทางการนำทรายเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตทรายแก้วมาเพิ่มมูลค่าให้ได้ไทเทเนียมออกไซด์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น

1.2 ขอบเขตการศึกษา

- 1) รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับทรายแก้วและโอลิเมไนต์ เครื่องมือที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตแร่โอลิเมไนต์จากแหล่งทรายแก้วโดยเฉพาะที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมทรายแก้วและเครื่องมือที่เกี่ยวข้องพ่วงให้ง่าย ไม่ยุ่งยากและลงทุนต่ำ
- 2) ศึกษาคุณภาพแร่โอลิเมไนต์จากทรายเหลือทิ้งที่ผ่านกระบวนการเตรียมแร่ตามแนวทางที่ศึกษา
- 3) ศึกษาผลของแร่โอลิเมไนต์ที่ได้จากกระบวนการที่ผ่านขั้นตอนต่าง ๆ ภายในเตาหลอมอุณหภูมิสูง (ออกซิเดชัน – รีดักชัน)
- 4) ศึกษาคุณภาพของไทเทเนียมออกไซด์หลังจากการหลอมและชะละลายในน้ำที่มีการเติมอากาศ

1.3 แนวทางการศึกษา

- 1) ทรายเหลือทิ้งที่นำมาศึกษาได้จากกระบวนการแต่งแร่ทรายแก้วของ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด จังหวัดนครราชสีมา
- 2) เพิ่มคุณภาพทรายเหลือทิ้งจากข้อ 1) ด้วยเครื่องมือ High Tension Separator และวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ XRD/XRF
- 3) นำแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านกระบวนการแยกสกัดทางกายภาพด้วยเครื่องมือ High Tension Separator แล้ว ไปผ่านเตาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยใช้ถ่านโค้กเป็นเชื้อเพลิง ศึกษาผลที่ได้โดยเครื่องมือวิเคราะห์ XRD/XRF
- 4) ศึกษาการชะละลายของแร่ที่ผ่านกระบวนการแยกสกัดโดยการกวนและเติมอากาศด้วยเซลล์ลอยแร่ ขนาดทดลอง วิเคราะห์ผลที่เหลือจากการกวนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ XRD/XRF
- 5) สรุปผล

1.4 ประโยชน์

1) ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการนำทรายเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตทรายแก้วมาใช้ประโยชน์สูงสุด

2) ได้ทราบข้อมูลทางเทคนิค

3) ได้แนวโน้มของกระบวนการอุตสาหกรรมในการเพิ่มคุณภาพไทเทเนียมออกไซด์

บทที่ 2

ลักษณะแร่ที่นำมาศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะของแร่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ได้แก่ แร่ทรายแก้ว แร่โอลิเมนไนต์ แร่รูไทล์ และไทเทเนียม โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 แร่ทรายแก้ว (Silica Sand)

2.1.1 แหล่งทรายแก้วในประเทศไทย

ปัจจุบันปริมาณการใช้ทรายในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ โดยรวมมีมากถึง 1.5 – 2 ล้านตันต่อปี (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554) เฉพาะที่กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่จัดเก็บค่าภาคหลวงรวมประมาณ 1.5 ล้านตันต่อปี (ตารางที่ 2.1) (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2562)

เนื่องจากทรายแก้วเป็นวัตถุดิบตามธรรมชาติที่จำเป็นต้องมีการคัดเลือกแหล่งแร่ ตลอดจนการปรับปรุงคุณภาพให้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม จึงมีข้อกำหนดความต้องการของตลาดต่าง ๆ กัน (ตารางที่ 2.2 และ 2.3)

ผลการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีที่ดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2505-2544 พบว่ามีแหล่งทรายแก้วกระจายตามภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย (รูปที่ 2.1) จำนวน 38 แหล่ง มีปริมาณสำรองประมาณ 250 ล้านเมตริกตัน กระจายอยู่ตามแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ชายฝั่งทะเลภาคใต้ 16 แหล่ง ปริมาณสำรองรวม 140 ล้านเมตริกตัน
- 2) ชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก 19 แหล่ง ปริมาณสำรองรวม 115 ล้านเมตริกตัน
- 3) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3 แหล่ง ปริมาณสำรองรวม 11.2 ล้านเมตริกตัน (กรมทรัพยากรธรณี, 2545)

นอกจากนี้ยังมีแหล่งทรายแก้วจากทรายเหลือทิ้งที่ได้จากบ่อทรายก่อสร้าง ทรายทำยารังตีบุก (จุมพล คีนตัก, 2539)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการผลิตทรายแก้ว จังหวัดระยอง ปี 2557 – 2561 (เมตริกตัน) (Department of Primary Industries and Mines, 2019)

จังหวัด	2557	2558	2559	2560	2561
ระยอง	559,843	600,632	518,345	933,460	1,003,579
จังหวัดอื่น ๆ	574,063	590,980	584,354	822,848	553,639
รวม	1,133,906	1,191,612	1,102,699	1,756,308	1,557,218

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของทรายแก้วที่ผลิตได้ในประเทศไทย จากแหล่งในจังหวัดระยอง สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550)

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
ซิลิกา (SiO ₂)	99.45
อะลูมินา (Al ₂ O ₃)	0.27
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	-
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	0.04
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.09
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.37
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.1
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.3
การสูญเสียน้ำหนักในการเผาไหม้ (Loss on ignition)	0.12

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดมาตรฐานของทรายแก้วโดย U.S. Bureau of Standard (Johnstone and Johnstone, 1961)

คุณภาพ ของทราย	% SiO ₂ (ต่ำสุด)	% Al ₂ O ₃ (สูงสุด)	% Fe ₂ O ₃ (สูงสุด)	% (CaO+MgO) (สูงสุด)	การนำมาใช้ ประโยชน์
คุณภาพชั้นหนึ่ง	99.8	0.1	0.02	0.1	ทำแว่นตา
คุณภาพชั้นสอง	98.5	0.5	0.035	0.2	แก้วทนไฟและเครื่องถ้วยชาม
คุณภาพชั้นสาม	95.0	4.0	0.035	0.5	แก้วชนิดดี
คุณภาพชั้นสี่	98.5	0.5	0.06	0.5	แผ่นแก้วบาง แท่งแก้วกลม แก้วขัดให้มัน
คุณภาพชั้นห้า	95.0	4.0	0.06	0.5	-
คุณภาพชั้นหก	98.5	0.5	0.3	0.5	กระจกสีเขียว กระจกหน้าต่าง
คุณภาพชั้นเจ็ด	95.0	4.0	0.3	0.5	กระจกสีเขียว
คุณภาพชั้นแปด	98.0	0.5	1.0	0.5	กระจกสีอำพัน
คุณภาพชั้นเก้า	95.0	4.0	1.0	0.5	กระจกสีอำพัน



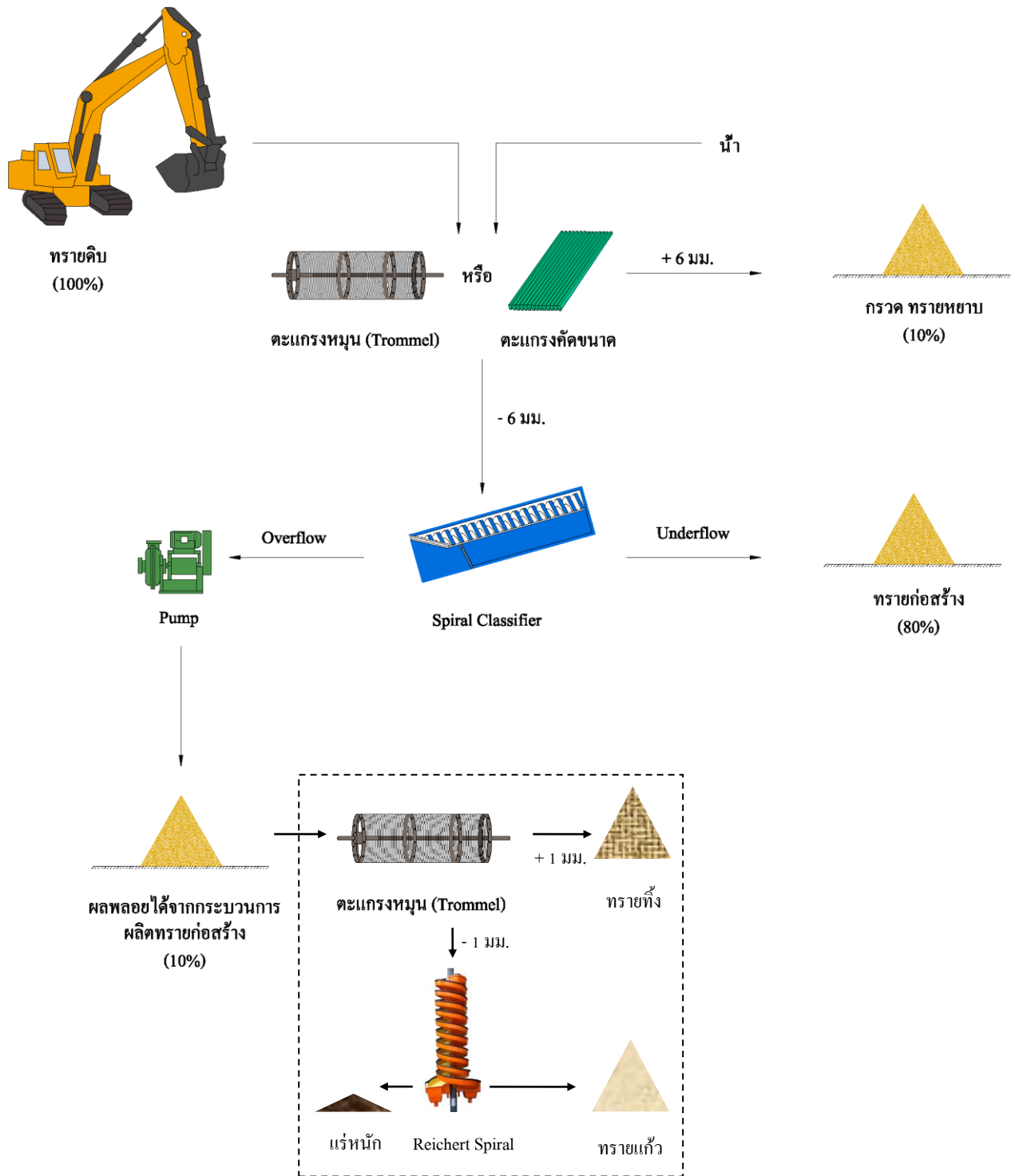
2.1.2 กระบวนการผลิตแร่ทรายแก้วจากแหล่งแร่และผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างในประเทศไทย

นอกจากแหล่งแร่ทรายแก้วที่กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง อาจใช้เป็นวัตถุดิบทรายแก้วในโรงงานอุตสาหกรรมได้ ซึ่งผลพลอยได้ (By-product) ดังกล่าวเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง หากคุณภาพทรายของแหล่งทรายก่อสร้างมีคุณภาพที่เหมาะสมเป็นทรายแก้ว โดยทั่วไปการผลิตทรายก่อสร้างและทรายแก้วจากแหล่งธรรมชาติมีขั้นตอนการผลิต ดังนี้ รถตักถล่มอย่างตักทรายดิบใส่รถบรรทุก รถบรรทุกทรายดิบนำทรายมาใส่ตะแกรงหมุน (Trommel) หรือตะแกรงคัดขนาด (Sizing Screens) ที่มีขนาดช่อง 6 มม. เพื่อกำจัดก้อนหิน กรวดทรายขนาดหยาบ จากนั้นทรายที่ผ่านตะแกรงหมุนหรือตะแกรงคัดขนาดมาเข้า Spiral Classifier ซึ่งจะได้ส่วนที่หยาบ (Underflow) ที่มาลงสายพานลำเลียง (Belt Conveyor) ลำเลียงไปยังกองเก็บแร่เป็นทรายก่อสร้าง ส่วนที่เบา (Overflow) จะถูกสูบไปที่บ่อกักเก็บ ส่วนนี้คือ “ผลพลอยได้ (By-product) จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง” ที่มีส่วนประกอบเป็นทราย 60–80% และมีมลทินหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ดิน กรวด เป็นต้น รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างและการเกิดผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง สำหรับตัวอย่างทรายดิบ ทรายก่อสร้าง กรวดและทรายหยาบ และผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างแสดงดังรูปที่ 2.3 และผลวิเคราะห์คุณภาพของผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง ก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ (บทที่ 4) แสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ในขณะที่กระบวนการผลิตทรายแก้วจากแหล่งธรรมชาติจะมุ่งเน้นทรายละเอียดขนาดเล็กกว่า 16 เมช (1 มิลลิเมตร) เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการแต่งทรายแก้ว (เส้นประในรูปที่ 2.2) และเหลือทิ้งทรายหยาบขนาดใหญ่กว่า 16 เมชไว้ในแหล่ง

จากข้อมูลของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบก่อสร้าง จำกัด พบว่า ในกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างจากทรายดิบ 100% จะได้ผลผลิตเป็นทรายก่อสร้างประมาณ 80% กรวดและทรายหยาบ 10% และผลพลอยได้ประมาณ 10% ซึ่งปัจจุบันผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง ส่วนใหญ่ใช้เป็นทรายถมที่มีราคาประมาณ 40 – 80 บาทต่อตัน

จากการประเมินข้อมูลเบื้องต้น กรณีที่มีการผลิตทรายก่อสร้างในพื้นที่แหล่งทรายก่อสร้างทั้งหมดในประเทศไทย คาดว่าจะมีปริมาณสำรองผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างในประเทศไทยเกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 4,200 ล้านตัน โดยคำนวณจากปริมาณสำรองของแหล่งทรายก่อสร้างทั้งหมดในประเทศไทยที่มีประมาณ 26,556.9 ล้านลบ.ม. ซึ่งทรายก่อสร้างที่เป็นทรายดิบก่อนการผ่านกระบวนการผลิตจะมีความหนาแน่นประมาณ 1.580336 ตันต่อลบ.ม. ดังนั้น จะได้ปริมาณทรายก่อสร้างที่เป็นทรายดิบประมาณ 41,968.8 ล้านตัน และจากปริมาณทรายก่อสร้างที่เป็นทรายดิบดังกล่าว จะได้ปริมาณทรายก่อสร้างที่ผ่านกระบวนการผลิต 33,575.0 ล้านตัน (80% ของปริมาณทรายดิบ) และจะได้ผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างประมาณ 4,196.8 ล้านตัน (10% ของปริมาณทรายดิบ)

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเฉพาะแหล่งทรายก่อสร้างที่มีการผลิตในปัจจุบัน รวมถึงแหล่งที่เคยเป็นแหล่งผลิตทรายก่อสร้าง คาดว่าปัจจุบันมีผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างในประเทศไทย 30 – 40 ล้านตัน



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง การเกิดผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างและทรายแก้วที่ได้ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)



ก) ทรายดิบ



ข) ทรายก่อสร้าง



ค) กรวดและทรายหยาบ



ง) ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง



(จ) ทรายแก้วจาก Reichert Spiral
ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด



(ฉ) ทรายแก้วจาก Reichert Spiral
ของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด



ช) แร่ทิ้งจาก Reichert Spiral ของ
บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด



ซ) แร่ทิ้งจาก Reichert Spiral ของ
บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด

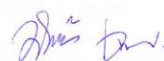
รูปที่ 2.3 ทรายดิบ ทรายก่อสร้าง กรวดและทรายหยาบ ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้าง ทรายแก้วจาก Reichert Spiral และหัวแร่หนัก

รายงานผลการวิเคราะห์ / ทดสอบ

เรียง : คุณชวิชัย ศรีพนมขนากร
 บริษัท : ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด
 หน่วยงาน : พัฒนาแหล่งวัตถุดิบ
 ชื่อตัวอย่าง : ทรายก่อนล้าง
 รายงานเลขที่ : 53CL270301
 วันที่ : 3 มกราคม 2554
 เลขรับงาน / เลขที่ตัวอย่าง : 53CL2703 / 53CL270301
 ผู้ทดสอบ : นันทกานต์ ค.
 ผู้ตรวจสอบ : นันทกานต์ ค.

Method of Analysis : X-Ray Fluorescence / Wet Chemical

Silicon dioxide	(SiO ₂)	%	98.43
Aluminum oxide	(Al ₂ O ₃)	%	0.23
Iron oxide	(Fe ₂ O ₃)	%	0.14
Calcium oxide	(CaO)	%	0.01
Magnesium oxide	(MgO)	%	< 0.01
Loss on Ignition	(LOI)	%	0.43
Sodium oxide	(Na ₂ O)	%	< 0.01
Potassium oxide	(K ₂ O)	%	0.13
Titanium dioxide	(TiO ₂)	%	0.28
Phosphorus pentoxide	(P ₂ O ₅)	%	< 0.01



(นันทกานต์ คำรัตน์นา)
เจ้าหน้าที่ทดสอบ

รายงานฉบับนี้ใช้ได้เฉพาะกับตัวอย่างที่วิเคราะห์ / ทดสอบ เท่านั้น

รูปที่ 2.4 ผลวิเคราะห์ตัวอย่างทรายเหลือทิ้งจากขบวนการล้างทรายก่อนปรับปรุงคุณภาพ (กรมอุตสาหกรรม
พื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)

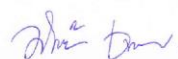
รายงานผลการวิเคราะห์ / ทดสอบ

เรียง : คุณวิชชัย ศรีพนมธนากร
 บริษัท : ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด
 หน่วยงาน : พัฒนาแหล่งวัตถุดิบ
 ชื่อตัวอย่าง : ทราย 25% Flow 30 Mld

รายงานเลขที่ : 53CL270306
 วันที่ : 3 มกราคม 2554
 เลขรับงาน / เลขที่ตัวอย่าง : 53CL2703 / 53CL270306
 ผู้ทดสอบ : นันทกานต์ ค.
 ผู้ตรวจสอบ : นันทกานต์ ค.

Method of Analysis : X-Ray Fluorescence / Wet Chemical

Silicon dioxide	(SiO ₂)	%	99.37
Aluminum oxide	(Al ₂ O ₃)	%	0.16
Iron oxide	(Fe ₂ O ₃)	%	0.06
Calcium oxide	(CaO)	%	< 0.01
Magnesium oxide	(MgO)	%	< 0.01
Loss on Ignition	(LOI)	%	0.17
Sodium oxide	(Na ₂ O)	%	< 0.01
Potassium oxide	(K ₂ O)	%	0.11
Titanium dioxide	(TiO ₂)	%	0.04
Phosphorus pentoxide	(P ₂ O ₅)	%	< 0.01



(นันทกานต์ คำรัตน์)
เจ้าหน้าที่ทดสอบ

รายงานฉบับนี้ใช้ได้เฉพาะกับตัวอย่างที่วิเคราะห์ / ทดสอบ เท่านั้น

รูปที่ 2.5 ผลวิเคราะห์ตัวอย่างทรายเหลือทิ้งจากขบวนการล้างทรายหลังปรับปรุงคุณภาพ (กรมอุตสาหกรรม
พื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)

2.1.3 ประโยชน์ของทรายแก้ว

ทรายแก้วสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย ขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่แตกต่างกันดังนี้ (คณิต ประสิทธิการกุล, 2545)

1) อุตสาหกรรมแก้ว

ผลิตภัณฑ์แก้วและเครื่องแก้ว ใช้วัตถุดิบหลักคือทรายแก้วเป็นตัวทำให้เกิดโครงสร้างเนื้อแก้ว โซดาแอช (soda ash) หินปูน โดโลไมต์ (dolomite) เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิของซิลิกา นอกจากนี้ยังมีเศษแก้วและสารเคมีต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงภาพ เช่น อะลูมินาเพิ่มความคงทนของผิวแก้วต่อการกัดกร่อนของน้ำยาเคมี ฟลูออไรต์ (fluorite) ช่วยลดความหนืด แบไรต์ (barite) ช่วยในการหลอม โซเดียมซัลเฟต (sodium sulphate) ช่วยทำลายกากทรายที่เหลือ ซีลีเนียม (selenium) และโคบอลต์ (cobalt) ฟอกสีเขียวของเหล็กออกไซด์ (เฟอร์ริกออกไซด์) โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate) ใช้ทำสีเขียว จุนสีใช้ทำสีน้ำทะเล ผลิตภัณฑ์แก้วต่าง ๆ ได้แก่ ขวดแก้ว จาน ชาม โถ กระจาแก้ว และเครื่องแก้วอื่น ๆ นอกจากนี้ยังใช้ทำใยแก้ว (fiber glass) ผลิตภัณฑ์กระจกชนิดต่าง ๆ เช่น กระจกแผ่นเรียบใส กระจกแผ่นเรียบสี กระจกฉนวน กระจกตัดแสง กระจกนิรภัยและกระจกเงา เป็นต้น

2) อุตสาหกรรมเซรามิก

ทรายแก้วบด (silica flour) ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.105 มิลลิเมตร มีเหล็กไม่เกิน 0.3% ใช้เป็นส่วนประกอบของเนื้อเซรามิกชนิดสีขาวคุณภาพสูง (โบนไชนา) ถึง 35% เพื่อป้องกันการหดตัวของเนื้อเซรามิกขณะที่กำลังผึ่งแห้งง่าย เพิ่มความขาว ทำให้แกร่ง ทนความร้อน แดกยาก เพิ่มแรงยึดเกาะของเนื้อเซรามิกกับตัวเคลือบ และเป็นส่วนผสมเคลือบเครื่องปั้นดินเผาให้มีผิวเรียบและผิวหน้าเป็นมันวาวเหมือนแก้ว

ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาทนไฟ ใช้ทรายแก้วเป็นส่วนผสมของดินทนไฟ เบ้าทนไฟ และใช้ทรายทนไฟ เป็นตัวอัดในแซกการ (sagger sand) วางกันไม่ให้เครื่องเคลือบดินเผาเกิดการกระทบกัน (placing sand)

ใช้ทำอิฐทนไฟและอิฐซิลิกาที่ใช้กับเตาถลุงและอุปกรณ์อื่นที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ใช้ทำปูนทนไฟซึ่งประกอบด้วยอิฐทนไฟบด ทรายแก้วหรือหินควอตซ์ และตัวประสาน คือ ดินทนไฟ ดินขาวทนไฟ ปูนซีเมนต์หรือโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) ทรายแก้วที่ใช้ต้องมีขนาดละเอียด ทนอุณหภูมิสูง สะอาด ไม่มีสารช่วยหลอมละลาย

ในเตาเผาอิฐใช้ทรายแก้วเป็นตัวกั้นระหว่างแผ่นอิฐ (setting sand) ไม่ให้เชื่อมติดกันหรือไม่ให้ถูกเปลวทรายต้องทนความร้อนได้โดยไม่ละลาย ขนาดละเอียด และไม่มีมลทินที่ทำให้อิฐเปลี่ยนสี

3) อุตสาหกรรมหล่อโลหะ

ทรายแก้วที่ใช้เป็นส่วนผสมทำแบบหล่อ (molding sand) ต้องมีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูงโดยไม่ละลาย (ทรายหยาบหลอมยากกว่า) เช่น หล่อทองเหลืองที่อุณหภูมิ 1,350 °C เหล็กหล่อที่อุณหภูมิ 1,510 °C และเหล็กกล้าที่อุณหภูมิ 1,580 - 1,650 °C มีแรงยึดเหนี่ยวสูงรักษารูปทรงแม่แบบได้ดี และแข็งแรงทนต่อแรงอัดของน้ำโลหะ (ขึ้นกับชนิดของวัสดุประสาน) มีความซาบซึ่มสูง ระบายก๊าซได้ดี (ทรายมน หยาบ เม็ดเท่ากัน) นำกลับมาใช้ใหม่ได้

นอกจากนี้ ใช้ทรายแก้วทำแกนของแบบ (core sand) บริเวณสัมผัสระหว่างฝาแบบหล่อ (parting sand) โรยผิวภายในของแบบหล่อเพื่อให้ผิวสิ่งที่หล่อเรียบ (facing sand) ใช้ทำทางระบายโลหะเหลวหรือก๊าซออกจากแบบหล่อ (floor sand)

4) อุตสาหกรรมเคมี

ทรายแก้วใช้ทำสารละลายซิลิเกต เช่น โซเดียมซิลิเกต โพแทสเซียมซิลิเกต (potassium silicate) ซึ่งเป็นสารเคมีในการผลิตแก้วหรือตัวเชื่อมประสาน สี ผง หรือน้ำยาซักฟอก ลอยแร่ และเคลือบลดเชื่อม แคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate) และลิเทียมซิลิเกต (lithium silicate) ใช้ทำแผ่น ซองเอกสารกันความชื้น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (silicon carbide) ใช้ทำกากเพชรบดลูกสูบรถจักรยานยนต์ ซิลิคอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride) ใช้ทำแผ่นซิลิคอน แผงเซลล์สุริยะ (solar cell) แผงวงจรเบ็ดเสร็จ (integrated circuit, IC) และหลอดซิลิคอนทรานซิสเตอร์ (silicon transistor) ซิลิกาเจล (silica gel) ใช้ทำสารดูดความชื้น สารกรอง และสารลดแรงตึงผิว ซิลิโคน (silicone) ใช้ทำสารหล่อลื่น น้ำมันไฮดรอลิก ฉนวนไฟฟ้า สารกันน้ำและความชื้น สารป้องกันการเกิดฟองในการผลิตยาง พลาสติก สี กระดาษ ยา เครื่องสำอาง สิ่งทอ ผิวหนังเทียมและแม่พิมพ์

5) อุตสาหกรรมสี

สีบางชนิดต้องผสมทรายแก้วบดหรือผ่านการลอยแร่ลงไปประมาณ 30% เพื่อเป็นตัวเติม (filler) ทรายเกลี่ยมทำให้สีสาก ทรายมนทำให้สีเรียบ ซึ่งต้องใช้ทรายแก้วสีขาวเพราะทำให้ได้เฉดสีที่ต้องการ

6) อุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ทรายแก้วจะถูกอัดด้วยความดันสูง (hydraulic fracturing sand) ลงไปในชั้นหินใต้พื้นดินเพื่อกัดกร่อนรอยแตกและช่องว่างให้กว้างขึ้น ทำให้ความซาบซึ่มของหินเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลของน้ำมันและก๊าซสูงขึ้น ทรายแก้วชนิดนี้ต้องไม่มีมลทิน มีการคัดขนาดที่ดีและเม็ดทรายต้องกลมมาก

7) อุตสาหกรรมถลุงแร่

ทรายแก้วหรือกรวดควอตซ์ใช้เป็นตัวจับตะกรัน (flux) ในการถลุงเพื่อผลิตนิกเกิลและทองแดงผิวด้าน (matte) โดยซิลิกาจะทำปฏิกิริยากับเหล็กออกไซด์ของตัวอื่น ๆ และสารที่เป็นมลทิน จับตัวเป็นตะกรัน (slag) ของเหล็กซิลิเกต ทรายแก้วบดผสมกับดิน (ganister mix) ใช้ทำตัวบุด้านในของเตาถลุง และเบ้าหลอมโลหะ

8) ใช้ในงานอื่น ๆ

- ทำเหล็กผสมซิลิคอน (ferroalloy) ซึ่งใช้ทำแม่เหล็กและทำโลหะผสมซิลิคอนชนิดอื่น ๆ
- ทรายขัดเรียบและขัดมัน (abrasives sand) เช่น ขัดผิวแผ่นแก้ว แผ่นกระจกขัดหิน ขัดเครื่องปั้นดินเผา เครื่องสุขภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ทรายถูภาชนะ (scouring) เช่น ขัดถูโลหะ ทรายใช้ทำหินเจียรระโน (grinding wheel) และกระดาทราย
- ทรายขัดแผ่น (blast sand) ขัดวัตถุผิวหยาบ เช่น แก้วที่ผ่านการอบให้เรียบ ขัดวัตถุที่จะเคลือบหรือผิว ลื่นของขวดให้ด้านเพื่อปิดฉลาก ขัดสีชุบเก่าออกจากเหล็กกล้าเพื่อทาสีใหม่ ล้างและแต่งผิวของหินประดับหรือวัตถุหล่อ
- เป็นตัวเติมในการทำพลาสติก ยาง กาว สารกันรั่วซึม หมึกพิมพ์ ยาสีฟัน
- ใช้ในการกรองน้ำ เม็ดทรายต้องมีขนาด 60-140 เมช และขนาดเท่า ๆ กัน ไม่มีสารอินทรีย์
- ทรายกันลื่น (traction sand)
- ทำอิฐแก้ว
- เชื่อมโลหะ (welding sand) ใช้ทรายขนาดเล็กกว่า 50 เมช โรยบริเวณที่จะเชื่อม จะทำให้เหล็กและ ทรายแก้วรวมตัวกันเป็นเหล็กซิลิเกต กะเทาะออกง่ายและทำให้รอยเชื่อมแข็งแรงขึ้น
- ทรายหลังคา (roofing sand) หรือราดด้วยน้ำมันดิบและใช้ทรายทับอีกครั้ง จะช่วยรักษาอุณหภูมิห้องให้ คงที่และป้องกันไฟไหม้ ใช้เคลือบกระดาขมุงหลังคา (roofing paper) หรือใช้ในโรงงานทำกระดาขมุงน้ำมันโดย เคลือบผิวของกระดาเพื่อป้องกันไม่ให้ติดกัน
- เป็นส่วนผสมในสี ใช้ทาฉาบผิวด้านนอกสิ่งก่อสร้างที่อยู่ในบริเวณพายุทราย ต้องเป็นทรายขาวและคมจึง จะยึดแน่นกับสีและใช้ทากำแพงเพื่อป้องกันรอยขีดข่วน
- ใช้เป็นตัวอุด (seal sand) ทางที่ก๊าซออก และปรับอากาศของเตาเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

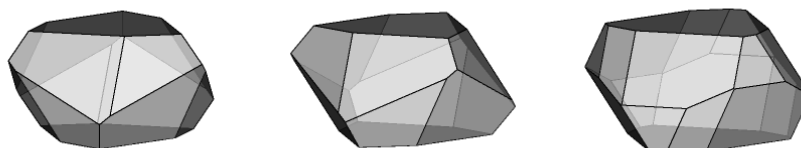
2.2 แร่อิลเมนไนต์ (Ilmenite)

Kostov (1968) ได้จัดให้แร่อิลเมนไนต์อยู่ในพวกแร่ออกไซด์ (Oxide) กลุ่มอิลเมนไนต์ (Ilmenite Group) ซึ่งกลุ่มนี้ประกอบด้วยแร่อิลเมนไนต์ (Ilmenite, FeTiO_3) ไพโรฟานไนต์ (Pyrophanite, MnTiO_3) ไกคิไลต์ (Geikielite, MgTiO_3) ซูโดบรูคไคต์ (Pseudobrookite, Fe_2TiO_5 & FeTi_2O_5) และเคนเนดไคต์ (Kennedyite, $\text{Fe}_2\text{MgTi}_3\text{O}_{10}$)

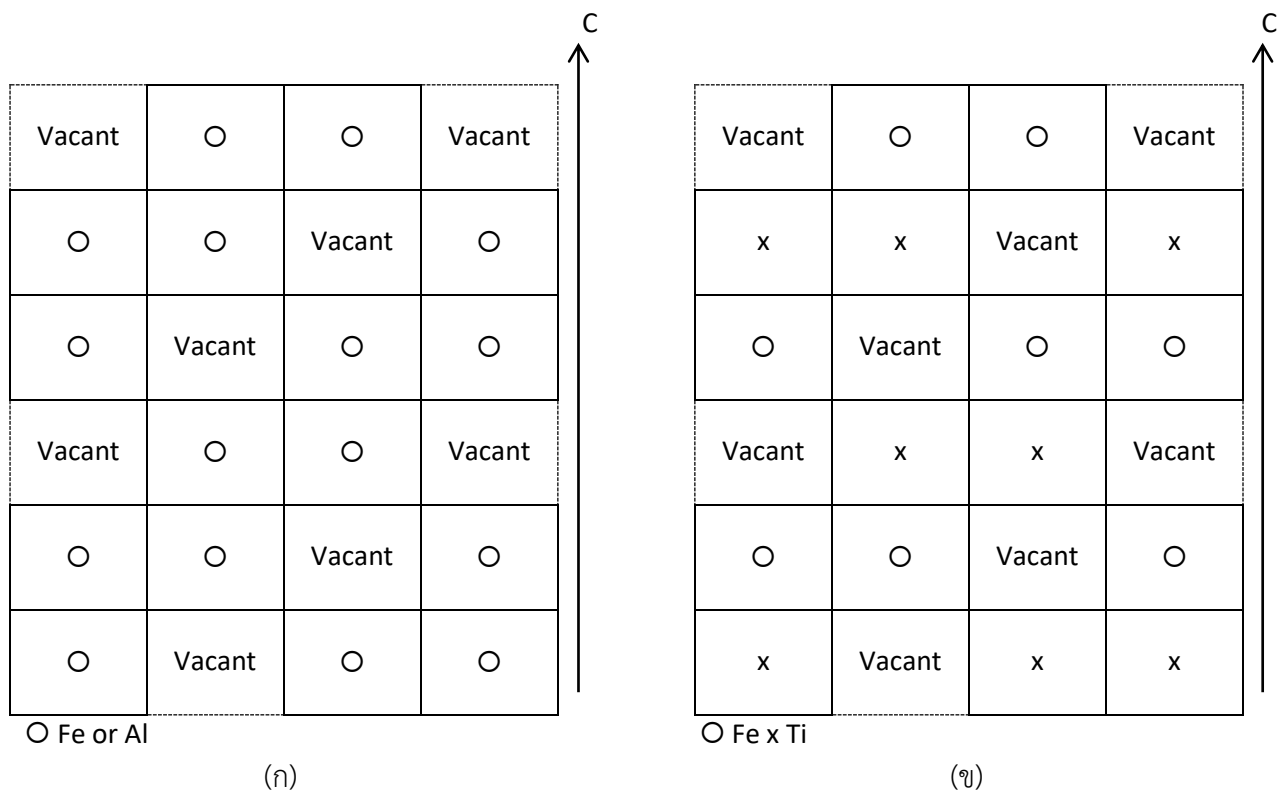
2.2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของแร่อิลเมนไนต์

อิลเมนไนต์ (Hurlbut and Klein, 1977) ประกอบด้วย TiO_2 52.66% และ FeO 47.34% (หรือ Fe 36.8%, Ti 31.6% และ O 31.6%) มีความแข็งตามสเกลของโมฮส์ (Mohs Scale) 5-6 ความถ่วงจำเพาะ 4.7 มีสีดำหรือน้ำตาลดำ สีผงละเอียด (Streak) ดำหรือน้ำตาลแดง ความวาวแบบโลหะหรือกึ่งโลหะ ไม่มีแนวแตก มีคุณสมบัติติดแม่เหล็กอย่างอ่อน นำไฟฟ้า ปกติจะมีเนื้อสมานแน่น (Massive) ทึบแสง (Opaque)

อิลเมนไนต์มีรูปผลึกไตรโกนอล – รอมโบอีดรอล (Trigonal-Rhombohedral) ดังรูปที่ 2.6 ผลึกมักจะเป็นแผ่นหนา เป็นชั้น หรือแผ่นบาง ๆ ซ้อนกัน อิลเมนไนต์มีโครงสร้างผลึกคล้ายกับคอร์รันดัม (Corundum, Al_2O_3) หรือฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3) แต่มีสมมาตรต่ำกว่าเพราะมีประจุบวกสองชนิดคือ Fe^{3+} และ Ti^{4+} เรียงตัวสลับกันตามแนวแกน C ดังรูปที่ 2.7



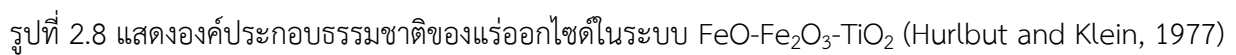
รูปที่ 2.6 บน) แร่อิลเมนไนต์ ล่าง) รูปผลึกของแร่อิลเมนไนต์ (Hurlbut and Klein, 1977)



รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างภาคตัดแนวตั้งของคอร์ันดัมหรือฮีมาไทต์ แสดงเฉพาะประจุบวก

(ข) โครงสร้างภาคตัดแนวตั้งของอิลเมไนต์ แสดงเฉพาะประจุบวก (Hurlbut and Klein, 1977)

โดยปกติแร่อิลเมไนต์จะมีส่วนประกอบของไพโรฟานไนต์หรือโกคิไลต์อยู่ด้วย ซึ่งเรียกว่า แมงแกนอิลเมไนต์ (Manganilmenite) หรือพิโครอิลเมไนต์ (Picrolimenite) ถ้ารูปผลึกมีลักษณะแหลม (Acute Rhombohedral) จะเรียกว่า ชิชโทไนต์ (Crichtonite) ซึ่งมีธาตุไทเทเนียมมากขึ้น เพอริกไอออน (Fe^{3+}) เข้าไปแทนที่เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) บางส่วน อุณหภูมิปกติส่วนใหญ่อิลเมไนต์มีปริมาณของ Fe_2O_3 ปนอยู่ด้วยน้อยกว่า 6% สารละลายของแข็ง (Solid Solution) ระหว่าง Fe_2O_3 และ FeTiO_3 จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 950°C ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงองค์ประกอบธรรมชาติของแร่ออกไซด์ในระบบ $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ เส้นประแสดงสารประกอบที่เกี่ยวข้องกันโดยทั่วไปทางธรณีวิทยาที่อุณหภูมิต่ำ เส้นทึบแสดงสารละลายของแข็งที่สมบูรณ์ระหว่างสารประกอบสองชนิด เช่น ฮีมาไทต์-อิลเมไนต์ จะเกิดที่อุณหภูมิมากกว่า 950°C แมกนีไทต์-อัลโวสปิเนล (magnetite-ulvospinel) ที่อุณหภูมิมักกว่า 600°C ในธรรมชาติอาจพบแร่อิลเมไนต์ผสม (Intergrowth) อยู่กับไทเทโนฮีมาไทต์ (Titanohematite) ไทเทโนแมกนีไทต์ (Titanomagnetite) หรืออัลโวสปิเนล



อิลเมไนต์โดยทั่วไปเป็นแร่รอง (Accessory Mineral) ในหินอัคนี อาจพบเป็นมวลสารขนาดใหญ่ในหิน
แกบโบร (Gabbro) ไดออไรต์ (Diorite) และอะนอร์โทไซต์ (Anorthosite) ที่สัมพันธ์กับแมกนีไทต์ พบในหินแพก
มาไทต์ (Pegmatite) หรือปนอยู่ในทรายร่วมกับแมกนีไทต์ ฐูลีท์ เซอร์คอน และโมนาไซต์ ที่พบเสมอในแหล่งแร่
ดีบุก

ในประเทศไทย พบอิลเมไนต์ในแหล่งแร่ดีบุกทั่ว ๆ ไป เช่น ที่จังหวัดกาญจนบุรี พังงา ระนอง ภูเก็ต มีขนาดเล็กเท่าเม็ดทราย และพบในแหล่งพลอยที่จังหวัดจันทบุรี ตราด

สำหรับผลิตโลหะไทเทเนียม ซึ่งมีอัตราส่วนความแรงต่อน้ำหนักสูง สามารถใช้เป็นวัสดุในการสร้างเครื่องบินทั้งส่วนที่เป็นโครงสร้างและเครื่องยนต์ ผลิตสารประกอบไทเทเนียมออกไซด์ นำมาใช้เป็นแม่สี ใช้ในงานลวดเชื่อม อิลเมไนต์ไม่สามารถจะเป็นสินแร่สำหรับผลิตเหล็กได้เพราะถลุงยาก แต่สารผสมอิลเมไนต์-แมกนีไทต์ และอิลเมไนต์-ฮีมาไทต์ สามารถนำมาแยกได้ทั้งไทเทเนียมและเหล็ก

2.2.5 คุณสมบัติของอิเลเมนต์ในต่างประเทศ

ในขณะที่สถานการณ์อุตสาหกรรมการผลิตแร่ดีบุกของประเทศไทยลดลง แร่อิเลเมนต์ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตโลหะและสารประกอบไทเทเนียมมีปริมาณการผลิตลดลงตามไปด้วย อีกทั้งที่ผ่านมา ยังไม่มีการนำ อิเลเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมหรือสำรองไว้เพื่อความมั่นคงของประเทศ โดยมีข้อกำหนดความต้องการของตลาดต่างประเทศต่าง ๆ กัน (ตารางที่ 2.4 และ 2.5) (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550)

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของแร่อิเลเมนต์ที่ผลิตได้ในสหรัฐอเมริกา ผลิตโดย P.W.Gillibrand Co. ในแคลิฟอร์เนีย จากแหล่ง Oak Spring alluvial (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550)

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	48.5
เฟอร์รัสออกไซด์ (FeO)	38.0
อะลูมินา (Al_2O_3)	0.5
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	1.2
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.8
ซิลิกา (SiO_2)	2.2

ตารางที่ 2.5 การผลิตแร่อิเลเมนต์เกรดซัลเฟต (Sulphate grade) โดยมีเครื่องหมายการค้าว่า Yoganup และมีแหล่งที่ Capel, Western Australia (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550)

การรับประกันคุณภาพแร่ (Guarantees)	เปอร์เซ็นต์
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ต่ำสุด	55.00
โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) สูงสุด	0.05
ส่วนประกอบทางเคมี (Typical Chemical Analysis)	เปอร์เซ็นต์
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	55-58
เฟอร์รัสออกไซด์ (FeO)	10-16
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	25-30
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	1.3-1.5
โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)	0.03-0.04
วานาเดียมเพนตอกไซด์ (V_2O_5)	0.15-0.25
ไนโอเบียมเพนตอกไซด์ (Nb_2O_5)	0.15-0.17
อะลูมินา (Al_2O_3)	0.4-0.7
ฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P_2O_5)	0.03-0.05
ซิลิกา (SiO_2)	0.4-0.7
เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2)	0.1-0.2
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.01-0.02
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	0.01-0.02
การสูญเสียน้ำหนักในการเผาไหม้ (Loss on ignition) ที่อุณหภูมิ 105 °C	0.2-0.4
Unattackable TiO_2	0.3-0.6
คุณสมบัติทางกายภาพ (Typical Physical Data)	
ความหนาแน่น (Bulk Density)	2,500 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	4.4

2.2.6 คุณสมบัติของอิลเมไนต์ในแหล่งทรายของประเทศไทย

ในขณะที่ผลวิเคราะห์ทรายแก้วหรือทรายเหลือทิ้งของแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย ส่วนใหญ่กลับพบปริมาณ TiO_2 ซึ่งจำเป็นที่จะต้องลดปริมาณลงด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อให้ทรายแก้วมีคุณภาพเพียงพอที่ตลาดต้องการ จึงเป็นเหตุให้กากแร่จากการเพิ่มคุณภาพทรายแก้วเหลือทิ้งไว้เป็นจำนวนมาก (รูปที่ 2.4 และ 2.5) (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)

2.3 แร่รูไทล์ (Rutile)

ชื่อแร่ มีจากภาษาละติน rutilus หมายถึงสีแดง สีทองแดง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (อรกุล โศคารวิจารย์, 2543)

รูปผลึกระบบเททราโกนาล มักเกิดเป็นแท่งคล้ายรูปเข็ม วาวคล้ายเพชรหรือกึ่งโลหะ สีแดง น้ำตาลแดงถึงดำ ชนิดรูปเข็ม ปกติจะมีสีทองแดง แดง เหลือง เหลืองอมส้ม สีม่วงละเอียด สีน้ำตาลอ่อนในพวกสีเข้ม ส่วนพวกสีอ่อนจะไม่มีสี สีแดงจะโปร่งใสเปลี่ยนสีได้แดงแก่ จนถึงแดงเข้มจัดมากเกือบดำ หรือดูอับแสงก็เคยพบ สีน้ำผึ้งคล้ายแร่ดีบุกมาก

คุณสมบัติทางเคมี

สูตรเคมี TiO_2 มี Ti 60% O 4% เหล็กอาจมีปนได้มากถึง 10%

ลักษณะเด่นและวิธีตรวจ

ผลึกมีร่องขนานถี่ ๆ ไปตามแนวยาวของแท่งผลึก มีความวาวมากแบบเพชร สีแดง ค่าความถ่วงจำเพาะสูง แต่อย่างน้อยกว่าแร่ดีบุก ทดสอบโดยการหลอมตัวจะไม่หลอมละลาย ไม่ละลายง่าย หลังจากหลอมโซเดียมคาร์บอเนตจะสามารถละลายได้ในกรดกำมะถัน เมื่อใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

การกำเนิด

พบเกิดในหินแกรนิต เพกมาไทต์ ไนส์ ไมกาชีสต์ อาจจะเป็นแร่ไม่สำคัญในหินหรือสายแร่ควอตซ์ โดยแทรกในเนื้อหรือตัดผ่าน บางครั้งก็เกิดเป็นเส้น เป็นรูปเข็มแทรกฝังในแร่ควอตซ์จนเรียกว่า Rutiled Quartz นอกจากนี้ยังพบปนในทรายร่วมกับแมกนีไทต์ เซอร์คอน และโมนาไซต์เป็นจำนวนไม่น้อย นอกจากเกิดในธรรมชาติแล้ว มนุษย์ยังทำการสังเคราะห์ขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีเวอร์เนียล (Verneuil process) แร่ที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติทางเคมี สังเคราะห์ไปเป็นแร่หรือวัตถุที่มีน้ำดี แวเหลือบรุ้งยิ่งกว่าเพชร มีการจำหน่ายกันในชื่อต่าง ๆ กัน ที่รู้จักกันดีคือ ไทเทเนีย (Titania) พลอยเคนยา (Kenya gem) และมิริดิส (Miridis)

แหล่งกำเนิด

ในประเทศไทย พบปนอยู่ในแหล่งลานแร่ดีบุก แต่มีขนาดเล็ก ในต่างประเทศแหล่งที่สำคัญคือ แหล่งชายฝั่งด้านเหนือของรัฐนิวเซาท์เวลส์ และด้านใต้ของรัฐควีนแลนด์ ทำให้ออสเตรเลียเป็นแหล่งผลิตที่ใหญ่ที่สุด แหล่งอื่นพบในรัฐเวอร์จิเนีย ตะวันออกเฉียงเหนือของรัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา

ประโยชน์

แร่รูไทล์ผลิตขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมลวดเหล็กเชื่อม (Welding rod) ใช้ทำโลหะผสม ใช้เป็น electrode ใน arc light ทำให้ porcelain มีสีเหลือง ทำฟันทนและทำสี (Paint pigment)

2.4 ไทเทเนียม (Titanium)

ไทเทเนียม (Titanium, Ti) เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่อุตสาหกรรมต่างให้ความสนใจ เนื่องจากโลหะชนิดนี้มีค่าสัดส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง หรือพูดง่าย ๆ คือ มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา ทั้งยังมีความทนทานต่อสารเคมีต่าง ๆ แต่เนื่องจากไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีราคาสูง (รูปที่ 2.9) ทำให้การใช้งานโลหะชนิดนี้ยังจำกัดอยู่เพียงเฉพาะในบางอุตสาหกรรมเท่านั้น

ไทเทเนียมเป็นธาตุที่มีมากเป็นลำดับที่ 9 ในชั้นเปลือกโลก แต่โลหะชนิดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่น ๆ ได้ง่าย จึงไม่พบในรูปโลหะบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ แต่จะพบในรูปสารประกอบในแร่ชนิดต่าง ๆ เช่น แร่อิลเมไนต์ (Ilmenite) แร่รูไทล์ (Rutile) แร่อะนาทาส (Anatase) แร่ไทเทไนต์ (Titanite) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการพบแร่ไทเทเนียมอยู่รวมกับแร่เหล็กด้วย

ไทเทเนียมค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1791 โดยวิลเลียม เกรกอร์ (William Gregor) นักธรณีวิทยาชาวอังกฤษ วิลเลียมสังเกตเห็นว่า ทรายส์ดำนในลำธารใกล้เมืองมานัคแคน (Manaccan) ประเทศอังกฤษ มีสมบัติถูกแม่เหล็กดูดติดได้ เมื่อนำทรายส์ดำนี้ไปทำการแยกองค์ประกอบ ผลที่ได้คือ โลหะออกไซด์ 2 ชนิด โดยโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่งคือ เหล็กออกไซด์ (iron oxide) ที่มีสมบัติแม่เหล็กดูดติดได้ ส่วนโลหะออกไซด์อีกชนิดหนึ่งนั้น วิลเลียมไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นโลหะอะไร และทำให้เขาตระหนักว่า โลหะออกไซด์ปริศนานั้นประกอบด้วยธาตุโลหะใหม่ที่มีสมบัติไม่เหมือนกับโลหะใดที่มีการบันทึกในขณะนั้น ดังนั้น วิลเลียมจึงเขียนรายงานสิ่งที่เขาพบและส่งไปที่ Royal Geological Society of Cornwall และส่งไปตีพิมพ์ลงใน Crell's Annalen ซึ่งเป็นนิตยสารวิทยาศาสตร์ของประเทศเยอรมนี ต่อมาในปี ค.ศ. 1795 นักเคมีชาวเยอรมันชื่อ มาร์ติน ไฮน์ริช คลาพรอท (Martin Heinrich Klaproth) ก็พบโลหะออกไซด์ปริศนานี้จากแร่รูไทล์เช่นกัน มาร์ตินจึงตั้งชื่อธาตุโลหะปริศนานี้ว่า ไทเทเนียม ตามชื่อยักษ์ ไททัน (Titan) ที่ปรากฏในตำนานกรีกโบราณ ในตอนหลังมาร์ตินได้ทราบเรื่องการพบโลหะออกไซด์ของวิลเลียมที่เกิดก่อนการพบของเขา มาร์ตินก็ได้รับตัวอย่างแร่มานัคคาไนต์ (Manaccanite) มาทดลองซ้ำ และยืนยันว่าโลหะออกไซด์ปริศนานั้นประกอบด้วยไทเทเนียมเช่นกัน

สินแร่ไทเทเนียมที่สำคัญที่สุดคือ อิลเมไนต์ (Ilmenite, FeTiO_3) เกิดจากกระบวนการแยกตัวออกจากหินหนืด ณ อุณหภูมิสูง ๆ ขณะที่มวลหินหนืดขนาดใหญ่เย็นตัวลงช้า ๆ แร่อิลเมไนต์จะตกผลึกออกมาในระยะแรก ๆ ของวัฏจักรการเย็นตัวตกผลึก ดังนั้นแหล่งแร่อิลเมไนต์จึงมักพบอยู่ร่วมกับหินอัคนีสีเข้ม บางแห่งอาจตกผลึกแยกตัวออกมาเป็นชั้น ๆ ซึ่งไม่เพียงแต่แหล่งแร่เฉพาะไทเทเนียมเท่านั้น แต่ยังเป็นแหล่งโลหะหายากที่สำคัญอื่น ๆ เช่น โครเมียม แพลทินัม โคบอลต์ ทองแดง และนิกเกิล (Department of Mineral Resources, 2008)

ไทเทเนียม (Titanium) จัดเป็นธาตุสำคัญธาตุหนึ่ง มีความสมบูรณ์ในธรรมชาติจัดอยู่ในลำดับที่ 9 รองจาก ออกซิเจน ซิลิคอน อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียม มีค่าเฉลี่ยโดยประมาณ 4400 ppm (Weast, 1964) ในทางเคมีไทเทเนียมจัดอยู่ในกลุ่ม Transition element มีความแข็งและน้ำหนักเบา คือ มีน้ำหนักอะตอมเพียง 47.9 มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงถึง 1675 และ 3260 °C

ในธรรมชาติไทเทเนียมจะเกิดร่วมกับออกซิเจนเสมอ แร่สำคัญที่เป็นแหล่งวัตถุดิบของไทเทเนียมในขณะนี้ก็คือ แร่อิลเมนไนต์ (Ilmenite) หรือ Titaniferous oxide มีสูตรเป็น FeTiO_3 พบมากในประเทศออสเตรเลีย แคนาดา แอฟริกาใต้ นอร์เวย์ สหรัฐอเมริกา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแหล่งแร่ชายหาด (Beach Deposit) สำหรับแร่อิลเมนไนต์ในประเทศไทยนั้นเกิดร่วมกับแร่ดีบุก จึงจัดเป็นแร่พลอยได้จากแร่ดีบุกชนิดหนึ่ง โดยมีปริมาณเจือปนอยู่ในหัวแร่ดีบุกชั้นต้นประมาณ 10-40% (วีระพงศ์ เอี้ยวพานทอง และวิชาญ อมตาริยากุล, 2530) เพราะแร่อิลเมนไนต์มีราคาค่อนข้างต่ำจึงมักถูกกองทิ้งไว้กับหางแร่ นอกจากนี้แร่สำคัญที่เป็นแหล่งกำเนิดของไทเทเนียมรองลงมาคือ แร่รูไทล์ (Rutile) มีสูตรเป็น TiO_2 พบมากในประเทศออสเตรเลีย สหรัฐอเมริกา และอินเดีย สำหรับแร่รูไทล์ในประเทศไทยก็เช่นเดียวกับแร่อิลเมนไนต์คือ เกิดปนอยู่กับแร่ดีบุกในแหล่งลานแร่ทั้งบนบกและในทะเล ปริมาณสำรองแร่รูไทล์ในโลก (World Reserve) จากการสำรวจพบว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับแร่อิลเมนไนต์ (Lyne, 1984) โดยเฉพาะประเทศไทยนี้ เห็นได้ชัดเจนจากสถิติกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ในปี 2561 สามารถผลิตแร่อิลเมนไนต์ได้ 41 ตัน มูลค่า 0.4 ล้านบาท และในปีเดียวกันไม่มีการผลิตรูไทล์ (Department of Primary Industries and Mines, 2019)

ไทเทเนียมนอกจากจะมีน้ำหนักเบาแล้วยังมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความทนทานต่อปฏิกิริยาเคมี และความร้อน จึงได้มีการนำไทเทเนียมทั้งในรูปโลหะ โลหะผสมหรือสารประกอบมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายประเภท ในที่นี้จะกล่าวถึงแต่เฉพาะสารประกอบไทเทเนียมเท่านั้น ในบรรดาสารประกอบไทเทเนียมทั้งหมด Titanium dioxide pigment หรือแม่สีไทเทเนียมมีความสำคัญมากที่สุด และแม่สีไทเทเนียมก็ยังจัดได้ว่าเป็นแม่สีสีขาวที่ขายดีที่สุดในบรรดาแม่สีสีขาวทั้งหมด เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ ความทึบแสง (Opacity) และค่าดัชนีหักเห (Refractive index) สูง นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่ออากาศ ความร้อนและสารเคมี และที่สำคัญที่สุดเป็นสารไม่มีอันตราย (Non-toxic) จึงนิยมนำแม่สีไทเทเนียมมาใช้เป็น pigment ในอุตสาหกรรมการทำสี วานิช และแลคเกอร์ และใช้เป็นตัวเติม (filler) ในอุตสาหกรรมการทำกระดาษ กระเบื้องยาง ผนัง และพลาสติก นอกจากนี้ยังพบใช้ในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น เครื่องสำอาง synthetic gems และการทำฟันปลอม (Artificial teeth) อีกด้วย แม่สีไทเทเนียมในท้องตลาดมี 2 ชนิด คือ รูไทล์ (Rutile) และอะนาเทส (Anatase) ซึ่งมีสูตรเคมีเหมือนกันคือ TiO_2 แต่การจัดเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้ค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันเล็กน้อยคือ ค่าดัชนีหักเหของรูไทล์ประมาณ 2.71 และอะนาเทสประมาณ 2.57 นอกจากนี้ยังทำให้อะนาเทสมีปฏิกิริยาต่อแสงค่อนข้างจะไวกว่ารูไทล์ (more active photocatalyst) จึงเกิดกรณี Chalking ของสีได้ง่ายกว่า

การผลิตแม่สีไทเทเนียมในระบบอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 วิธี ตามชนิดของแม่สี ได้แก่ การผลิตโดยวิธีซัลเฟตและคลอไรด์ การผลิตโดยวิธีซัลเฟตนั้นจะใช้แร่โอลิเมนไนด์หรือตะกั่วไทเทเนียมเป็นวัตถุดิบ และแม่สีไทเทเนียมที่ผลิตได้จะเป็นชนิดอะนาเทส ส่วนการผลิตโดยวิธีคลอไรด์จะใช้แร่รูไทล์เป็นวัตถุดิบ และได้ผลผลิตเป็นแม่สีชนิดรูไทล์ การผลิตโดยวิธีซัลเฟตนั้นได้ถูกค้นพบขึ้นก่อนโดยเริ่มการทดลองมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1908 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1916 จึงได้มีโรงงานผลิตแม่สีเป็นครั้งแรก และได้มีวิวัฒนาการในการปรับปรุงกระบวนการและคุณภาพผลผลิตเรื่อยมาจนกระทั่งปัจจุบัน สำหรับการผลิตโดยวิธีคลอไรด์เพิ่งเริ่มผลิตเป็นอุตสาหกรรมในปี ค.ศ. 1940 ปัจจุบันมีโรงงานผลิตแม่สีไทเทเนียมกระจายอยู่ทั่วโลก กำลังการผลิตมากที่สุดในสหรัฐอเมริกาและยุโรป และการผลิตนั้นรวมทั้งวิธีซัลเฟตและคลอไรด์ จากการสำรวจพบว่าผลผลิตที่ออกสู่ท้องตลาดโดยวิธีซัลเฟตนั้นมีมากกว่าคลอไรด์ประมาณ 5 เท่า (Neville, 1969) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขีดจำกัดของปริมาณวัตถุดิบคือแร่รูไทล์นั้นมีน้อยกว่าแร่โอลิเมนไนด์มากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

PROFORMA INVOICE

Quantity	Description of Commodity	Unit Price	Amount
44 MT	Leucosene TiO ₂ 87 % Min.	USD.900.00/MT CFR South Manila, Philippines	USD. 39,600.00 <u>USD. 39,600.00</u>

(Say: Thirty Nine Thousand Six Hundred US Dollars Only)

Shipment : Within January 2020.

Packing : In 1 MT bag

Payment : By T/T covering 100% against the following

Documents:

- Full set of original clean on board (Ocean B/L only).
- Commercial Invoice in 2 copies.
- Packing List in 2 copies.
- Certificate of analysis issue by Australian Laboratory Services Ltd. in 2 copies.

Advising Bank : The Siam Commercial Bank Public Company Limited (Chidlom Branch)
1060 Petchburi Road, Phayatai, Bangkok 10400 THAILAND (Swift:SICOTHBK)

Beneficiary : SAKORN MINERALS CO., LTD.
128/167-8 PHAYATAI PLAZA 15TH FL., PHAYATAI ROAD, TUNG PHAYATAI,
RATCHATHEWEE, BANGKOK 10400 THAILAND

Remark : 1. Transshipment allowed.
2. All bank charges outside Thailand are for applicant's account.
3. +/- 5% for both quantity and amount allowed.

For and on behalf of
SAKORN MINERALS CO., LTD.



Authorized Signature

F-HO-01, Rev. 0

Date: 02/02/2558

รูปที่ 2.9 ราคาส่งออกแร่ลูโคซีน (ไทเทเนียมไดออกไซด์)

บทที่ 3

ทฤษฎีและเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ ในแร่โอลิเมนต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตทรายแก้ว

ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างมีส่วนประกอบเป็นทราย 60–80% และมีมลทินหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ดิน กรวด เป็นต้น ทำให้ไม่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนทรายแก้วในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกได้ การพัฒนาหรือเพิ่มคุณภาพผลพลอยได้ฯ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนทรายแก้วในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก จำเป็นต้องทำการคัดเลือกแหล่งทรายที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ทรายก่อสร้างและเศษทรายที่เหลือซึ่งมีลักษณะ ขนาด คุณภาพ และองค์ประกอบทางเคมีเหมือนหรือใกล้เคียงทรายแก้ว โดยจะมีแร่หนักปะปนอยู่ในทรายที่ได้เช่นเดียวกับทรายแก้วในแหล่งธรรมชาติ ซึ่งจะใช้เป็นต้นตอของกระบวนการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในแร่โอลิเมนต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตทรายแก้วในขั้นตอนต่อมา โดยกระบวนการที่มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาหรือเพิ่มคุณภาพผลพลอยได้ฯ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน รายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1 - 3.2 และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องตามหัวข้อที่ 3.3 ดังนี้

3.1 การเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่หนัก (หรือกระบวนการแต่งแร่) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการคัดขนาด แยกมลทินหรือสิ่งเจือปน โดยอาศัยคุณสมบัติเฉพาะของแร่ (ตารางที่ 3.1) ได้แก่

3.1.1 การคัดขนาดด้วยตะแกรง

3.1.2 การปรับปริมาณของแข็งในน้ำ (%solid) ด้วยไฮโดรไซโคลอน

3.1.3 การแต่งแร่ด้วยเครื่องสไปรอล

3.1.4 การแต่งแร่ด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Separation)

3.2 การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา ได้แก่

3.2.1 กระบวนการไทรอน (Tiron Process)

3.2.2 กระบวนการอิชิวาร่า (Ishiwara Process)

3.2.3 กระบวนการเบนนิไลต์ (Benilite Process)

3.2.4 กระบวนการไซโร (CSRIO Process)

3.2.5 กระบวนการมิตซูบิชิ (Mitsubishi Process)

3.2.6 กระบวนการไฮโดรคลอรีเนชัน (Hydrochlorination Process)

3.2.7 กระบวนการ Becher (Becher Process)

3.3 เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา ได้แก่

3.3.1 การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Melting)

3.3.2 เครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกวน (Sub-A Flotation Cell)

3.3.3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF)

3.3.4 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer, XRD)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเฉพาะของแร่ที่ใช้ในการแยกแร่ (CARPCO Research and Engineering, 1954)

CARPCO RESEARCH AND ENGINEERING
JACKSONVILLE, FLORIDA, U.S.A.
SEPARATION CHARACTERISTICS OF MINERALS

NON-CONDUCTORS (HIGH TENSION PINNED)				CONDUCTORS (HIGH TENSION THROWN)			
SP. G.	MAGNETIC	WEAKLY MAGNETIC	NON MAGNETIC	HIGHLY MAGNETIC	MAGNETIC	WEAKLY MAGNETIC	NON MAGNETIC
Over 8.0							Gold Copper
8.0							
7.5					Ferberite	Wolframite	Galena Cassiterite
7.0							
6.5							
6.0			Scheelite			Columbite— Tantalite	
5.5							
5.0	Monazite	Bastnasite		Magnetite		Samarskite Euxenite	Pyrite
4.5	Xenotime		Zircon Barite	Ilmenite— (High Iron)	Ilmenite Davidite	Hematite Chromite	Molybenite
4.0	Garnet Siderite Staurolite		Corundum Celestite Perovskite				Rutile Chalcopyrite Brookite Limonite
3.5		Epidote Olivine Apatite Hornblende Tourmaline Mica (Biotite)	Kyanite Topaz Sphene Sillimanite Fluorite Anhydrite Mica (Muscovite)				Diamond
3.0							
2.5			Beryl Feldspars Calcite Quartz Gypsum Chrysotile Sulphur				
2.0							Graphite
Under 2.0							

EXPLANATION OF TABLE:

Starting with a mixture of any of the above minerals it may be determined whether or not they can be separated by high tension, magnetic, or gravity methods and whether any one, or a combination of methods is required. If the minerals appear in different columns they may be separated by high tension and/or magnetic methods alone. Two or more minerals appearing in the same column can be separated by gravity concentration if they have sufficient difference in gravity (usually a difference of approximately 1.0).

It should be noted that grain shape and/or size may alter separation characteristics. This is sometimes a detriment and other times useful. As an example, mica and quartz may in many cases be separated by high tension due to their grain shape.

Minerals behavior characteristics shown are from tests made in our laboratories rather than theoretical. Mineral characteristics and behaviors sometimes vary from different deposits. The behavior of minerals not shown can usually be predicted by the behavior of similar minerals in the above table.

Copyright CARPCO 1954

3.1 การเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่หนัก

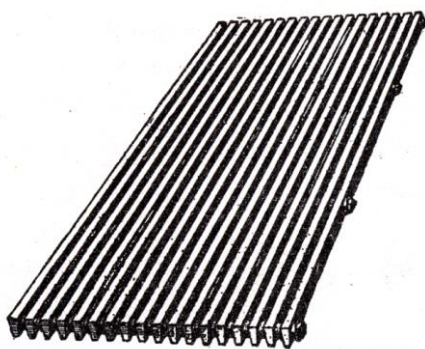
3.1.1 การคัดขนาดด้วยตะแกรง

การคัดขนาดด้วยตะแกรง เป็นการนำแร่ไปผ่านตะแกรงซึ่งมีช่องต่างๆ ตามที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ ช่องบนตะแกรงทำขึ้นได้โดยการเจาะรูบนแผ่นเหล็กหรือนำแท่งเหล็กมาวางเรียงกัน หรือนำลวดขนาดต่างๆ มาสานเป็นช่องก็ได้ การคัดขนาดด้วยตะแกรงสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การคัดขนาดแบบแห้ง และการคัดขนาดแบบเปียกโดยใช้น้ำช่วยซึ่งเป็นการเติมน้ำลงไปเพื่อช่วยให้แร่ขนาดเล็กหลุดผ่านตะแกรงได้ดีกว่าการคัดขนาดแบบแห้ง โดยแร่ที่ค้างอยู่บนตะแกรง เรียกว่า แร่โตเกินขนาด (Oversize) ส่วนแร่ที่หลุดผ่านรูตะแกรงลงไปได้ เรียกว่า แร่เล็กเกินขนาด (Undersize)

ในการแต่งแร่ แร่ที่จะนำไปแยกด้วยเครื่องมือชนิดต่างๆ หากนำมาคัดขนาดด้วยตะแกรงให้เหมาะสมเสียก่อน จะทำให้การแต่งแร่ด้วยเครื่องมือชนิดต่างๆ นั้น สามารถแยกแร่ได้สะอาดยิ่งขึ้น

แบบของตะแกรง (Screen types) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) ตะแกรงแบบอยู่กับที่ (Stationary Screens) ตะแกรงแบบนี้จะไม่มีการเคลื่อนไหวใดๆ ใช้กับการคัดขนาดแร่หยาบขั้นต้น ซึ่งเป็นแร่ที่ขุดได้จากเหมืองก่อนจะนำไปป้อนลงในช่องเก็บแร่เพื่อทำการบดหยาบขั้นต้น ตะแกรงแบบนี้ทำด้วยเหล็กแท่งที่ทันทาน (Grizzly) ซึ่งมักจะนิยมใช้เหล็กมาวางเรียงขนานกัน อาจจะมีระยะห่างตั้งแต่ 30 ซม. และเล็กจนไปถึง 20 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.1

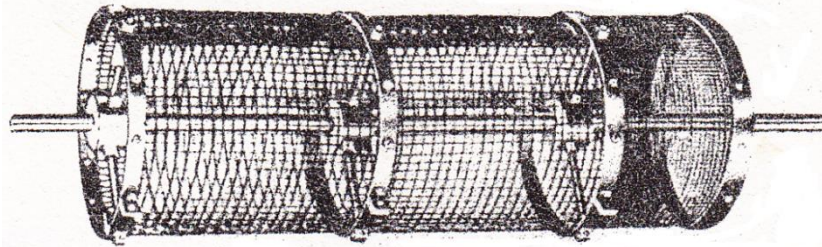


รูปที่ 3.1 ตะแกรงอยู่กับที่ (Grizzly) (นิคม โชติกานนท์, 2536)

2) ตะแกรงแบบเคลื่อนที่ (Moving screens) ตะแกรงแบบนี้ตัวตะแกรงมีการเคลื่อนไหว และรูปร่างของตะแกรงอาจจะเป็นสี่เหลี่ยมหรือม้วนเป็นทรงกระบอก เช่น ตะแกรงหมุน และตะแกรงสั่น เป็นต้น

ตะแกรงหมุน (Revolving screens) ตะแกรงหมุนเป็นตะแกรงแบบเก่าที่นิยมใช้กันมาก และรู้จักในชื่อของ Trommel ตะแกรงแบบนี้ใช้ได้ทั้งแบบเปียกและแห้ง แร่จะถูกป้อนเข้าที่ปลายด้านหนึ่งและไหลออกอีกด้านหนึ่งสำหรับแร่ที่ขนาดใหญ่ ส่วนแร่ขนาดเล็กจะหลุดรูตะแกรงเป็นช่วงๆ ลักษณะของตะแกรงเป็นรูปทรงกระบอกหมุนที่ความเร็วรอบต่ำ สามารถคัดขนาดแร่ได้ตั้งแต่ 55 มม. ถึง 6 มม. ถ้าขนาดเล็กกว่านี้จะต้องใช้แบบเปียก เช่น ในการคัดขนาดทรายขนาดต่างๆ ความเร็ว 15 – 20 รอบต่อนาที เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตะแกรงสั่น (Vibrating screens) เป็นตะแกรงที่ใช้กันมากในการแต่งแร่สามารถคัดขนาดแร่ได้ตั้งแต่ 25 มม. จนถึง 25 ไมครอน หรือ 25 ซม. จนถึง 5 มม. การคัดขนาดแร่หยาบจะใช้กลไกที่ทำให้สั่นด้วยการทำจุดศูนย์กลางเยื้องศูนย์ เหมาะสำหรับการบ่อนแร่หยาบกว่า 4 ซม. แต่ถ้าต่ำกว่านี้จะใช้หลักความไม่สมดุลย์ของพูลเลย์ (Pulley) ความเร็วที่ใช้ 600 – 3,000 รอบต่อนาที ช่วงสั่นน้อยกว่า 25 มม.

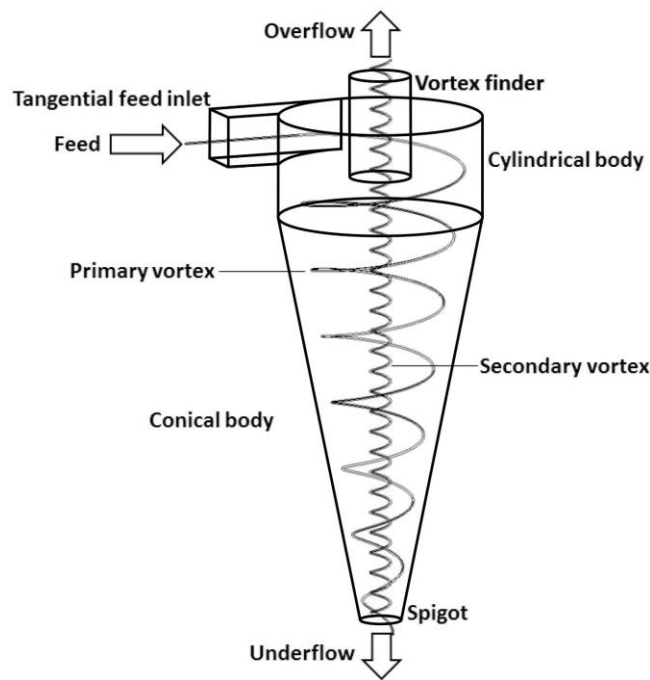


รูปที่ 3.2 ตะแกรงหมุน (Trommel) (นิคม โชติกานนท์, 2536)

3.1.2 การปรับปริมาณของแข็งในน้ำ (%solid) ด้วยไฮโดรไซโคลอน

ไฮโดรไซโคลอนเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการปรับปริมาณของแข็งในน้ำ (%solid) ของแร่บ่อน และยัง เป็นเครื่องมือสำหรับแยกน้ำออกจากทรายด้วย โดยมีขนาดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงไม่กี่มิลลิเมตร จนถึงประมาณ 100 นิ้ว อัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดตั้งแต่ 1 หรือ 2:1 จนกระทั่ง 8 หรือ 10:1 การใช้ประโยชน์ไฮโดรไซโคลอน คือ ทำหน้าที่กำจัดฝุ่นละอองหรือตะกอนฝุ่น (Desliming) กำจัดตะกอนหยาบ (Degritting) คัดขนาด (Classification) ชะล้าง (Washing) ไฮโดรไซโคลอนมีส่วนประกอบที่สำคัญ 5 ส่วน ดังนี้ (รูปที่ 3.3)

- 1) ช่องบ่อนเข้า (Feed Nozzle) เป็นทางเข้าของสิ่งที่บ่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอนด้วยแรงดันคงที่ ทำให้เกิดการหมุนเวียนภายในไซโคลอน ช่องบ่อนนี้จะมีแนวสัมผัสกับทรงกระบอกของตัวไซโคลอนพอดี
- 2) แผ่นปิดบน (Top End Plate) ส่วนบนของไฮโดรไซโคลอนจะถูกปิดด้วยแผ่นปิด โดยมีท่อล้นออก (Overflow) ตั้งฉากและอยู่ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นปิด
- 3) ช่องทางออกของขนาดละเอียด (Overflow Nozzle or Vortex Finder) เป็นช่องทางออกของขนาดละเอียด (Undersize) โดยต่อเป็นท่อจากแผ่นปิด
- 4) ตัวไซโคลอน (Conical Body or Cone Section) ลักษณะเป็นรูปกรวยมีมุมประมาณ 12 ถึง 20 องศา ถ้ามุมเล็ก ๆ เหมาะสำหรับการแต่งแร่ขนาดละเอียด
- 5) ช่องทางออกของขนาดหยาบ (Underflow Nozzle or Vortex Orifice) เป็นทางออกของขนาดหยาบ (Oversize) ซึ่งอยู่ที่ปลายกรวยด้านล่าง



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) (ภิญโญ มีชำนะ, 2552)

ไฮโดรไซโคลนใช้หลักการเพิ่มน้ำหนักให้เม็ดแร่ขนาดต่าง ๆ ที่จมตัวอยู่ในน้ำด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เมื่อป้อนแร่ผสมน้ำเข้าไปในไฮโดรไซโคลน จะทำให้เกิดการไหลวนรอบผนังไฮโดรไซโคลน ในระยะใกล้แนวแกนจะมีความดันต่ำ ช่วงแนวแกนจะเปิดออกทั้งด้านบนและด้านล่าง แร่ต่างขนาดกันจะแยกออกจากกันโดยมีปัจจัยต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อน %solid ของแร่ แรงดันของส่วนผสมก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน และขนาดทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลน เมื่อส่วนผสมน้ำกับแร่ถูกป้อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน แร่จะถูกเพิ่มน้ำหนักด้วยแรงหนีศูนย์กลางขนาดมหาศาลในขณะที่ส่วนผสมของแร่กับน้ำเคลื่อนตัวตามผนังกรวยลงมายังปลายกรวยด้านล่าง ซึ่งอาจมีค่ามากกว่า 70,000 เท่าของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้เม็ดแร่ที่มีขนาดละเอียดมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างมากและเคลื่อนออกจากไฮโดรไซโคลนที่ปลายกรวยด้านล่าง ซึ่งไฮโดรไซโคลนที่เหมาะสมจะสามารถกำหนดขนาดของแร่ที่ให้ไหลออกที่ปลายกรวยได้ เม็ดแร่ขนาดที่ต้องการจะไหลตามผนังไฮโดรไซโคลนจมลงสู่ปลายกรวย ในขณะที่แร่ที่มีขนาดละเอียดมากและไม่อยู่ภายใต้การกระทำจากแรงหนีศูนย์กลางอันมหาศาลที่เพียงพอ จะไหลเข้าสู่แนวแกนซึ่งเป็นโซนของความดันต่ำ ทำให้เกิดการแยกตัวของอนุภาคออกทางช่องบน (Vortex Finder)

3.1.3 การแต่งแร่ด้วยเครื่องสไปรอล (Reichert Spiral)

การแต่งแร่ด้วยเครื่องสไปรอล เป็นการแต่งแร่ด้วยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Concentration) ชนิดหนึ่ง การแต่งแร่โดยกรรมวิธีนี้อาศัยสมบัติทางความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของแร่และมลทินเป็นสำคัญ โดยที่แร่ต่างชนิดกันเมื่อขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แร่ที่มีความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) สูงจะมีน้ำหนักมากกว่าแร่ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำๆ ด้วยน้ำหนักที่แตกต่างกันนี้สามารถนำมาใช้แยกแร่เหล่านี้นอกจากกันได้ แต่การที่จะแยกแร่ให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับค่าความ

แตกต่างของความถ่วงจำเพาะของแร่ นั่นๆ ด้วย กล่าวคือ ถ้าความความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันมาก ก็
สามารถแยกออกจากกันได้ผลดีด้วยวิธีง่ายๆ แต่ถ้าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกัน ก็ต้องอาศัยเครื่องมือที่มี
ประสิทธิภาพสูง และต้องควบคุมสภาวะการแยกให้เหมาะสม จึงจะได้ผลดี

ขอบเขตการแยกโดยอาศัยความแตกต่างของ ถ.พ. หรือพิกัดการแยกแร่ (concentration
criterion number) โดยวิธีนี้ได้ อาจพิจารณาได้จากการคำนวณดังนี้

$$\text{พิกัดแยกแร่} = \frac{\text{ความถ่วงจำเพาะของแร่หนัก} - 1}{\text{ความถ่วงจำเพาะของแร่เบา} - 1}$$

ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการแยก ถ้าผลลัพธ์มีค่าต่ำกว่า 1.25 จะไม่สามารถแยกโดยอาศัย
หลักการนี้ได้ การแยกจะได้ผลดีเมื่อผลลัพธ์มีค่าสูง และอนุภาคแร่ที่มีขนาดเล็กหรือละเอียดมาก
จำเป็นต้องอาศัยความแตกต่างของ ถ.พ. มากยิ่งขึ้น

เครื่องสไปรอลมีลักษณะเป็นเกลียว โดยมีชั้นแยกแร่วางตั้งอยู่ในแนวดิ่งหลายๆ ชั้น ดังแสดงในรูป
ที่ 3.4 ตัวรางของเครื่องสไปรอลทำด้วยไฟเบอร์กลาสเคลือบผิวด้วยยูรีเทน ซึ่งมีความลื่นและทนต่อการ
เสียดสีเป็นอย่างดี นิยมใช้กันมากในการแต่งแร่ในอุตสาหกรรม เพราะสามารถรับการบ่อนแร่ได้ปริมาณ
มาก ต้นทุนต่ำ และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตารางที่ 3.2 แสดงข้อดี-ข้อเสียของการแต่งแร่ด้วย
เครื่องสไปรอล

ตารางที่ 3.2 ข้อดี-ข้อเสียของการแต่งแร่ด้วยเครื่องสไปรอล (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)

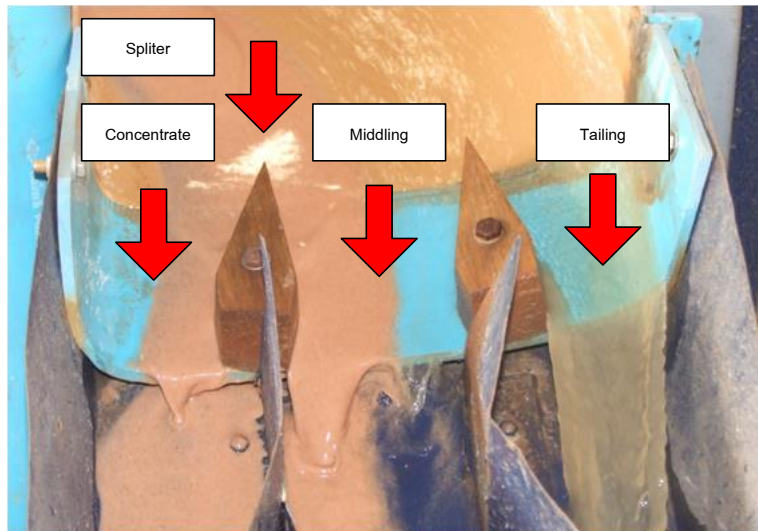
ข้อดี	ข้อเสีย
- อัตราการบ่อนแร่สูง (High Capacity) เมื่อเปรียบเทียบกับโต๊ะสั่นแยกแร่ - ใช้เงินลงทุนต่ำต่อระยะเวลาการใช้งาน - ใช้พลังงานน้อย การใช้พลังงานจะใช้สำหรับการขับปั๊มเพื่อบ่อนแร่เข้าสู่เครื่องเท่านั้น - มีระบบการทำงานที่ไม่มีเครื่องกลไกซับซ้อนยุ่งยาก ไม่มีส่วนประกอบที่ต้องเคลื่อนไหวทำให้เกิดส่วนที่สึกหรอน้อย การดูแลรักษาง่าย - มีพื้นผิวทนทานต่อการขัดสี เพราะส่วนใหญ่ทำด้วยไฟเบอร์กลาสเคลือบผิวด้วยยูรีเทน - มีความสามารถแยกแร่ที่มีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันได้ - ใช้พื้นที่การทำงานน้อยต่อเครื่อง สามารถซ้อนกันสองหรือสามเครื่องในพื้นที่ชุดเดียวกันได้ - อุปกรณ์มีราคาไม่แพง ถ้าสามารถสร้างขึ้นในประเทศไทย - ใช้จำนวนคนงานน้อย - ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม	- ถ้าน้ำในกระบวนการแต่งแร่ขุ่น อาจต้องใช้ไฮโดรไซโคลนช่วยแยกตะกอนแขวนลอย (slime) ออกจากแร่บ่อนก่อน



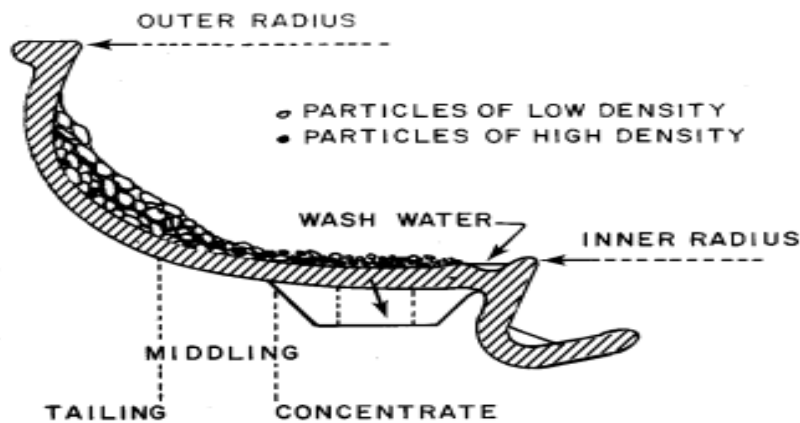
รูปที่ 3.4 เครื่องสไปรอล ที่กลุ่มแต่งแร่และใช้ประโยชน์แร่ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)

หลักการที่ใช้แยกแร่หนักออกจากแร่เบาด้วยเครื่องสไปรอล ใช้หลักของแรงโน้มถ่วงและแรงหนีศูนย์กลาง โดยที่ส่วนประกอบของเครื่องสไปรอลไม่มีการเคลื่อนไหวขณะทำงาน น้ำผสมแร่ที่มีความหนาแน่นระหว่าง 15 - 45 เปอร์เซ็นต์จะถูกป้อนที่ชั้นสูงสุด และปล่อยให้ไหลลงตามรางของเครื่องสไปรอล ลักษณะการไหลมี 2 แบบ คือ (1) ไหลลงในแนวแกนตั้งด้วยการกระทำจากแรงโน้มถ่วง และ (2) ไหลในแนวรัศมีของรางด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำให้อนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำจะเคลื่อนออกจากศูนย์กลางตามแรงเหวี่ยง ส่วนอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงจะเคลื่อนที่อยู่ใกล้ศูนย์กลาง โดยปกติอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงจะมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่อยู่ด้านในหรือใกล้ศูนย์กลาง แต่ขนาดของอนุภาคก็มีส่วนสำคัญที่มีผลต่อการแยกกล่าวคือ อนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากัน แต่มีขนาดต่างกันอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่อยู่ด้านในมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เมื่อแร่ไหลลงมาถึงปลายรางแร่จะถูกแยกออกที่ท้ายรางโดยมีที่คั่นแยกแร่ที่มีลักษณะเป็นลิ้นเป็นตัวแยกหัวแร่กับหางแร่ออกจากกัน ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ส่วนแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดกรวดทรายและเม็ดแร่หนักได้แสดงตามรูปที่ 3.7

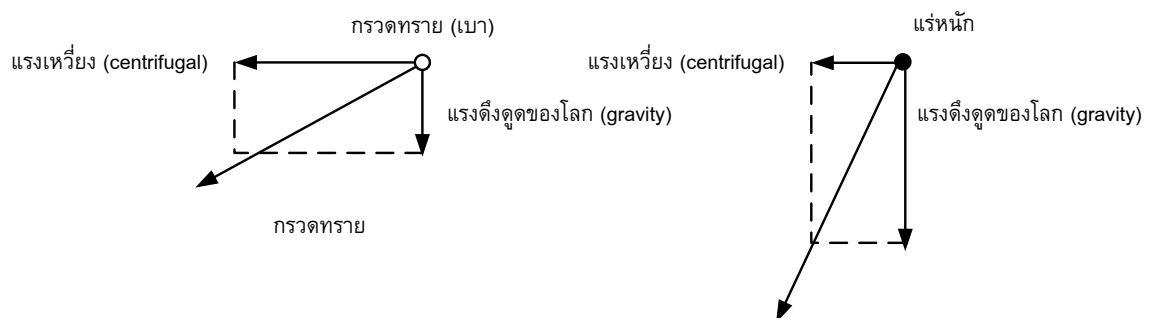
การที่จะทำให้เครื่องสไปรอลทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น การป้อนแร่ต้องมีการควบคุมให้ความหนาแน่นของน้ำผสมแร่ที่ป้อนคงที่ ขนาดของอนุภาคควรมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และควบคุมปริมาตรของแร่ที่ป้อนให้คงที่ เครื่องสไปรอลส่วนใหญ่ใช้ในการแต่งแร่เพื่อแต่งแร่ให้ได้หัวแร่ขั้นต้น ก่อนที่จะนำหัวแร่ไปทำให้มีความสะอาดเพิ่มขึ้นด้วยการใช้เครื่องแต่งแร่ชนิดอื่น



รูปที่ 3.5 ลักษณะการไหลของแร่ในเครื่องสไปรอล (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)



รูปที่ 3.6 ลักษณะการไหลของอนุภาคแร่ที่แยกโดยเครื่องสไปรอล (วิญญู มีขำนะ, 2552)



รูปที่ 3.7 เส้นแรงที่เกิดกับเม็ดแร่ในการแยกแร่ด้วยสไปรอล (วิญญู มีขำนะ, 2552)

3.1.4 การแยกรั่วด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Separation)

สนามแม่เหล็กที่กระทำต่อสสาร แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) Paramagnetic คือ ดูดเข้าหาขั้วแม่เหล็ก
- 2) Diamagnetic คือ ผลักออกจากขั้วแม่เหล็ก

ในการแยกรั่วจะใช้ประโยชน์จากสสาร Paramagnetic เป็นหลัก ดังนั้น การแยกรั่วด้วยแม่เหล็ก ขึ้นอยู่กับกำลังของแม่เหล็ก (Magnetic Force) ที่กระทำต่อสสาร ปริมาตรของสสาร ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) และความซึมได้ (Permeability)

กำลังของแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาตรของสสาร ดังสมการ

$$F_m = \frac{V \cdot H}{\mu} \frac{dH}{dl}$$

เมื่อ H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Filed Intensity)

l = ระยะห่างจากจุดกำลังแม่เหล็ก

V = ปริมาตรของสสาร

F_m = กำลังแม่เหล็ก

μ = ความซึมได้ของเส้นแรงแม่เหล็กในสสาร (Permeability)

d = field gradient

เนื่องจากแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาตรของสสาร เมื่อเป็นแร่ชนิดเดียวกัน การแยกด้วยกำลังแม่เหล็กย่อมแปรผันตามขนาดของเม็ดแร่และความถ่วงจำเพาะ โดยที่แร่เม็ดละเอียดจะแยกได้ยากกว่าแร่เม็ดหยาบ หรือแร่เม็ดโตเกินไปจะมีน้ำหนักเกินกว่ากำลังดูดของสนามแม่เหล็กจะกระทำได้ จึงไม่เกิดการแยกรั่ว

3.1.4.1 คุณสมบัติการดูดติดแม่เหล็ก

คุณสมบัติการดูดติดแม่เหล็กแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- 1) แร่ติดแม่เหล็กได้ดี (Strongly Magnetic) ได้แก่ แร่แมกนีไทต์ แร่โอลิเมนไนต์ เป็นต้น
- 2) แร่ติดแม่เหล็กได้น้อย (Weakly Magnetic) ได้แก่ แร่รูลแฟรมไมต์ แร่เซอร์คอน เป็นต้น
- 3) แร่ไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic) ได้แก่ แร่แบไรต์ แร่ควอร์ตซ์ เป็นต้น

คุณสมบัติการดูดติดแม่เหล็กอาจเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากมลทินที่ปนในเม็ดแร่ ซึ่งอาจทำให้แร่ที่ไม่ติดแม่เหล็กติดแม่เหล็กได้

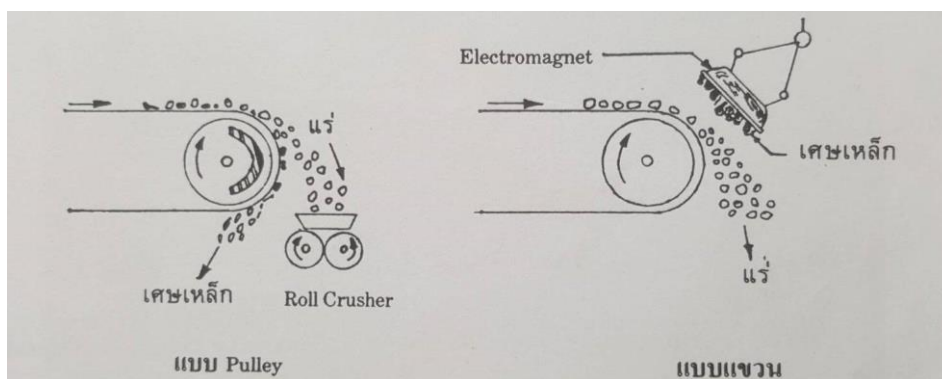
3.1.4.2 อุปกรณ์สำหรับแยกแร่โดยอาศัยอำนาจแม่เหล็ก (Magnetic Separator)

อุปกรณ์สำหรับแยกแร่โดยอาศัยอำนาจแม่เหล็ก (Magnetic Separator) ในอุตสาหกรรมแต่งแร่ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

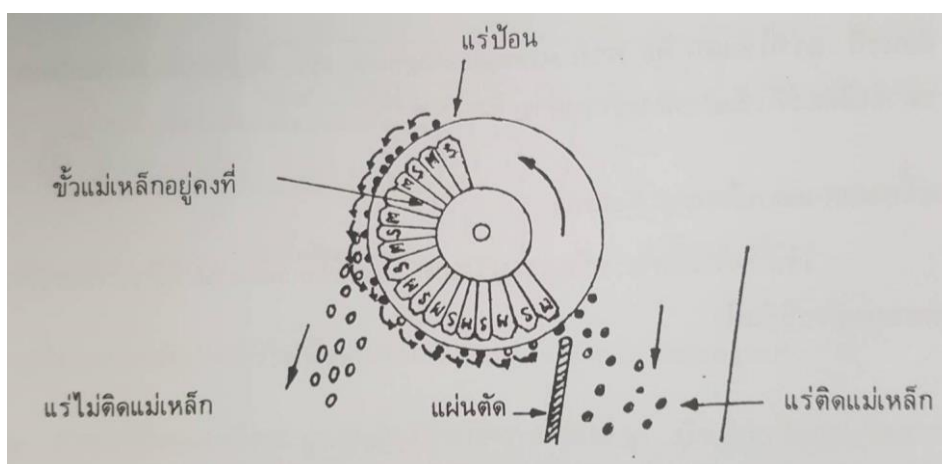
1) แยกเศษเหล็กที่ปนกับแร่ก่อนเข้ากระบวนการแต่งแร่ มีทั้งแบบแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้า ลักษณะของเครื่องมีทั้งแบบ Pulley และแบบแขวน (รูปที่ 3.8)

2) แยกแร่ที่ติดแม่เหล็กออกจากแร่ที่ไม่ติดแม่เหล็กหรือติดแม่เหล็กได้น้อย แบ่งลักษณะการทำงานเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทเกาะติด (Holding Type) และประเภทดูดติด (Pick Up Type)

เครื่องแยกแร่แม่เหล็กประเภทเกาะติด แร่ที่จะแยกจะป้อนโดยตรงที่ผิวของเครื่องซึ่งหมุนอยู่ตลอดเวลา แร่ที่ไม่ติดแม่เหล็กจะถูกเหวี่ยงออกด้วยแรงเหวี่ยงและความถ่วงจำเพาะของแร่ ส่วนแร่ที่ติดแม่เหล็กจะเกาะติดกับเครื่องแยกไปจนพ้นสนามแม่เหล็กจึงหลุดออก เครื่องมือประเภทนี้ ได้แก่ เครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบลูกกลิ้ง (Drum Magnetic Separator) (รูปที่ 3.9 – 3.10) เครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบจาน (Rapid Magnetic Separator) (รูปที่ 3.11 – 3.12)



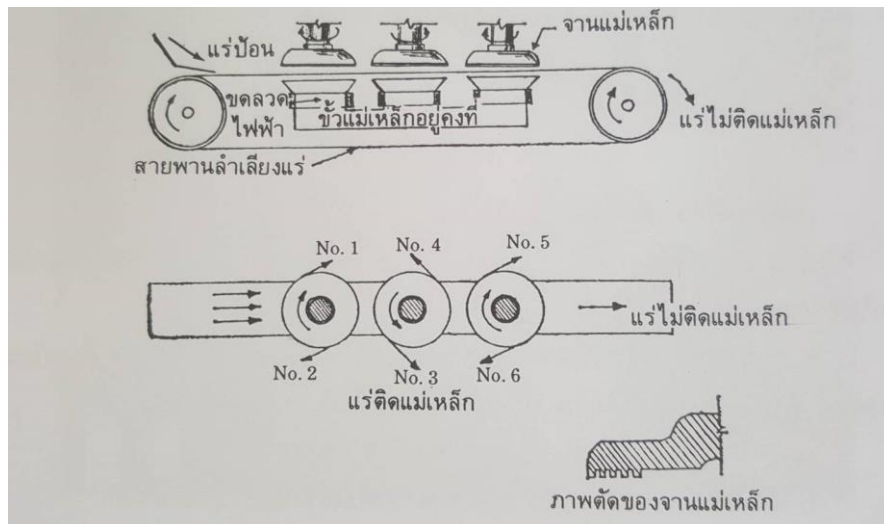
รูปที่ 3.8 แสดงการแยกเศษเหล็กที่ปนกับแร่ก่อนเข้ากระบวนการแต่งแร่ ทั้งแบบ Pulley และแบบแขวน (กรมทรัพยากรธรณี, 2527)



รูปที่ 3.9 ลักษณะลูกกลิ้งและการทำงานของลูกกลิ้งในเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบลูกกลิ้ง (กรมทรัพยากรธรณี, 2527)



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบลูกกลิ้ง (Drum Magnetic Separator) ลูกศรแสดงตำแหน่งลูกกลิ้ง



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะการทำงานของเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบจาน (Rapid Magnetic Separator)
(กรมทรัพยากรธรณี, 2527)



รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กแบบจาน (Rapid Magnetic Separator)

3.2 การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา

การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยามีหลายกระบวนการ ได้แก่

3.2.1 กระบวนการไทรอน (Tiron Process)

3.2.2 กระบวนการอิชิวาร่า (Ishiwara Process)

3.2.3 กระบวนการเบนนิไลต์ (Benilite Process)

3.2.4 กระบวนการไซโร (CSRIO Process)

3.2.5 กระบวนการมิตซูบิชิ (Mitsubishi Process)

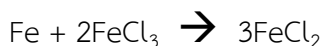
3.2.6 กระบวนการไฮโดรคลอรีเนชัน (Hydrochlorination Process)

3.2.7 กระบวนการ Becher (Becher Process)

โดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 กระบวนการไทรอน (Tiron Process)

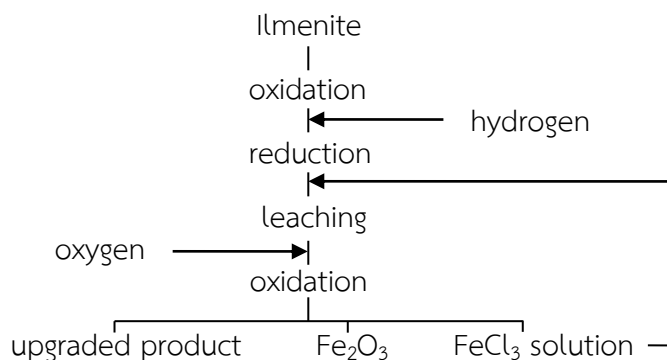
แร่ิลเมไนต์จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นการออกซิไดซ์ Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} แร่ที่ผ่านการออกซิเดชันจะถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนทำให้เหล็กออกไซด์เปลี่ยนเฟสเป็นโลหะเหล็ก แล้วนำมาชะละลายตัวอย่างด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride, FeCl_3) ดังปฏิกิริยา



หลังการชะละลายบางส่วนของเฟอร์รัสไอออนถูกทำให้ตกตะกอนโดยการแยกสลายด้วยน้ำที่มีออกซิเจน ดังปฏิกิริยา



เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้รักษาอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาไว้ได้ การที่เกิด FeCl_3 กลับมาอีกสามารถนำเอากลับไปชะละลายได้ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนผังกระบวนการไทรอน (Goto, 2531)

3.2.2 กระบวนการอิชิวาร่า (Ishiwara Process)

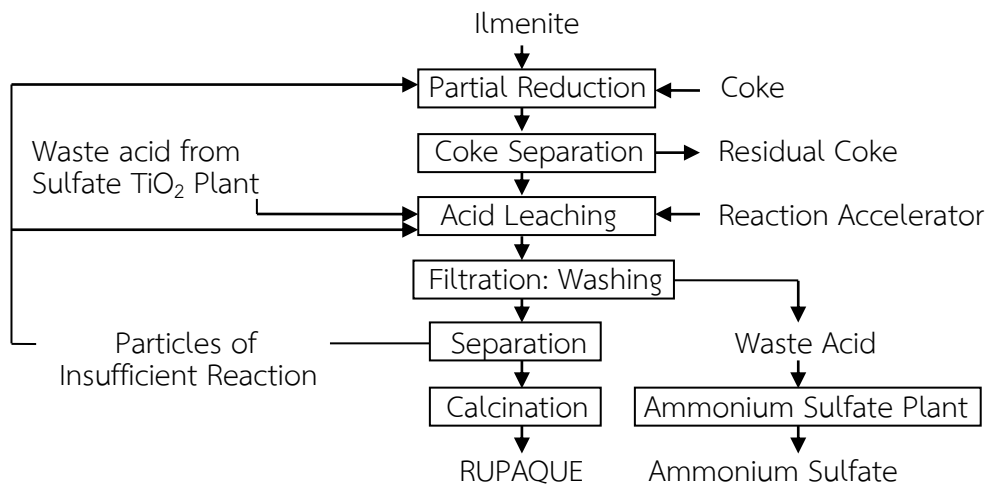
แผนผังกระบวนการดังรูปที่ 3.14 แร่ิลเมไนต์ถูกรีดิวซ์ด้วยถ่านโค้กที่อุณหภูมิ 800-950 °C ในเตาหมุนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เฟอร์ริกไอออนจะเปลี่ยนเป็นเฟอร์รัสไอออน ดังปฏิกิริยา



แล้วปล่อยให้เย็นช้า ๆ โดยป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิเดชัน แยกคาร์บอนออกไป นำตัวอย่างมาชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกที่เป็นผลผลิตจากโรงงานผลิตไทเทเนียมออกไซด์ ดังปฏิกิริยา



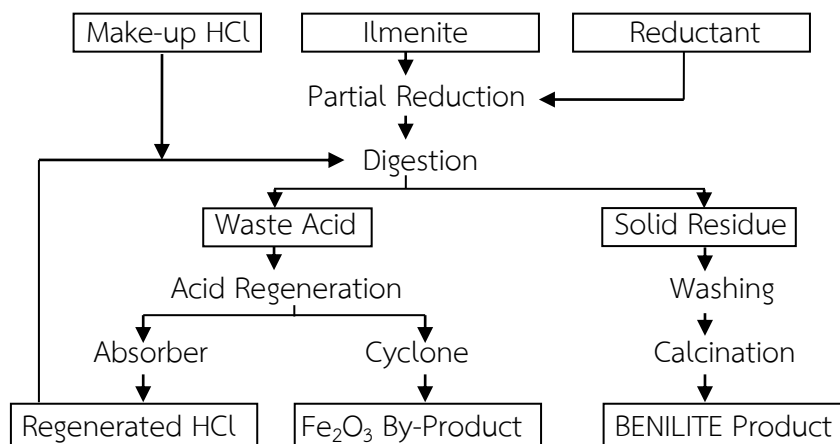
หลังจากการชะละลายนำส่วนผสมใส่ในถังเกรอะ (Thickener) เพื่อแยกของแข็งออกจากสารละลาย สารละลายจะถูกนำไปกรอง ของแข็งที่ได้จากการกรองถูกล้างแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ส่วนของแข็งจากถังเกรอะนำไปคัดขนาด ขนาดใหญ่จะถูกส่งกลับไปชะละลายซ้ำอีก กรดที่เสียจากการชะละลายถูกนำไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียมเพื่อให้เหล็กตกตะกอนเป็นเหล็กออกไซด์ ซึ่งเป็นฝุ่นเหล็กที่สามารถใช้สำหรับทำวัสดุแม่เหล็กได้ และชั้นสุดท้ายจะได้แอมโมเนียมซัลเฟต สำหรับกระบวนการนี้ควรเชื่อมโยงกับโรงงานไทเทเนียมออกไซด์และโรงงานแอมโมเนียมซัลเฟตสำหรับทำปุ๋ย (Fertilizer) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการซัลเฟตประเภทหนึ่ง



รูปที่ 3.14 แผนผังกระบวนการอิชีวารา (Goto, 2531)

3.2.3 กระบวนการเบนนิไลต์ (Benilite Process)

อิลเมนไนต์จะถูกรีดิวซ์ด้วยถ่านหิน (Coal) ในเตาหมุ่เพื่อรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออน จากนั้นนำไปชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้น 18-20% เหล็กเกือบทั้งหมดจะถูกชะละลายออกไป น้ำของแข็งส่วนที่เหลือไปเผาจะได้ผลผลิต กรดที่ผ่านการชะละลายซึ่งมีเหล็กปนอยู่จะถูกนำไปโรงงานก่อกำเนิดกรดใหม่ และจะได้ Fe_2O_3 เป็นส่วนที่พลอยได้ ดังรูปที่ 3.15

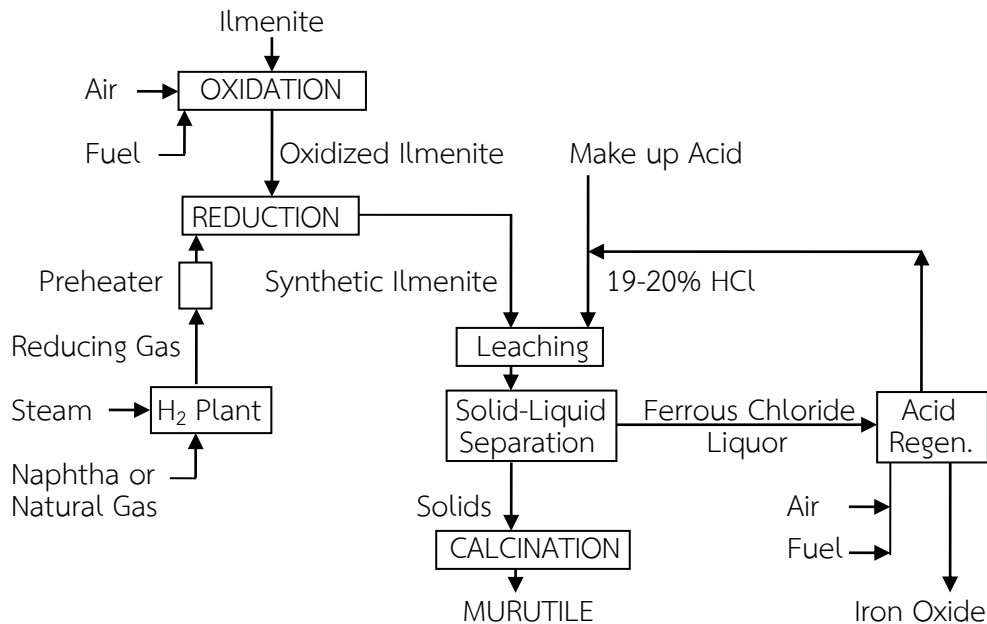


รูปที่ 3.15 แผนผังกระบวนการเบนนิไลต์ (Goto, 2531)

3.2.4 กระบวนการไซโร (CSRIO Process)

แผนผังแสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. การออกซิเดชัน มีการเผาแร่โอลิเมนไนต์ในสภาวะออกซิเดชันด้วยอากาศในชั้นของไหลที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 1 ชั่วโมง
2. การรีดักชัน มีการเผา รีดักชันของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการออกซิเดชันในชั้นของไหลด้วยก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 900 °C
3. การชะละลาย มีการชะละลายตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วย 20% HCl ที่อุณหภูมิ 105 °C เวลา 4 ชั่วโมง เพื่อชะละลายเหล็ก แมงกานีส แมกนีเซียม และแคลเซียมออกไซด์
4. การแยกของแข็งจากของเหลว หลังจากแยกของเหลวออกไป ของแข็งจะผ่านเครื่องแยกแร่แม่เหล็กเพื่อแยกโครเมียมและเหล็กออกไป
5. การก่อกำเนิดกรดไฮโดรคลอริกใหม่ ของเหลวจากขั้นตอนการแยกของแข็ง-ของเหลวที่มีเหล็ก คลอไรด์และ HCl ถูกทำให้ร้อนด้วยอากาศ เหล็กจะตกตะกอนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์และ HCl จะเวียนกลับมาใช้ใหม่จากไอที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.16 แผนผังกระบวนการไซโร (Goto, 2531)

3.2.5 กระบวนการมิตซูบิชิ (Mitsubishi Process)

กระบวนการนี้อาจเรียกว่าเป็นกระบวนการคลอไรด์ (Chloride Route) ซึ่งใช้ก๊าซคลอรีนที่อุณหภูมิสูงในการแยกเหล็กออกจากแร่โอลิเมนไนต์ ดังรูปที่ 3.17 กระบวนการมี 5 ขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

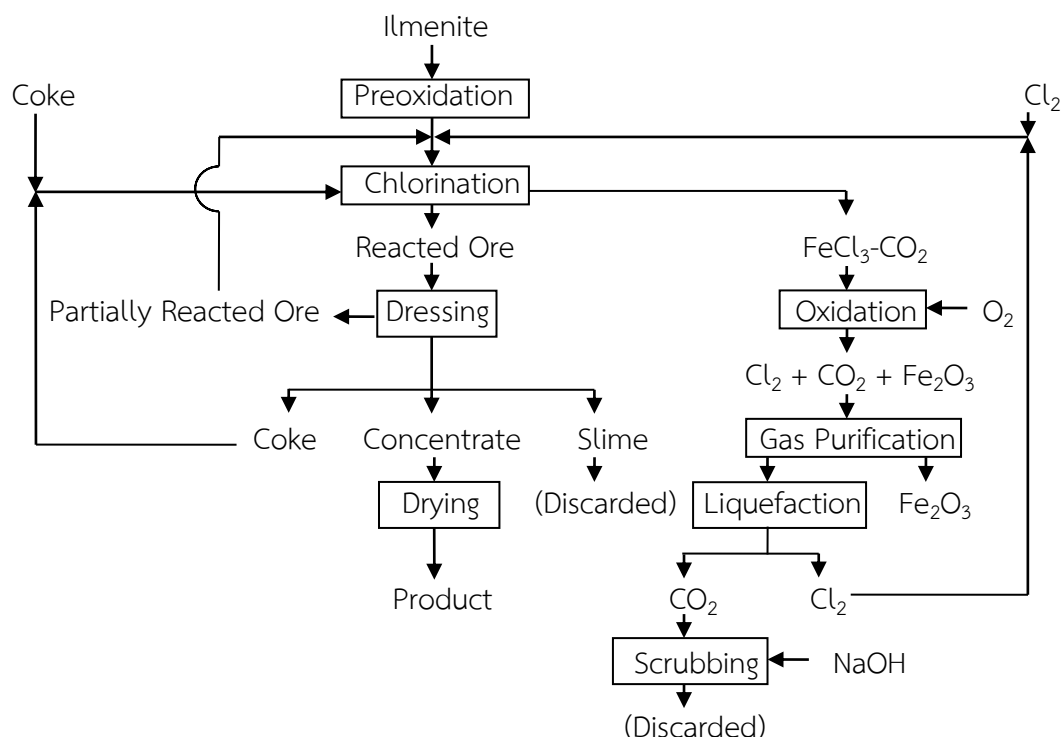
1. การออกซิเดชัน แร่โอลิเมนไนต์ถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศในเตาหมุนหรือชั้นของไหลที่อุณหภูมิ 900-950 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง โอลิเมนไนต์ (FeTiO_3) จะสลายตัวเป็นซูโดบรูคไคต์ (Fe_2TiO_5) รูไทล์ (TiO_2) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3)

2. การคลอรีเนชันแบบเจาะจง (Selective Chlorination) แร่ที่ผ่านการออกซิเดชันจะถูกทำปฏิกิริยากับคลอรีนและโค้กที่อุณหภูมิ 940-960 °C ในเครื่องชั้นของไหล เหล็กจะถูกคลอรีเนชันเป็นสารประกอบคลอไรด์ และจะหยุดการทำปฏิกิริยาเมื่อเหลือเหล็กที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาอยู่น้อยกว่า 4% ทั้งนี้เพื่อป้องกัน TiO_2 ทำปฏิกิริยาคลอรีเนชัน

3. การแยกด้วยแม่เหล็ก ส่วนที่ติดแม่เหล็ก เช่น เหล็กจากการคลอรีเนชันจะถูกแยกออกจากส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็ก เช่น ไทเทเนียมออกไซด์เกรดสูงและโค้ก ด้วยเครื่องแยกแม่เหล็กที่มีสนามแม่เหล็กมากกว่า 20,000 เกาส์ ส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็กจะผ่านขั้นตอนการลอยแร่ ทำให้โค้กและไทเทเนียมออกไซด์แยกออกจากกัน จะได้ผลผลิตที่มี TiO_2 มากกว่า 95%

4. การสกัดก๊าซที่ออกจากการคลอรีเนชัน ก๊าซจากการคลอรีเนชันที่มีเฟอริกคลอไรด์และคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนที่อุณหภูมิ 900 °C เหล็กคลอไรด์จะเปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์และก๊าซคลอรีน อนุภาคนาตาละเอียดของเหล็กออกไซด์จะถูกแยกออกมาโดยใช้ถุงกรอง (Bag Filter)

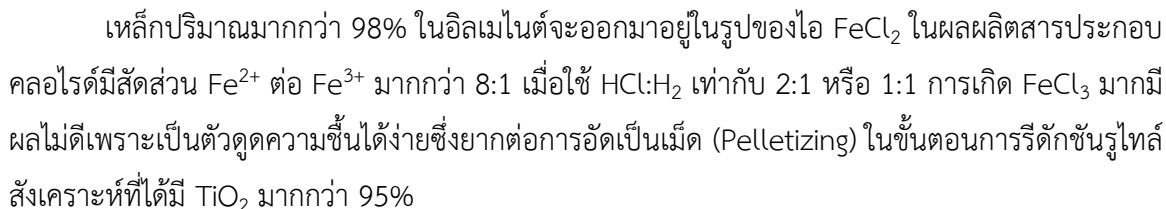
5. การทำก๊าซจากการกรองให้บริสุทธิ์ หลังจากแยกเหล็กออกไซด์ออกไป ก๊าซส่วนใหญ่ประกอบด้วยคลอรีนและ CO_2 ก๊าซถูกทำให้แห้งด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ที่ความดัน 7 บรรยากาศ คลอรีนถูกควบแน่นที่ถังของเหลว (Liquation Tower) มีอุณหภูมิด้านล่าง 10 °C ด้านบน -50 °C ก๊าซคลอรีนที่ได้จะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ในขั้นตอนคลอรีเนชัน



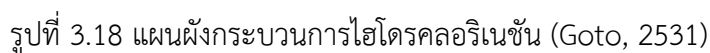
รูปที่ 3.17 แผนผังกระบวนการผลิตซูบิซี (Goto, 2531)

แผนผังกระบวนการดังรูปที่ 3.18 มีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

1. การไฮโดรคลอรีเนชัน แร่ซิลิเกตถูกคลอรีเนชันด้วย HCl และก๊าซไฮโดรเจนในอัตราส่วน $\text{HCl}:\text{H}_2$ เท่ากับ 2:1 ที่อุณหภูมิ 800-900 °C ในชั้นของไหลดังปฏิกิริยา



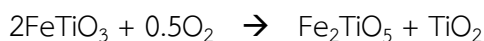
3. การผลิตกรดไฮโดรคลอริกใหม่ ก๊าซจากขั้นตอนคลอรีนชั้นถูกทำให้เย็นตัวลงเพื่อแยกน้ำออก แล้วนำไปผสมกับไฮโดรเจนคลอไรด์จากขั้นตอนรีดักชัน (ก๊าซจากการรีดักชันมีไฮโดรเจนคลอไรด์และไฮโดรเจนที่เหลือ) ทำให้เย็นตัวลง ไฮโดรคลอไรด์จะถูกดูดกลืนโดยการสัมผัสกับกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง จะได้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นซึ่งนำไปผลิตไฮโดรเจนคลอไรด์ใหม่สำหรับขั้นตอนคลอรีนชั้น



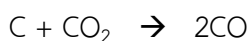
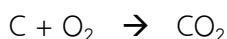
3.2.7 กระบวนการ Becher (Becher Process)

กระบวนการ Becher มีอยู่ 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 3.19 ได้แก่

1. การออกซิเดชัน (Oxidation) ในการออกซิเดชันแร่โอลิเมนไนต์จะถูกเผา (Roast) ในอากาศที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้สภาพของแร่มีสถานะเหมาะสมที่จะทำการรีดักชันในขั้นต่อไป โอลิเมนไนต์จะเปลี่ยนเป็นซูโดบรูคไคต์และรูไทล์ ดังปฏิกิริยา

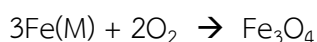


2. การรีดักชัน (Reduction) แร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันจะถูกเผาอีกครั้งในสภาวะรีดักชันเพื่อเป็นการรีดิวซ์เหล็กออกไซด์ให้อยู่ในรูปของโลหะเหล็ก (Metallic Iron) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งได้จากถ่านโค้กที่ป่นเข้าไป ดังปฏิกิริยา



ทั้งตัวอย่างให้เย็นลงโดยป้องกันการออกซิเดชันกลับ จากนั้นนำผลผลิตที่ได้ไปผ่านแท่งแม่เหล็กเพื่อแยกแร่ออกจากถ่านโค้ก

3. การกวนพ่นอากาศ (Aeration) นำแร่ที่ผ่านการรีดักชันมากวนใน 1% NH_4Cl และพ่นอากาศเข้าไป ออกซิเจนจากอากาศจะออกซิไดซ์โลหะเหล็กที่ได้จากการรีดักชันเป็นเหล็กออกไซด์แยกตัวออกจากไทเทเนียมไดออกไซด์ในลักษณะผงละเอียดดังปฏิกิริยา



นำผลผลิตที่ได้มาล้างเอาผงเหล็กออกไซด์ออก

4. การชะละลายด้วยสารเคมี (Chemical Extraction) นำตัวอย่างที่ผ่านการกวนพ่นอากาศไปชะละลายด้วยกรด H_2SO_4 0.5 โมลาร์ เพื่อชะละลายเหล็กที่เหลืออยู่ และมลทินอื่น ๆ เช่น แมงกานีส จะทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ละลายเหลืออยู่

ทั้งนี้ ขั้นตอนทั้งสี่ในกระบวนการ Becher มีการศึกษาเพิ่มเติมอย่างหลากหลาย โดยการศึกษาที่เกี่ยวข้องมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.19 แผนผังกระบวนการ Becher (Becher, 1963)

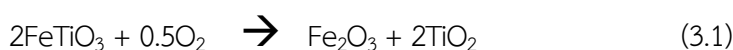
3.2.7.1 การทำออกซิเดชันแร่อิลเมนไนต์ (Oxidation)

การออกซิเดชันคือการปรับสภาพแร่ให้เหมาะสมต่อการทำรีดักชัน มักเผาแร่ในช่วงอุณหภูมิ 500 – 1,100 °C (เทียนไชย, 2533) การออกซิเดชันมีวัตถุประสงค์ให้ธาตุเหล็กในแร่อิลเมนไนต์เปลี่ยนแปลงเป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ให้ได้ทั้งหมดหรือเกือบหมด ซึ่งที่อุณหภูมิสูงมากจะทำให้อิลเมนไนต์จับตัวเป็นก้อนและส่งผลเสียต่อการทำรีดักชันในขั้นต่อไป ลักษณะการจับตัวเป็นก้อนขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ทางเคมีของแร่ การทำออกซิเดชันในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ การจับตัวเป็นก้อน เชื้อเพลิงที่ใช้ ลักษณะของเตา ระยะเวลาที่ใช้ในการทำออกซิเดชัน และขนาดของเม็ดแร่ ซึ่งเม็ดละเอียดจะทำออกซิเดชันได้ดีและรวดเร็วกว่า สารละลายของแข็งที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อการทำรีดักชันแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของแร่ โดยเฉพาะมลทินที่อาจมีผลมากคือแมงกานีส

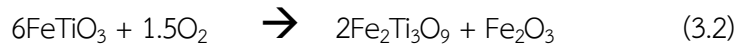
Jones (1973) Borowiec และ Rosenqvist (1981) Rao และ Rigaud (1975) ต่างทำการศึกษาและพบว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 950 °C ผลผลิตจากการทำออกซิเดชันจะเกิดเฟสซูโดบุรูกไต์และรูไทล์ ซึ่งลักษณะของของผสมที่ได้จะคล้ายกับแร่ที่เรียกว่าลูโคซีน ซึ่งเปลี่ยนแปลงมาจากแร่ที่มีไทเทเนียมสูง เช่น อิลเมนไนต์ (FeTiO_3) เพอโรฟสไกต์ (Perovskite, CaTiO_3) และสเฟิน (Sphene, $\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$)

Tittle (1974) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น เฟสรูไทล์จะสูงขึ้นแล้วลดลงตามรูปที่ 3.20 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Rao และ Rigaud (1975) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นปรากฏตามสมการที่ 3.1 – 3.3

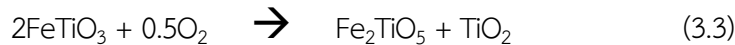
สำหรับ $500 < T < 750$ °C



สำหรับ $770 < T < 890^{\circ}\text{C}$

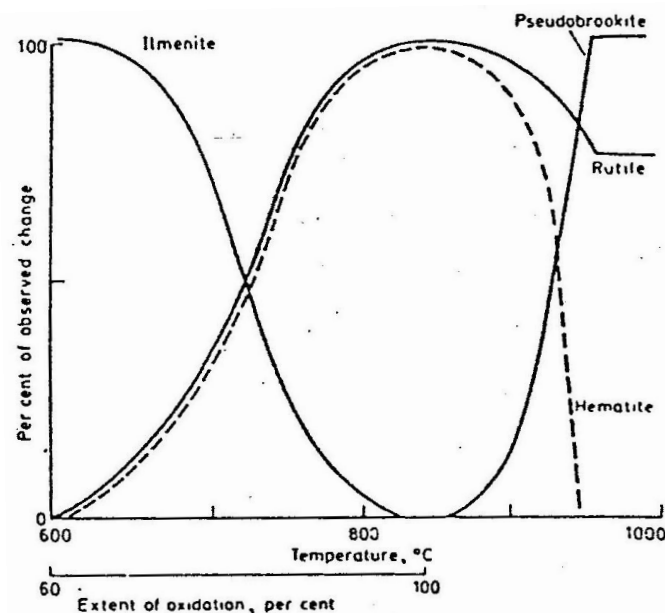


สำหรับ $T > 900^{\circ}\text{C}$

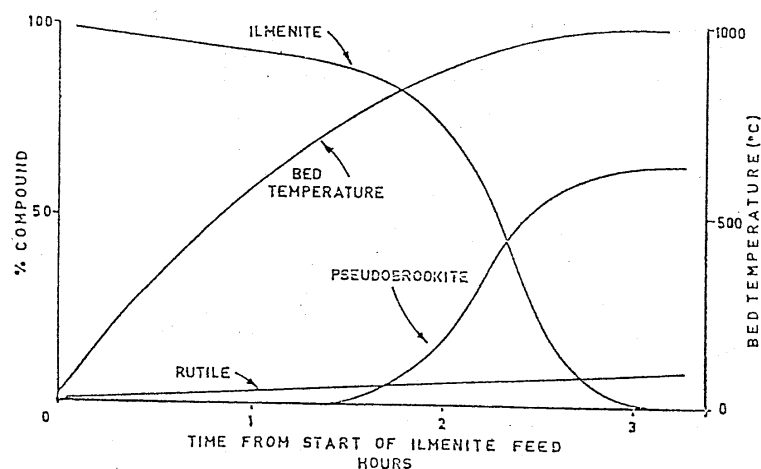


Becher (1963) พบว่าการออกซิเดชันมีผลทำให้เกิดการรีดักชันที่ดีกว่าแร่ดิบ ซึ่งผลต่อการรีดักชันที่อุณหภูมิการออกซิเดชันระหว่าง $950 - 1,100^{\circ}\text{C}$ ไม่แตกต่างจากการทำออกซิเดชันที่อุณหภูมิ $1,150^{\circ}\text{C}$

Bracanin และคณะ (1972) ได้ศึกษาการออกซิเดชันแร่โอลิเมนไนต์ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่า ตามรูปที่ 3.21 การเกิดขึ้นของเฟสซูโดบรูคไคต์และรูไทล์ การหายไปของเฟสโอลิเมนไนต์ เมื่ออุณหภูมิและเวลาที่สูงขึ้นจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ $750 - 800^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.20 การกระจายของเฟสระหว่างการออกซิเดชัน (Tittle, 1974)



รูปที่ 3.21 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อการออกซิเดชันแร่โอลิเมนไนต์ (Bracanin และคณะ, 1972)

3.2.7.2 การรีดักชันแร่โอลิเมนไนต์ภายหลังกระบวนการออกซิเดชัน (Reduction)

แร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการทำออกซิเดชันแล้วจะอยู่ในสภาพแร่รูไทล์ (Rutile) และซูโดบรูคไคต์ (Pseudobrookite) ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำไปทำรีดักชัน เพื่อให้เหล็กออกไซด์ที่อยู่ในโมเลกุลของแร่เปลี่ยนสภาพเป็นโลหะเหล็ก อย่างไรก็ตาม วัสดุแปรต่าง ๆ มีผลต่อการเปลี่ยนสภาพของเหล็กออกไซด์นี้ ได้แก่ เวลา อุณหภูมิ และรีดิวเซอร์ ซึ่งในเชิงพาณิชย์ ถ่านจะเป็นตัวสร้างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบปิด เพื่อให้เกิดการรีดักชัน ซึ่งต้องเกิดที่อุณหภูมิเกินกว่า 1,020 °C (เทียบไซ, 2533)

กระบวนการรีดักชันแร่โอลิเมนไนต์ที่เปลี่ยนสภาพเป็นซูโดบรูคไคต์และรูไทล์แล้วเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.22 (Jones, 1973)

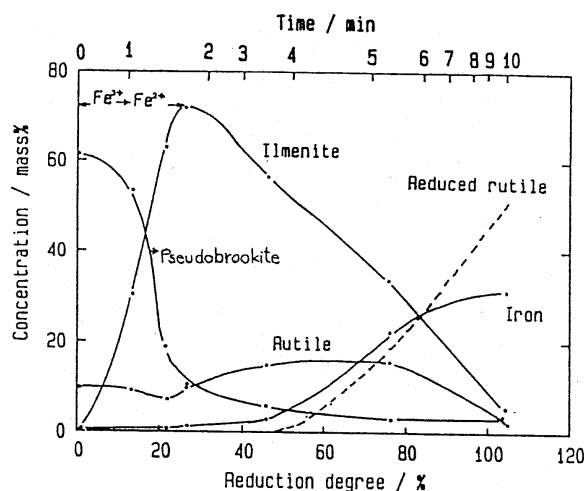
1. เพอร์ริกไอออนของซูโดบรูคไคต์ (Fe^{3+}) เปลี่ยนเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่ช่วงอุณหภูมิ 1,000 – 1,200 °C เกิดโอลิเมนไนต์แบบฟอร์มใหม่ตามปฏิกิริยาที่ 3.4



2. เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ของโอลิเมนไนต์แบบฟอร์มใหม่ถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเหล็ก ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ มลทินของแร่ และเวลา ตั้งแต่อุณหภูมิ 1,000 °C ตามปฏิกิริยาที่ 3.5



พร้อมกับรูไทล์ที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นรีดิวซ์รูไทล์ (Reduced Rutile) ตามปฏิกิริยาที่ 3.6



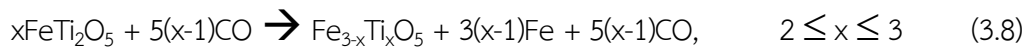
รูปที่ 3.22 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันด้วยก๊าซ

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิ 1,000 °C ที่เวลาต่าง ๆ (Jones, 1973)

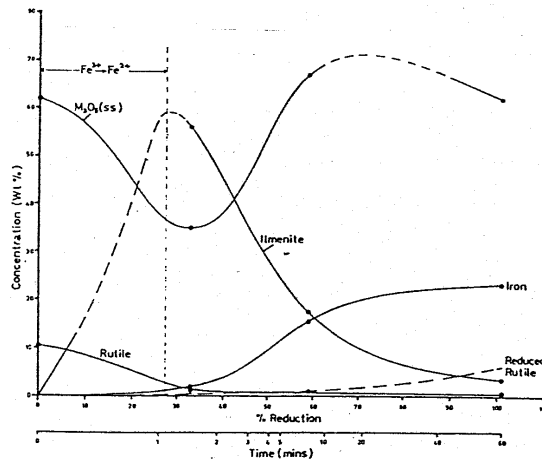
เมื่ออุณหภูมิถึง 1,400 °C โอลิเมนไนต์จากปฏิกิริยาที่ 3.4 จะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเหล็กและซูโดบรูคไคต์ตามปฏิกิริยาที่ 3.7



เมื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นต่อไป เหล็กจะแยกตัวออกจากซูโดบรูคไคต์และเกิดสารละลายของแข็งอะโนโวไซด์ (Anosovite) $M_3O_5: Fe_{3-x}Ti_xO_5$, $2 \leq x \leq 3$ ตามปฏิกิริยาที่ 3.8



ซึ่งเป็นผลผลิตที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อันเกิดจากมลทินแมกนีเซียมและแมงกานีส (Mg, Mn) ในเนื้อแร่โอลิเมนไนต์ ทำให้การรีดักชันเกิดส่วนผสม 3 เฟส ได้แก่ เฟสโลหะ เฟสอะโนโวไซด์ และเฟสรีดิวซ์รูไทล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,200 °C ที่เวลาต่าง ๆ (Jones, 1973)

Grey และคณะ (1974) พบว่าแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันและนำมารีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยถ่านจะไม่เกิดการรีดักชัน Jones (1974) ยังพบอีกว่าการรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 1,200 °C ด้วยถ่านจะทำให้ส่วนหนึ่งของสารละลายของแข็งอะโนโวไซด์เปลี่ยนเป็นเฟสโลหะเหล็กและรีดิวซ์รูไทล์ที่มีความพรุนมาก เทียนไชย (2533) พบว่า การรีดักชันที่อุณหภูมิสูงและเวลามากจะเกิดโลหะเหล็กมาก แต่เปอร์เซ็นต์การเกิดโลหะเหล็กยังต่ำกว่า 90% ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ทั้งนี้ ได้อ้างผลการศึกษาก่อนของ Merk and Pickles (1988) ที่ว่า มลทินของแร่โอลิเมนไนต์ ได้แก่ แมงกานีส แคลเซียม และแมกนีเซียม มีผลลดการเกิดการรีดักชัน เพราะไอออนของมลทินเหล่านั้นจะไปแทนที่เฟอร์รัสไอออนในแร่

ตารางที่ 3.3 ผลการรีดักชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ (เทียนไชย, 2533)

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	% การเกิดเป็นโลหะเหล็ก	
		แร่ไม่ปนโค้ก	แร่ปนโค้ก
1,100	30	14.35	73.17
	60	29.42	74.23
	120	67.92	74.02
	240	83.33	87.55
1,150	30	31.52	72.14
	60	42.71	70.04
	120	48.31	77.05
	240	72.48	78.42
1,175	30	39.93	77.58
	60	50.44	81.58
	120	65.04	80.52
	240	75.64	87.55
1,200	30	46.22	77.05
	60	54.63	77.05
	120	80.55	87.55
	240	77.74	83.68

3.2.7.3 การกวนพ่นอากาศ (Aeration)

การกวนพ่นอากาศเป็นขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งเพื่อสลายโลหะเหล็กโดยกระบวนการทางเคมี สารละลายที่มีอากาศเป็นส่วนผสมของปฏิกิริยาตามปฏิกิริยาที่ 3.9



ภายหลังจากที่แร่โอลิเมนได้ถูกเปลี่ยนแปลงภายใต้กระบวนการรีดักชันแล้ว ออกซิเจนในอากาศจะออกซิไดซ์โลหะเหล็กเปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์ (รูปที่ 3.24) แยกตัวออกจาก TiO_2 และแขวนลอยอยู่ในตัวกลาง (น้ำ)

Farrow และคณะ (1987) เป็นผู้หนึ่งที่ทำการศึกษากระบวนการดังกล่าว โดยใช้สารละลายน้ำกับแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์เป็นตัวกลางของกระบวนการกวนพ่นอากาศ พบว่าความเร็วรอบของการกวนไม่มีผลเป็นนัยสำคัญต่อการทำปฏิกิริยา แต่อุณหภูมิของตัวกลางจะทำให้อัตราการละลายตัวของออกซิเจนในตัวกลางลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดเหล็กออกไซด์ลดลงตามรูปที่ 3.25

นอกจากนี้เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารละลายเป็นโซเดียมคลอไรด์พบความแตกต่างตามรูปที่ 3.26 โดยค่า pH ของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์จะอยู่ที่ประมาณ 4-5 ทำให้ได้เหล็กออกไซด์ชนิดฮีมาไทต์และเลพิโดโครไซต์ ขณะที่ pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์อยู่ที่ประมาณ 9-10 และได้เหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์และเกอไทต์

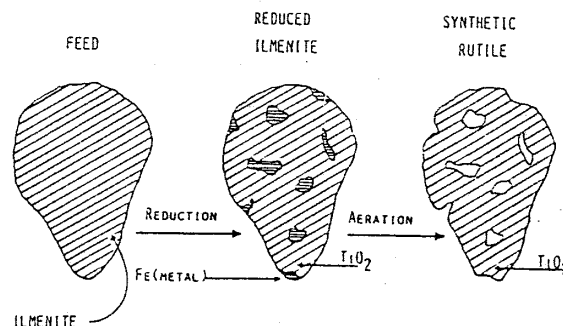
ทั้งนี้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ทำหน้าที่เสมือนสารบัฟเฟอร์ป้องกันไม่ให้ค่า pH ของปฏิกิริยาสูง จนทำให้เหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นตกตะกอนลงบนผิวแร่ก่อนแพร่กระจายออกจากเม็ดแร่ไปอยู่ในตัวกลางจากการรีดักชันของออกซิเจนเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) และทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับผิวโลหะเหล็กบนเม็ด

แร่ เรียกว่าการเกิดลักษณะนี้ว่า (In-situ Oxidation) เหล็กไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นรูปพรุน แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จึงทำหน้าที่ป้องกันเกิดไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ทำให้ออกซิเจนทำปฏิกิริยาต่อ เหล็กได้อย่างต่อเนื่อง ผิวเหล็กจึงไม่ถูกปกคลุมด้วยเหล็กไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ตามปฏิกิริยาที่ 3.10

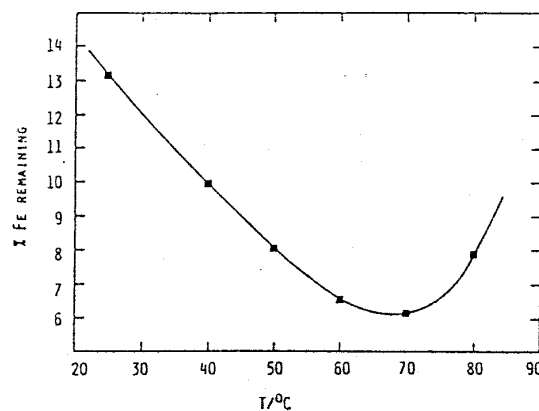


แต่อย่างไรก็ดี มีการศึกษาของ Ramakrishna และคณะ (1988) เปรียบเทียบการใช้แอมโมเนียมคลอไรด์กับน้ำทะเล ปรากฏว่าได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการกวนพ่นอากาศเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermal) ในเชิงพาณิชย์อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 70°C เมื่อกวนนาน 12-14 ชั่วโมง ดังนั้นจะเห็นว่าตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลายเหล็กคือ อุณหภูมิ อากาศ โครงสร้างของรีดิวซ์อิลเมไนด์ ระยะเวลาในการกวน และความหนาแน่นของส่วนผสมในขณะกวน สำหรับเหล็กออกไซด์ที่แขวนลอยอยู่จะถูกแยกออกโดยไฮโดรไซโคลนหรือตะแกรง

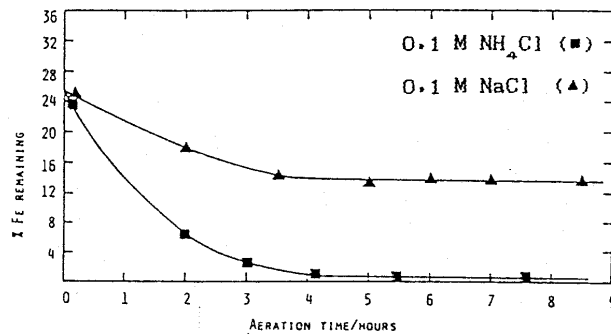
นอกจากนี้ Bracanin และคณะ (1972) พบว่าปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่บนเม็ดรีดิวซ์อิลเมไนด์ที่อุณหภูมิการกวนสูง จะเหลือน้อยกว่าที่อุณหภูมิการกวนต่ำ ทั้งยังพบว่า หากความเข้มข้นของแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) สูงเกินกว่า 2% จะส่งผลให้การละลายของออกซิเจนน้อยลง และทำให้การชะละลายเหล็กลดลง



รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการเพิ่มคุณภาพแร่อิลเมไนด์เป็นรีดิวซ์อิลเมไนด์และรูไทล์สังเคราะห์ (Farrow และคณะ, 1987)



รูปที่ 3.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ในรีดิวซ์อิลเมไนด์ภายหลังการกวนพ่นอากาศ (Farrow และคณะ, 1987)



รูปที่ 3.26 ผลของชนิดของสารละลายที่มีต่อปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ในรีดิฟอสฟอไรต์
หลังการกวนพ่นอากาศ (Farrow และคณะ, 1987)

3.2.7.4 การสกัดหรือการละลายแร่ด้วยสารละลายเคมี (Chemical Extraction)

กระบวนการสุดท้ายของ Becher Process เป็นการเลือกใช้น้ำยาเคมีที่เหมาะสมไปสกัดหรือชะละลายแร่ที่ผ่านการกวนพ่นอากาศแล้ว เพื่อนำเอาสิ่งที่เป็นมลทินที่เหลืออยู่ออก ซึ่งแร่ที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ ตั้งแต่การทำการออกซิเดชัน รีดักชัน และกวนพ่นอากาศแล้ว จะถูกสกัดด้วยสารเคมีได้ง่ายกว่า (รูปที่ 3.27) การสกัดด้วยสารเคมีจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมี การเตรียมผิวแร่ที่เหมาะสม ปริมาณสารเคมี สภาพของการทำละลาย และเวลา ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยามีหลายประเภท เช่น กรด ต่าง โซดาไนต์ โปรท เป็นต้น

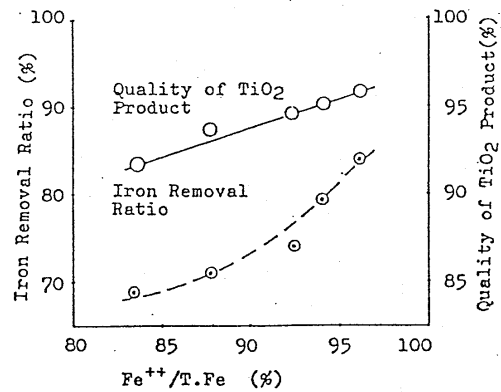
การสกัดหรือชะละลายด้วยสารเคมีจึงประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ การปรับแต่งคุณภาพแร่ การละลายเอาธาตุหรือสารประกอบออก การกรองคัดแยกสารละลาย การแยกธาตุหรือสารประกอบออกจากสารละลาย การทิ้งกากของเสีย การนำสารละลายกลับไปใช้ใหม่

Goto (2531) พบว่าในการสกัดด้วยสารเคมีเพื่อเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเม็ดแร่โอลิเมนไนต์ จะนำแร่ที่ผ่านขั้นตอนต่าง ๆ เบื้องต้นแล้วไปสกัดหรือชะละลายด้วยกรดเพื่อชะละลายเอาเหล็กออกไซด์และมลทินอื่น ๆ ออกจากเนื้อแร่ โดยไม่ละลายเอาไทเทเนียมไดออกไซด์ออกไป ทำให้สัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ละลายเหลืออยู่เพิ่มมากขึ้น

ทั้งนี้ สารประกอบจำพวก SiO_2 Al_2O_3 Cr_2O_3 จะไม่สามารถสกัดออกได้ รวมตลอดถึงธาตุบางจำพวก ได้แก่ Mg Ca Mn ซึ่งธาตุและสารประกอบเหล่านี้จะมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเหล็กออกไซด์ถูกสกัดออกไป

Mackey (1974) ทดลองใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวชะละลายที่อุณหภูมิ 105-125 °C เป็นเวลา 12-22 ชั่วโมง จะได้รู้ไทล์สังเคราะห์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 92.66% จากแร่โอลิเมนไนต์ดิบที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 59.30%

Kataoka และ Yamada (1972) ได้ทดลองโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวชะละลายที่ความเข้มข้นของกรด 265 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 130 °C เวลา 8 ชั่วโมง แล้วพบว่าถ้าค่าเฟอร์รัสไอออนที่เกิดจากการทำการรีดักชันของแร่มาก่อนสูง จะทำให้เหล็กถูกชะละลายได้มากขึ้น มีผลให้ผลผลิตมีไทเทเนียมไดออกไซด์สูงขึ้น

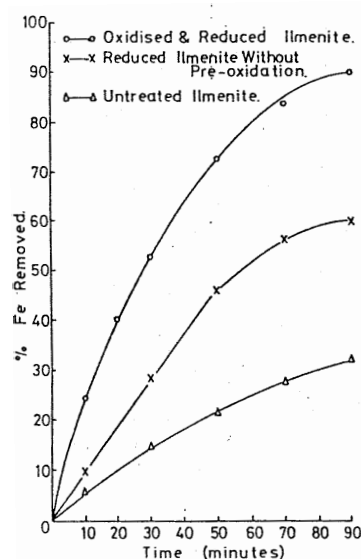


รูปที่ 3.27 ผลของอัตราการจัดักซันที่มีต่อการชะละลายแร่ (Kataoka และ Yamada, 1972)

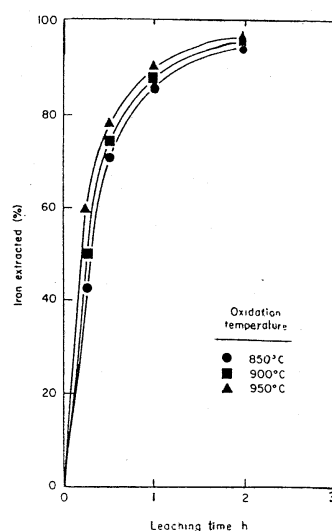
Sinha (1972, 1984) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการชะละลายระหว่างแร่โอลิเมนไนต์ธรรมชาติ แร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน-รีดักชัน และแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการรีดักชันอย่างเดียว ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 3.28 ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมของการออกซิเดชันและรีดักชันเท่ากับ 950 และ 850 °C ตามลำดับ จะเห็นว่าแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน-รีดักชันจะชะละลายเหล็กออกได้ดีกว่า เมื่อเวลาในการชะละลายเพิ่มขึ้นเหล็กจะถูกชะละลายออกได้มาก

จากรูปที่ 3.29 แสดงผลของอุณหภูมิในการออกซิเดชันที่มีผลต่ออัตราการชะละลาย โดยมีการรีดักชันที่อุณหภูมิ 800 °C ใช้ 15% HCl – 15% FeCl₂ เป็นตัวชะละลาย จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการออกซิเดชันมากขึ้นจะชะละลายเหล็กได้ดีขึ้น

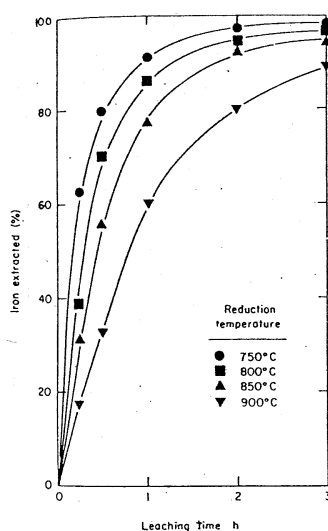
สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิในการรีดักชัน ดังรูปที่ 3.30 โดยมีอุณหภูมิการออกซิเดชันที่ 900 °C ใช้ 20% HCl เป็นตัวชะละลาย พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการรีดักชันเพิ่มขึ้นอัตราการชะละลายจะลดลง แต่ในทางอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยารีดักชันและอัตราการรีดักชันพบว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 750 °C จึงจะให้การรีดักชันได้ผลดี



รูปที่ 3.28 ผลของการออกซิเดชันและรีดักชันที่มีต่อการชะละลายโอลิเมนไนต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Sinha, 1984)



รูปที่ 3.29 ผลของอุณหภูมิในการออกซิเดชันที่มีต่ออัตราการชะละลาย (Sinha, 1984)



รูปที่ 3.30 ผลของอุณหภูมิในการรีดักชันที่มีต่ออัตราการชะละลาย (Sinha, 1984)

3.3 เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา

3.3.1 การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Melting)

3.3.1.1 หลักการของเทคโนโลยี

การให้ความร้อนและการหลอมโดยการเหนี่ยวนำเป็นการให้ความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การถ่ายเทพลังงานผ่านสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและเกิดความร้อนขึ้นในโลหะ โดยสามารถใช้กับกระบวนการให้ความร้อนลักษณะต่างๆในอุตสาหกรรมโลหะ ได้แก่ การให้ความร้อนโลหะทั้งชิ้น การให้ความร้อนเฉพาะผิวโลหะ และการหลอมโลหะ

การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำอาศัยหลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบๆ เป้าหลอมก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นโลหะเกิดจากการเสียดสีของโมเลกุลเนื่องจากความต้านทานสนามแม่เหล็กของชิ้นโลหะ (Reluctance) และเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวนจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในชิ้นโลหะ (Eddy Current)



รูปที่ 3.31 เตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)



รูปที่ 3.32 เป้าหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

3.3.1.2 ส่วนประกอบของเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ

การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดรอบเตาหลอมจะค่อย ๆ เหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวนและความร้อนแก่ชิ้นโลหะจนหลอมเหลว โดยเมื่อโลหะเริ่มหลอมเหลวแล้วสนามแม่เหล็กก็ยังทำให้เกิดการหมุนวนของน้ำโลหะภายในเตาหลอมทำให้เกิดการกระจายความร้อนภายในเตาอย่างทั่วถึง ส่วนประกอบของเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำประกอบไปด้วย

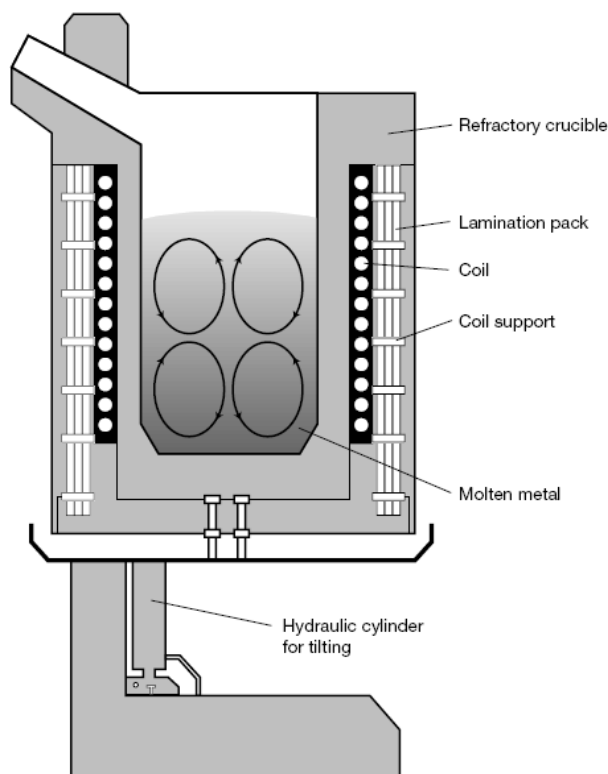
1) โครงสร้างของเตาหลอม (Furnace body)

การออกแบบโครงสร้างของเตาหลอมนั้นเปลี่ยนแปลงตามขนาดและการผลิต โครงสร้างของเตาหลอมขนาดเล็กส่วนใหญ่แล้วจะผลิตจากแผ่นฉนวนความแข็งแรงสูงและปิดหุ้มปิดท้ายด้วยวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ ในกรณีของเตาหลอมขนาดใหญ่ (ขนาดพิกัดการหลอมเกินกว่า 1 ตัน) โครงสร้างจะทำจากเหล็กแผ่นม้วนโดยอาจมีการติดตั้งคอยล์ไว้ภายในเฟรมเดียวกันเลยก็ได้

2) วัสดุภายในเตา (Refractory linings)

วัสดุไม่ติดไฟที่ใช้บุภายในเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำนั้นต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- สามารถทนทานต่ออุณหภูมิได้ตามอุณหภูมิใช้งานที่ต้องการ
- ทนทานต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในขณะหลอมโลหะ
- ทนทานต่อวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- แข็งแรงและทนทานต่อการกระแทกโดยไม่การทะลุ



รูปที่ 3.33 โครงสร้างของเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

3) ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil)

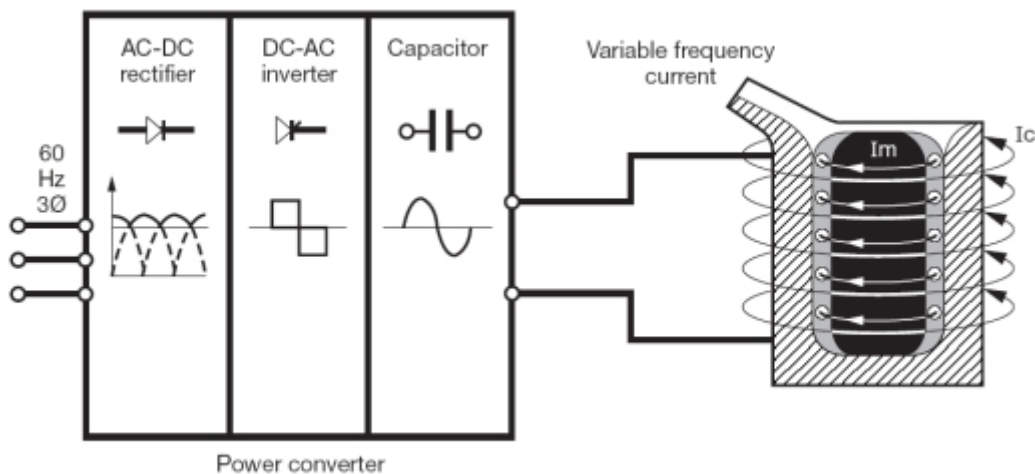
ทำด้วยลวดตัวนำไฟฟ้า เช่นทองแดง เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวมันจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในชิ้นงานโลหะเกิดเป็นพลังงานความร้อน และเนื่องจากกระแสที่ป้อนให้กับขดเหนี่ยวนำมักจะมีปริมาณที่สูงมาก จึงต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดเหนี่ยวนำเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ขดลวดเหนี่ยวนำ รูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำจะแตกต่างกันตามลักษณะของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน ส่วนในการหลอมโลหะจะติดตั้งขดลวดเหนี่ยวนำในลักษณะเดียวกันพันรอบเบ้าหลอม



รูปที่ 3.34 ขดลวดเหนี่ยวนำของเตาหลอม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

4) ส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)

ในส่วนนี้เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ที่ต้องการ เพื่อป้อนเข้ากับขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อให้ความร้อนหรือหลอมโลหะ



รูปที่ 3.35 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

3.3.2 เครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกวน (Sub-A Flotation Cell)

เครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกวน เริ่มนำมาใช้ในกระบวนการแต่งแร่ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1927 ตัวเครื่องเป็นถังทรงสี่เหลี่ยม ด้านบนเปิดกว้างเพื่อพาแร่ออก (รูปที่ 3.36) ประกอบด้วยใบพัดที่หมุนตลอดเวลา (รูปที่ 3.37) ในขณะเดียวกัน แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของใบพัดจะดูดอากาศผ่านทรงกระบอกที่หุ้มแกนเพลลาของใบพัด (รูปที่ 3.38) ด้านบนของแกนใบพัดต่อเข้ากับพูลี่ (Pulley) ซึ่งทำให้หมุนด้วยมอเตอร์และสายพาน สามารถปรับตั้งความเร็วรอบของการหมุนได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดแร่ ความถ่วงจำเพาะของแร่ %Solid ของแร่ และความสูงของส่วนผสมน้ำและแร่ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบขั้นต่ำของการกวนเพื่อให้ใบพัดสามารถดูดอากาศเข้าสู่ส่วนผสมแร่กับน้ำโดยอัตโนมัติตามสมการดังนี้

$$\rho ghA = \frac{mv^2}{r}$$

ย้ายข้างสมการได้
$$v = \sqrt{\frac{\rho ghAr}{m}}$$

ทั้งนี้
$$v = r\omega = \frac{rN2\pi}{60}$$

จะได้
$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{\rho ghA}{mr}}$$

โดย ρ = ความหนาแน่นรวม (ton/m³)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s²)

h = ความสูงของส่วนผสมน้ำและแร่ (m)

A = พื้นที่หน้าตัดของส่วนผสมน้ำและแร่ (m²)

m = มวลของส่วนผสมน้ำและแร่ (ton)

v = ความเร็วของเส้นรอบวงใบพัด (m/s)

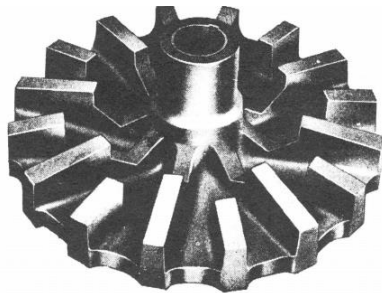
r = รัศมีของใบพัด (m)

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s หรือ s⁻¹)

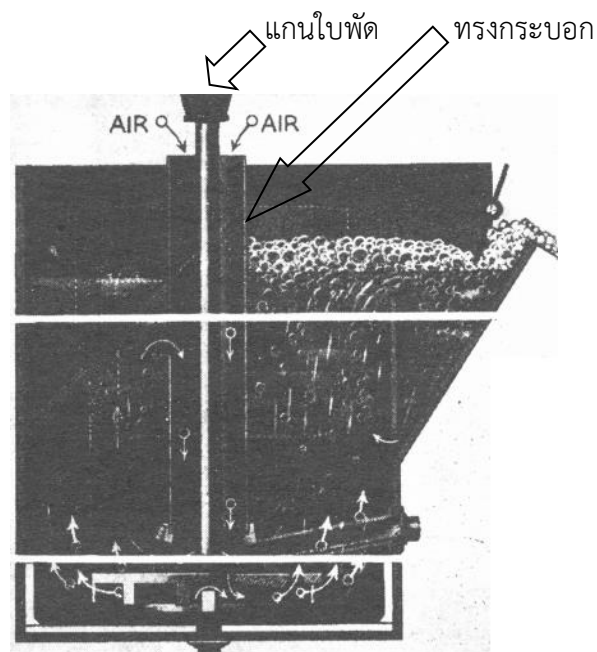
N = ความเร็วรอบ (rpm หรือ min⁻¹)



รูปที่ 3.36 แสดงเครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกวน



รูปที่ 3.37 แสดงลักษณะของใบพัดที่ใช้ขณะกวน และสร้างแรงหนีศูนย์กลางเพื่อดูดอากาศ
(กรมทรัพยากรธรณี, 2527)



รูปที่ 3.38 แสดงลักษณะและการทำงานของเครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกวน
(กรมทรัพยากรธรณี, 2527)

3.3.3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF)

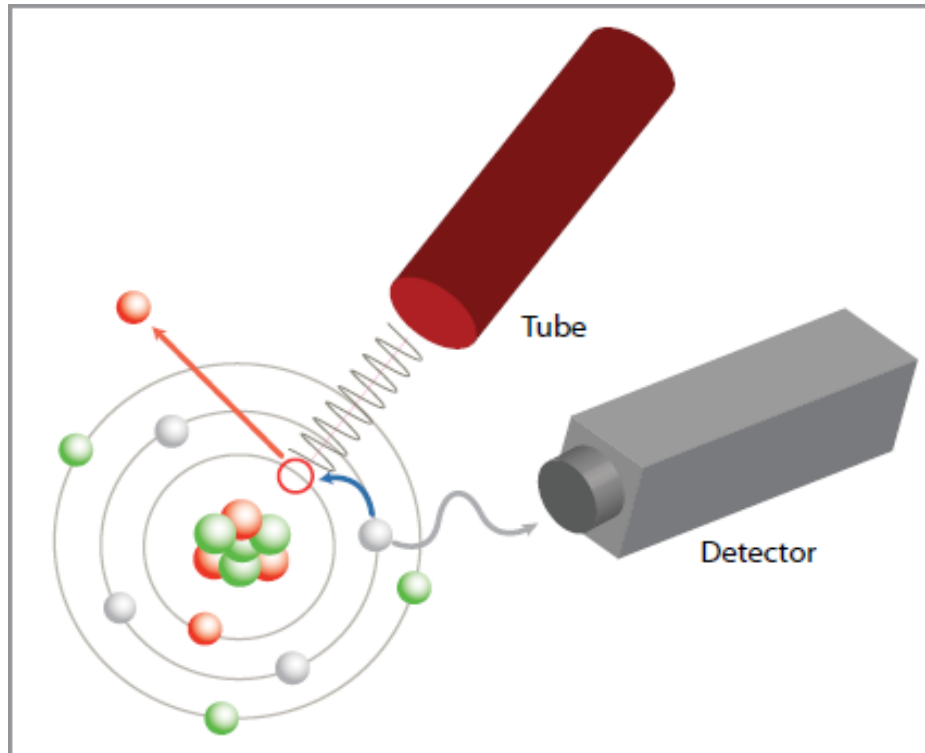
ในการศึกษานี้จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เกิดจากกระบวนการทดลองขั้นตอนต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) แบบพกพาของ OLYMPUS (รูปที่ 3.39) ซึ่งรังสีเอกซ์เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 10 ถึง 0.01 นาโนเมตร ตรงกับความถี่ในช่วง 30 ถึง 30,000 พิกัด เฮิร์ตซ์ (1015 เฮิร์ตซ์) ในเบื้องต้นมีการใช้รังสีเอกซ์สำหรับถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัยโรค และงานผลึกศาสตร์ รังสีเอกซ์เป็นการแผ่รังสีแบบแตกตัวเป็นไอออน และมีอันตรายต่อมนุษย์ โดยปกติการวิเคราะห์ธาตุจะเรียกรังสีเอกซ์ตามขนาดของพลังงาน เช่น รังสีเอกซ์ 10 KeV (Kiloelectron Volt) การวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแสงใช้วิเคราะห์ทั้งคุณภาพและปริมาณ (Qualitative and Quantitative Analysis)

ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์ สมัยปัจจุบัน อธิบายถึงการเกิด รังสีเอกซ์ว่า ธาตุประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก ในอะตอมแต่ละตัวมีนิวเคลียสเป็นใจกลาง และมีอิเล็กตรอนวิ่งวนเป็นชั้นๆ ธาตุเบาจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่น้อยชั้น และธาตุหนักจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่หลายชั้น เมื่ออะตอมธาตุถูกยิงด้วยกระแสอิเล็กตรอน จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในถูกชนกระเด็นออกมาวิ่งวนอยู่รอบนอกซึ่งมีภาวะไม่เสถียรและจะหลุดตกไปวิ่งวนอยู่ชั้นในอีก พร้อมกับปล่อยพลังงานออกในรูปรังสี (Photons หรือ Photoelectron) ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) หรือ รังสีเอกซ์เรือง (Fluorescence X-Ray) แล้วแต่ชนิดของธาตุ เมื่อทำการวัดรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดรังสี (Detector) ดังรูปที่ 3.40 ความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองแสงของธาตุที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของธาตุนั้นในตัวอย่าง

สำหรับเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) แบบพกพาของ OLYMPUS ไม่สามารถจำแนกธาตุได้ชัดเจนสำหรับธาตุที่มีมวลอะตอมต่ำกว่า 18 ยกเว้นธาตุ 6 ชนิด ได้แก่ Mg Al Si P S Cl ที่มีปริมาณเพียงพอตามที่แสดงในรูปที่ 3.41 ทำให้ผลวิเคราะห์ XRF อาจแสดงค่า Light Element (LE) รวมของธาตุที่มีมวลอะตอมต่ำกว่า 18 ดังกล่าวได้

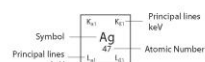


รูปที่ 3.39 ส่วนประกอบตัวเครื่อง XRF แบบพกพาของ OLYMPUS



รูปที่ 3.40 หลักการทำงานของเครื่อง XRF

Low-Density Sample Types - (soils, powders, liquids)																		He 2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
H 1		IIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
0.05	0.11																	0.18	0.28	0.39	0.52	0.68	0.85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Li 3	Be 4																	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
1.04	1.07	1.23	1.3															1.49	1.51	1.74	1.84	2.01	2.14	2.31	2.48	2.62	2.83	2.96	3.19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Na 11	Mg 12																	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
3.31	3.58	3.69	4.01	4.09	4.48	4.51	4.93	4.95	5.43	5.41	5.95	5.9	6.49	6.4	7.06	6.93	7.65	7.48	8.25	8.05	8.91	8.94	9.57	9.25	10.26	9.89	10.98	10.54	11.73	11.22	12.5	11.92	13.28	12.65	14.11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
K 19	Ca 20	24	21	Sc 21	22	Ti 22	23	V 23	24	Cr 24	25	Mn 25	26	Fe 26	27	Co 27	28	Ni 28	29	Cu 29	30	Zn 30	31	Ga 31	32	Ge 32	33	As 33	34	Se 34	35	Br 35	36	Kr 36	37	Se 37	38	Br 38	39	Kr 39	40	Xe 40	41	Kr 41	42	Xe 42																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1.69	1.75	1.91	1.93	1.92	2	2.04	2.12	2.17	2.26	2.29	2.39	2.42	2.55	2.56	2.85	2.83	2.84	2.99	2.98	3.15	3.13	3.32	3.29	3.49	3.44	3.66	3.6	3.94	3.77	4.03	3.96	4.22	4.11	4.42	4.35	4.64	4.5	Xe 45	46	Xe 46	47	Xe 47	48	Xe 48	49	Xe 49	50	Xe 50	51	Xe 51	52	Xe 52	53	Xe 53	54	Xe 54	55	Xe 55	56	Xe 56	57	Xe 57	58	Xe 58	59	Xe 59	60	Xe 60	61	Xe 61	62	Xe 62	63	Xe 63	64	Xe 64	65	Xe 65	66	Xe 66	67	Xe 67	68	Xe 68	69	Xe 69	70	Xe 70	71	Xe 71	72	Xe 72	73	Xe 73	74	Xe 74	75	Xe 75	76	Xe 76	77	Xe 77	78	Xe 78	79	Xe 79	80	Xe 80	81	Xe 81	82	Xe 82	83	Xe 83	84	Xe 84	85	Xe 85	86	Xe 86	87	Xe 87	88	Xe 88	89	Xe 89	90	Xe 90	91	Xe 91	92	Xe 92	93	Xe 93	94	Xe 94	95	Xe 95	96	Xe 96	97	Xe 97	98	Xe 98	99	Xe 99	100	Xe 100	101	Xe 101	102	Xe 102	103	Xe 103	104	Xe 104	105	Xe 105	106	Xe 106	107	Xe 107	108	Xe 108	109	Xe 109	110	Xe 110	111	Xe 111	112	Xe 112	113	Xe 113	114	Xe 114	115	Xe 115	116	Xe 116	117	Xe 117	118	Xe 118	119	Xe 119	120	Xe 120	121	Xe 121	122	Xe 122	123	Xe 123	124	Xe 124	125	Xe 125	126	Xe 126	127	Xe 127	128	Xe 128	129	Xe 129	130	Xe 130	131	Xe 131	132	Xe 132	133	Xe 133	134	Xe 134	135	Xe 135	136	Xe 136	137	Xe 137	138	Xe 138	139	Xe 139	140	Xe 140	141	Xe 141	142	Xe 142	143	Xe 143	144	Xe 144	145	Xe 145	146	Xe 146	147	Xe 147	148	Xe 148	149	Xe 149	150	Xe 150	151	Xe 151	152	Xe 152	153	Xe 153	154	Xe 154	155	Xe 155	156	Xe 156	157	Xe 157	158	Xe 158	159	Xe 159	160	Xe 160	161	Xe 161	162	Xe 162	163	Xe 163	164	Xe 164	165	Xe 165	166	Xe 166	167	Xe 167	168	Xe 168	169	Xe 169	170	Xe 170	171	Xe 171	172	Xe 172	173	Xe 173	174	Xe 174	175	Xe 175	176	Xe 176	177	Xe 177	178	Xe 178	179	Xe 179	180	Xe 180	181	Xe 181	182	Xe 182	183	Xe 183	184	Xe 184	185	Xe 185	186	Xe 186	187	Xe 187	188	Xe 188	189	Xe 189	190	Xe 190	191	Xe 191	192	Xe 192	193	Xe 193	194	Xe 194	195	Xe 195	196	Xe 196	197	Xe 197	198	Xe 198	199	Xe 199	200	Xe 200	201	Xe 201	202	Xe 202	203	Xe 203	204	Xe 204	205	Xe 205	206	Xe 206	207	Xe 207	208	Xe 208	209	Xe 209	210	Xe 210	211	Xe 211	212	Xe 212	213	Xe 213	214	Xe 214	215	Xe 215	216	Xe 216	217	Xe 217	218	Xe 218	219	Xe 219	220	Xe 220	221	Xe 221	222	Xe 222	223	Xe 223	224	Xe 224	225	Xe 225	226	Xe 226	227	Xe 227	228	Xe 228	229	Xe 229	230	Xe 230	231	Xe 231	232	Xe 232	233	Xe 233	234	Xe 234	235	Xe 235	236	Xe 236	237	Xe 237	238	Xe 238	239	Xe 239	240	Xe 240	241	Xe 241	242	Xe 242	243	Xe 243	244	Xe 244	245	Xe 245	246	Xe 246	247	Xe 247	248	Xe 248	249	Xe 249	250	Xe 250	251	Xe 251	252	Xe 252	253	Xe 253	254	Xe 254	255	Xe 255	256	Xe 256	257	Xe 257	258	Xe 258	259	Xe 259	260	Xe 260	261	Xe 261	262	Xe 262	263	Xe 263	264	Xe 264	265	Xe 265	266	Xe 266	267	Xe 267	268	Xe 268	269	Xe 269	270	Xe 270	271	Xe 271	272	Xe 272	273	Xe 273	274	Xe 274	275	Xe 275	276	Xe 276	277	Xe 277	278	Xe 278	279	Xe 279	280	Xe 280	281	Xe 281	282	Xe 282	283	Xe 283	284	Xe 284	285	Xe 285	286	Xe 286	287	Xe 287	288	Xe 288	289	Xe 289	290	Xe 290	291	Xe 291	292	Xe 292	293	Xe 293	294	Xe 294	295	Xe 295	296	Xe 296	297	Xe 297	298	Xe 298	299	Xe 299	300	Xe 300	301	Xe 301	302	Xe 302	303	Xe 303	304	Xe 304	305	Xe 305	306	Xe 306	307	Xe 307	308	Xe 308	309	Xe 309	310	Xe 310	311	Xe 311	312	Xe 312	313	Xe 313	314	Xe 314	315	Xe 315	316	Xe 316	317	Xe 317	318	Xe 318	319	Xe 319	320	Xe 320	321	Xe 321	322	Xe 322	323	Xe 323	324	Xe 324	325	Xe 325	326	Xe 326	327	Xe 327	328	Xe 328	329	Xe 329	330	Xe 330	331	Xe 331	332	Xe 332	333	Xe 333	334	Xe 334	335	Xe 335	336	Xe 336	337	Xe 337	338	Xe 338	339	Xe 339	340	Xe 340	341	Xe 341	342	Xe 342	343	Xe 343	344	Xe 344	345	Xe 345	346	Xe 346	347	Xe 347	348	Xe 348	349	Xe 349	350	Xe 350	351	Xe 351	352	Xe 352	353	Xe 353	354	Xe 354	355	Xe 355	356	Xe 356	357	Xe 357	358	Xe 358	359	Xe 359	360	Xe 360	361	Xe 361	362	Xe 362	363	Xe 363	364	Xe 364	365	Xe 365	366	Xe 366	367	Xe 367	368	Xe 368	369	Xe 369	370	Xe 370	371	Xe 371	372	Xe 372	373	Xe 373	374	Xe 374	375	Xe 375	376	Xe 376	377	Xe 377	378	Xe 378	379	Xe 379	380	Xe 380	381	Xe 381	382	Xe 382	383	Xe 383	384	Xe 384	385	Xe 385	386	Xe 386	387	Xe 387	388	Xe 388	389	Xe 389	390	Xe 390	391	Xe 391	392	Xe 392	393	Xe 393	394	Xe 394	395	Xe 395	396	Xe 396	397	Xe 397	398	Xe 398	399	Xe 399	400	Xe 400	401	Xe 401	402	Xe 402	403	Xe 403	404	Xe 404	405	Xe 405	406	Xe 406	407	Xe 407	408	Xe 408	409	Xe 409	410	Xe 410	411	Xe 411	412	Xe 412	413	Xe 413	414	Xe 414	415	Xe 415	416	Xe 416	417	Xe 417	418	Xe 418	419	Xe 419	420	Xe 420	421	Xe 421	422	Xe 422	423	Xe 423	424	Xe 424	425	Xe 425	426	Xe 426	427	Xe 427	428	Xe 428	429	Xe 429	430	Xe 430	431	Xe 431	432	Xe 432	433	Xe 433	434	Xe 434	435	Xe 435	436	Xe 436	437	Xe 437	438	Xe 438	439	Xe 439	440	Xe 440	441	Xe 441	442	Xe 442	443	Xe 443	444	Xe 444	445	Xe 445	446	Xe 446	447	Xe 447	448	Xe 448	449	Xe 449	450	Xe 450	451	Xe 451	452	Xe 452	453	Xe 453	454	Xe 454	455	Xe 455	456	Xe 456	457	Xe 457	458	Xe 458	459	Xe 459	460	Xe 460	461	Xe 461	462	Xe 462	463	Xe 463	464	Xe 464	465	Xe 465	466	Xe 466	467	Xe 467	468	Xe 468	469	Xe 469	470	Xe 470	471	Xe 471	472	Xe 472	473	Xe 473	474	Xe 474	475	Xe 475	476	Xe 476	477	Xe 477	478	Xe 478	479	Xe 479	480	Xe 480	481	Xe 481	482	Xe 482	483	Xe 483	484	Xe 484	485	Xe 485	486	Xe 486	487	Xe 487	488	Xe 488	489	Xe 489	490	Xe 490	491	Xe 491	492	Xe 492	493	Xe 493	494	Xe 494	495	Xe 495	496	Xe 496	497	Xe 497	498	Xe 498	499	Xe 499	500	Xe 500	501	Xe 501	502	Xe 502	503	Xe 503	504	Xe 504	505	Xe 505	506	Xe 506	507	Xe 507	508	Xe 508	509	Xe 509	510	Xe 510	511	Xe 511	512	Xe 512	513	Xe 513	514	Xe 514	515	Xe 515	516	Xe 516	517	Xe 517	518	Xe 518	519	Xe 519	520	Xe 520	521	Xe 521	522	Xe 522	523	Xe 523	524	Xe 524	525	Xe 525	526	Xe 526	527	Xe 527	528	Xe 528	529	Xe 529	530	Xe 530	531	Xe 531	532	Xe 532	533	Xe 533	534	Xe 534	535	Xe 535	536	Xe 536	537	Xe 537	538	Xe 538	539	Xe 539	540	Xe 540	541	Xe 541	542	Xe 542	543	Xe 543	544	Xe 544	545	Xe 545	546	Xe 546	547	Xe 547	548	Xe 548	549	Xe 549	550	Xe 550	551	Xe 551	552	Xe 552	553	Xe 553	554	Xe 554	555	Xe 555	556	Xe 556	557	Xe 557	558	Xe 558	559	Xe 559	560	Xe 560	561	Xe 561	562	Xe 562	563	Xe 563	564	Xe 564	565	Xe 565	566	Xe 566	567	Xe 567	568	Xe 568	569	Xe 569	570	Xe 570	571	Xe 571	572	Xe 572	573	Xe 573	574	Xe 574	575	Xe 575	576	Xe 576	577	Xe 577	578	Xe 578	579	Xe 579	580	Xe 580	581	Xe 581	582	Xe 582	583	Xe 583	584	Xe 584	585	Xe 585	586	Xe 586	587	Xe 587	588	Xe 588	589	Xe 589	590	Xe 590	591	Xe 591	592	Xe 592	593	Xe 593	594	Xe 594	595	Xe 595	596	Xe 596	597	Xe 597	598	Xe 598	599	Xe 599	600	Xe 600	601	Xe 601	602	Xe 602	603	Xe 603	604	Xe 604	605	Xe 605	606	Xe 606	607	Xe 607	608	Xe 608	609	Xe 609	610	Xe 610	611	Xe 611	612	Xe 612	613	Xe 613	614	Xe 614	615	Xe 615	616	Xe 616	617	Xe 617	618	Xe 618	619	Xe 619	620	Xe 620	621	Xe 621	622	Xe 622	623	Xe 623	624	Xe 624	625	Xe 625	626	Xe 626	627	Xe 627	628	Xe 628	629	Xe 629	630	Xe 630	631	Xe 631	632	Xe 632	633	Xe 633	634	Xe 634	635	Xe 635	636	Xe 636	637	Xe 637	638	Xe 638	639	Xe 639	640	Xe 640	641	Xe 641	642	Xe 642	643	Xe 643	644	Xe 644	645	Xe 645	646	Xe 646	647	Xe 647	648	Xe 648	649	Xe 649	650	Xe 650	651	Xe 651	652	Xe 652	653	Xe 653



รูปที่ 3.41 แสดง Limits of Detection ของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) แบบพกพาของ OLYMPUS

3.3.4 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer, XRD)

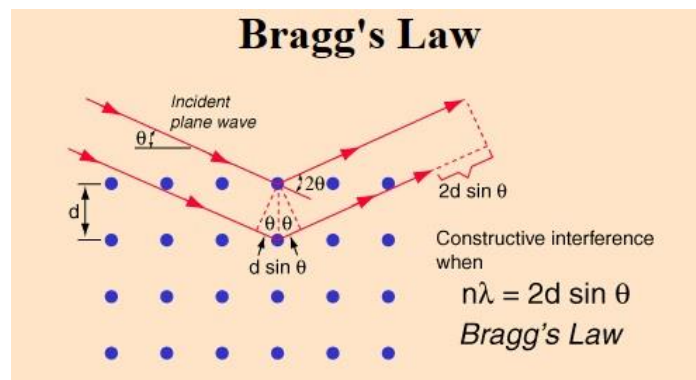
โดยปกติหน้าผิวของแร่มีลักษณะเป็นระนาบ (Plane) ซึ่งมีขนาดเล็กและขนานกันเป็นจำนวนมาก ระยะห่างระหว่างระนาบ (D-Spacing) ของแต่ละหน้าผิวจะมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละชนิดแร่ เมื่อรังสีเอกซ์ปฐมภูมิชนิดต่าง ๆ จากหลอดรังสีเอกซ์มากระทบกับระนาบของผลึกแร่ จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีตามสมการด้านล่าง (รูปที่ 3.42) ทำให้สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยแสดงผลออกมาเป็นความเข้มของการนับ (Count) หรือยอด (Peak) การแปลค่าความหมายของความเข้มของการนับมุม 2θ และระยะห่างระหว่างระนาบ สามารถกระทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าดังกล่าวจาก Standard หรือข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งเปรียบเทียบกันจนจำแนกชนิดแร่ที่นำมาวิเคราะห์ได้ ทั้งนี้ ในการศึกษาจะใช้เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer) แบบพกพาของ OLYMPUS (รูปที่ 3.43)

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

โดย λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ

d = ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ = มุมที่เกิดจากการเลี้ยวเบน



รูปที่ 3.42 แสดงหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 3.43 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer) แบบพกพาของ OLYMPUS

บทที่ 4

การดำเนินการศึกษา

ในการศึกษานี้จะดำเนินการตามแผนผังในรูปที่ 4.1 โดยเริ่มตั้งแต่นำแร่หนัก (ทั้ง) จากกระบวนการแต่งแร่ทรายแก้วด้วยไฮโดรไซโคลนและ Reichert Spiral ของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด (รูปที่ 4.2) มาทำการศึกษาตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

4.1 การเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่หนัก (โดยใช้ Reichert Spiral และแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด Induced Roll)

4.2 การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา

4.2.1 การออกซิเดชัน

4.2.2 การรีดักชัน

4.2.3 การกวนพ่นอากาศ

4.2.4 การสกัดด้วยสารเคมี

4.1 การเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่หนัก

วัตถุประสงค์การทดลองเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่หนักโดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพของแร่ และวิธีการที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และต้นทุนต่ำ

4.1.1 วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างแร่จากทั้งสองแหล่งจำนวนแหล่งละ 300 กิโลกรัม (รูปที่ 4.3) มาผ่าน Reichert Spiral ขนาด 1 ราง (รูปที่ 4.4)

2. เก็บหัวแร่หนักที่ผ่านรางสไปรอลแล้ว โดยตั้งตัวแบ่งรางให้อยู่ระหว่าง 30% ของแร่ทั้งหมด (รูปที่ 4.5) ทั้งนี้ ต้องมีการควบคุมให้แร่บนรางสไปรอลกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.6)

3. นำหัวแร่ที่เก็บได้ครั้งที่ 1 มาผ่านสไปรอลและเก็บหัวแร่ ทำให้แห้งและชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 4.7)

4. ดำเนินการตามข้อ 3 ซ้ำจนครบ 5 ครั้ง แล้วเก็บตัวอย่างหัวแร่หนักเข้มข้นไปทดลองในขั้นตอนถัดไป

5. ชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ผล XRF หัวแร่เข้มข้นที่ได้

6. ชักตัวอย่างหัวแร่เข้มข้นที่ได้จากแต่ละแหล่งจำนวน 1 กิโลกรัม มาแต่งด้วยเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Induced Roll) (รูปที่ 4.8) โดยปรับกำลังแม่เหล็กที่ 1 แอมแปร์ รอบการหมุนของ Roll ประมาณ 60 รอบต่อนาที ชั่งน้ำหนักแร่ที่ติดแม่เหล็กและไม่ติดแม่เหล็ก

4.1.2 ผลการทดลอง

1. การเปรียบเทียบลักษณะของแร่หนัก (ทั้ง) และแร่หนัก (ทั้ง) หลังผ่าน Reichert Spiral 5 ครั้ง ของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด แสดงในรูปที่ 4.9

2. น้ำหนักและผลวิเคราะห์ XRF หัวแร่เข้มข้นหลังจากผ่าน Reichert Spiral แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ (รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก)

3. หัวแร่หนักเข้มข้นที่ผ่านเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Induced Roll) (รูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ) นำมาชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ผล XRF ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ (รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก)

ตัวอย่างแร่หนักที่ได้จาก
บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด

ขั้นตอนที่ 1: การเพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่หนัก

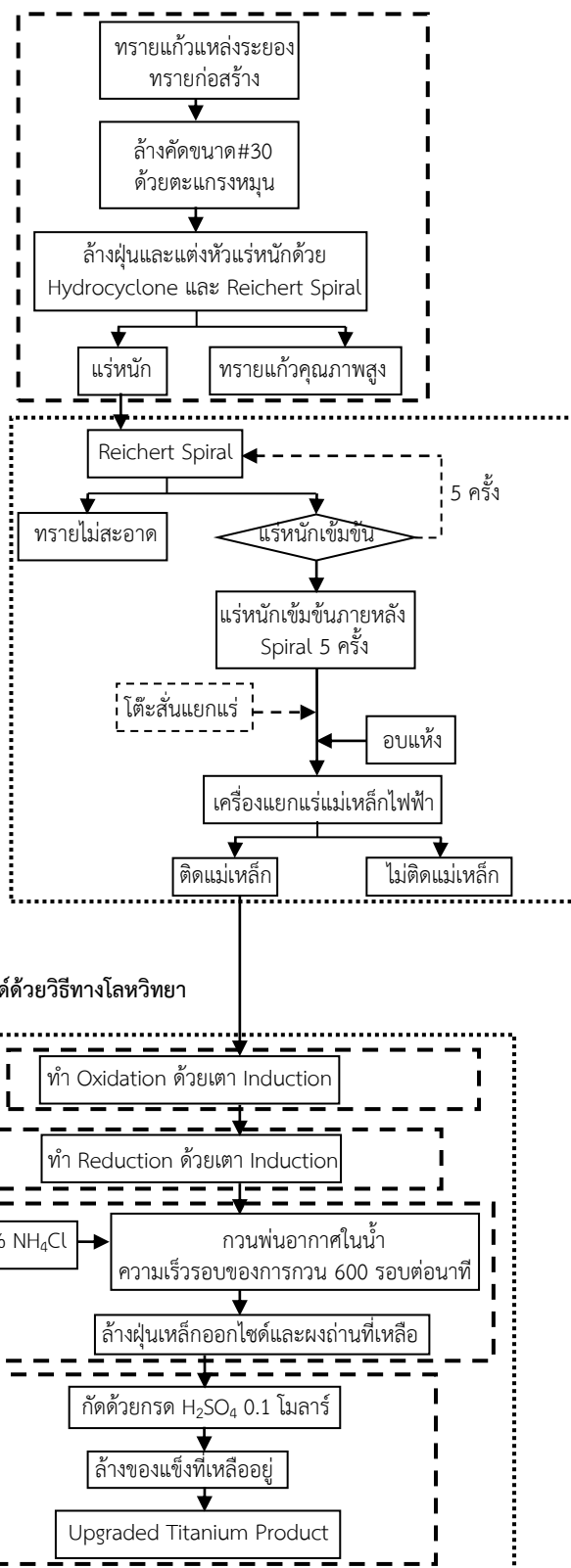
ขั้นตอนที่ 2: การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา

ขั้นตอนที่ 2.1: การออกซิเดชัน

ขั้นตอนที่ 2.2: การรีดักชัน

ขั้นตอนที่ 2.3: การกวนพ่นอากาศ

ขั้นตอนที่ 2.4: การสกัดด้วยสารเคมี



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ในแร่ซิลิเกตที่ได้จากกระบวนการผลิตทรายแก้ว



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 แร่หนักจากกระบวนการแต่งแร่ทรายแก้วด้วยไฮโดรไซโคลนและ Reichert Spiral ของ
(ก) บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และ (ข) บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด



รูปที่ 4.3 แสดงกองหัวแร่หนัก (ทิ้ง) ที่ใช้ในการศึกษานี้



รูปที่ 4.4 Reichert Spiral ที่ใช้ในการศึกษานี้



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการปรับช่องแบ่งเก็บหัวแร้น้ำกับทรายในอัตราส่วน 30:70



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของแร่บนราง Reichert Spiral



รูปที่ 4.7 แสดงวิธีการเก็บหัวแร่หนักเพื่อใช้เป็นแร่ป้อนในครั้งต่อไป



รูปที่ 4.8 แสดงการแยกแบริลเมไนด์จากหัวแหร่นักด้วยเครื่องแยกแรมแม่เหล็กไฟฟ้า (Induced Roll)



ก) แหร่นัก (ทั้ง) ของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด ก่อนแต่ง



ข) แหร่นัก (ทั้ง) ของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด หลังแต่งด้วย Reichert Spiral 5 ครั้ง

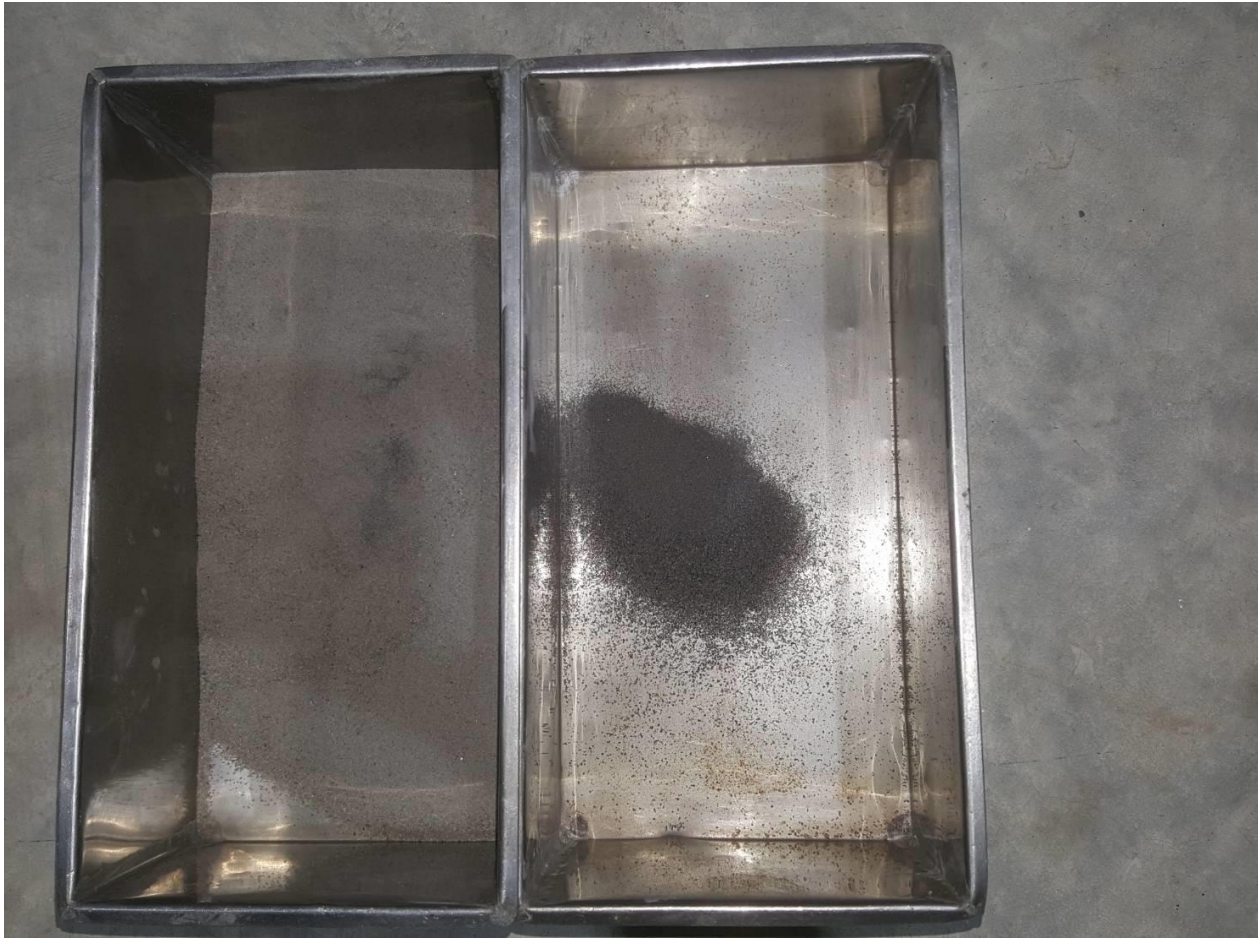


ค) แหร่นัก (ทั้ง) ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ก่อนแต่ง

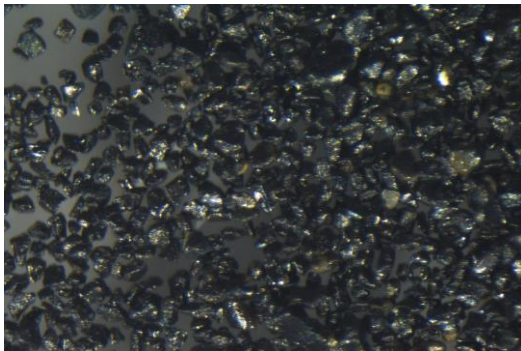


ง) แหร่นัก (ทั้ง) ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด หลังแต่งด้วย Reichert Spiral 5 ครั้ง

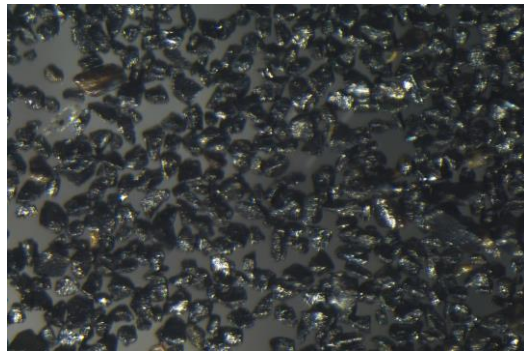
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแหร่นัก (ทั้ง) และแหร่นัก (ทั้ง) หลังผ่าน Reichert Spiral 5 ครั้ง ของ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด



รูปที่ 4.10 แสดงแร่หลังผ่านเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Induced Roll)
(ซ้าย) ทรายสกปรก (ขวา) แร่อิลเมนไนต์



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายเม็ดแร่อิลเมนไนต์หลังผ่านเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Induced Roll)
(ก) บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (ข) บริษัทธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักของหัวแร่หนักเข้มข้นที่ผ่าน Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้ง

แหล่งที่มาของแร่	น้ำหนักของหัวแร่หลังผ่าน Reichert Spiral (กิโลกรัม)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด	132	70	40	22	14
บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด	145	75	42	23	15

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์หัวแร่หนักเข้มข้นที่ผ่าน Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้ง

แหล่ง	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	CaO	MnO
บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด	63.70%	2.99%	6.01%	6.50%	1.00%	0.10%	-	-	0.26%	0.03%
บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด	63.30%	15.50%	12.70%	3.08%	1.96%	595ppm	0.26%	0.12%	660ppm	0.11%

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักของแร่หลังผ่านการแต่งด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

แหล่งที่มาของแร่	แร่ป้อน		แร่ติดแม่เหล็ก (อิลเมนไนต์)		แร่ไม่ติดแม่เหล็ก	
	น้ำหนัก (กรัม)	%	น้ำหนัก (กรัม)	%	น้ำหนัก (กรัม)	%
บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด	1,000	100	12.2	1.2	987.8	98.8
บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด	1,000	100	45.8	4.6	954.2	95.4

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์หัวแร่อิลเมนไนต์ที่ผ่านการแต่งด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

แหล่ง	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO
บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด	1.23%	59.70%	33.50%	1.47%	0.11%	3.18%
บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด	0.77%	60.10%	33.90%	1.29%	919ppm	3.11%

4.2 การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา

กระบวนการผลิตทรายแก้วที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตทรายก่อสร้าง (เช่น บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด) มีอยู่เป็นจำนวนน้อยและต้องเป็นแหล่งที่มีคุณสมบัติเฉพาะ ในขณะที่กระบวนการผลิตทรายแก้วจากแหล่งธรรมชาติโดยเฉพาะแหล่งจังหวัดระยอง (เช่น บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด) มีอยู่เป็นจำนวนมาก และเป็นแหล่งผลิตวัตถุดิบทรายแก้วหลักเพื่อป้อนอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทำให้หัวแร่หนักจากกระบวนการทรายแก้วดังกล่าวมีปริมาณมากและสม่ำเสมอ จึงมีความประสงค์จะนำหัวแร่อิลเมนไนต์เฉพาะที่ได้จากบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด มาทำการศึกษาเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 การออกซิเดชัน

เทียนไชย (2533) ทำการศึกษาการทำออกซิเดชันเพื่อการเตรียมแร่ก่อนการทำรีดักชัน พบว่า เฟสที่เหมาะสมของแร่ก่อนการทำรีดักชัน คือเฟส Rutile (TiO_2) และ Pseudobrookite (Fe_2TiO_5) ซึ่งจะเกิดหลังจากการทำออกซิเดชัน สมบูรณ์ที่ $1,000^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งในการศึกษานี้ จะใช้เตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) ในเบ้าแกรไฟต์ (Graphite) เป็นเครื่องมือหลักในการทดลอง และใช้สภาวะการทดลองตามกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Becher Process)

วัตถุประสงค์การทดลองเพื่อศึกษาแนวทางการเปลี่ยนแปลงเฟสอิลเมไนต์ให้เป็นเฟสที่เหมาะสมต่อการทำรีดักชันในขั้นตอนต่อไป

4.2.1.1 วิธีการทดลอง

1. ตรวจสอบองค์ประกอบในหัวแร่อิลเมไนต์ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ด้วยเครื่อง XRD แบบพกพาของ OLUMPUS
2. นำแร่ที่ตรวจสอบองค์ประกอบตามข้อ 1 แล้ว ไปศึกษาการเผาด้วยเตา induction ในเบ้าหลอมแกรไฟต์ขนาด 1 กิโลกรัม ของบริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด (รูปที่ 4.12)
3. ชั่งน้ำหนักหัวแร่อิลเมไนต์ 100 กรัม ใส่ลงในเบ้า
4. เปิดเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ ให้ความร้อนแก่แร่ในเบ้า วัดอุณหภูมิด้วย Thermocouple
5. เร่งอุณหภูมิให้ขึ้นถึง $1,150^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของการทำออกซิเดชัน และให้คงอุณหภูมิไว้ที่ 30 และ 60 นาที (รูปที่ 4.13)
6. วิเคราะห์ผลที่ได้ด้วย XRF และ XRD



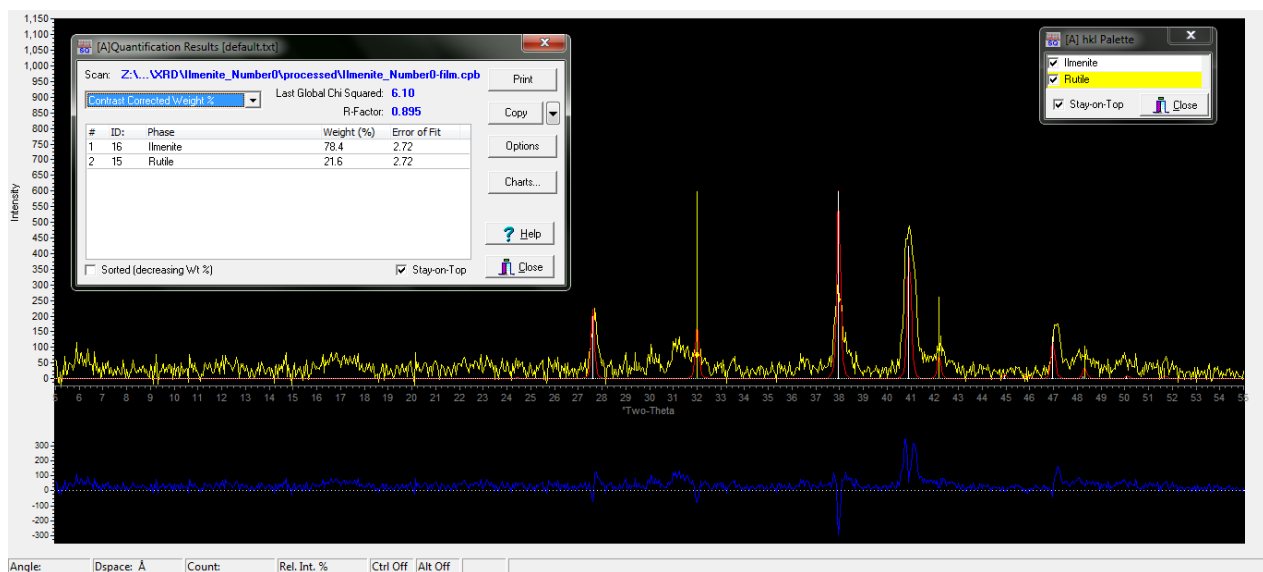
รูปที่ 4.12 แสดงสถานที่ทดลอง ณ บริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด



รูปที่ 4.13 แร่โอลิเมนไนต์ขณะเร่งอุณหภูมิเผาออกซิเดชันประมาณ 800 °C

4.2.1.2 ผลการทดลอง

1. ผลวิเคราะห์หัวแร่โอลิเมนไนต์ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ก่อนทำการเผา (รูปที่ 4.14)
2. ลักษณะกายภาพของตัวอย่างหัวแร่โอลิเมนไนต์หลังเผา (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน มีลักษณะเป็นผงละเอียดเช่นเดียวกับหัวแร่โอลิเมนไนต์ก่อนเผา โดยมีสีออกเทามากขึ้น (รูปที่ 4.15)
3. ผลวิเคราะห์ XRF ของการเผาหัวแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลาต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.16 (รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก)
4. ผลวิเคราะห์ XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่ 1,150 °C ที่เวลา 30 และ 60 นาที แสดงในรูปที่ 4.17 – 4.18 ตามลำดับ



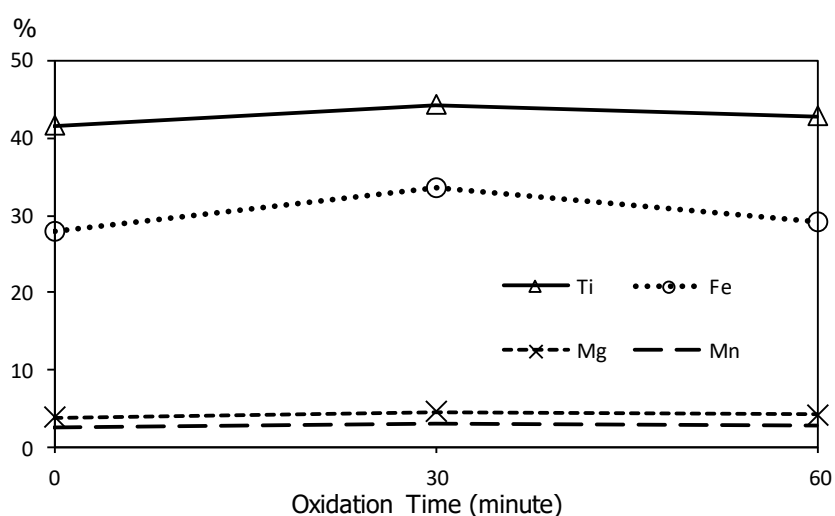
รูปที่ 4.14 แสดงผลวิเคราะห์หัวแร่โอลิเมนไนต์ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด
ด้วยเครื่อง XRD แบบพกพาของ OLUMPUS



รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างหัวแร่โอลิเมนไนด์หลังเผา (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดผลการเผาหัวแร่โอลิเมนไนด์ (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลาต่าง ๆ

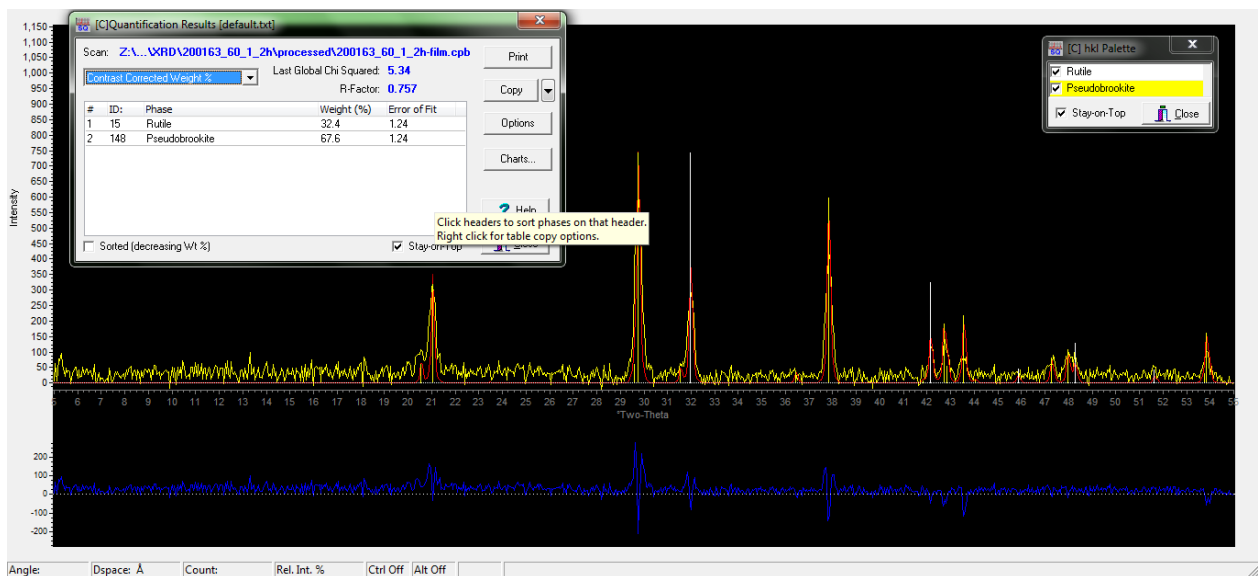
Oxidation Time (minute)	Ti (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)	Light Element (%)
0	41.63	27.89	3.84	2.61	20.46
30	44.32	33.49	4.49	3.11	10.81
60	42.84	29.10	4.12	2.64	18.53



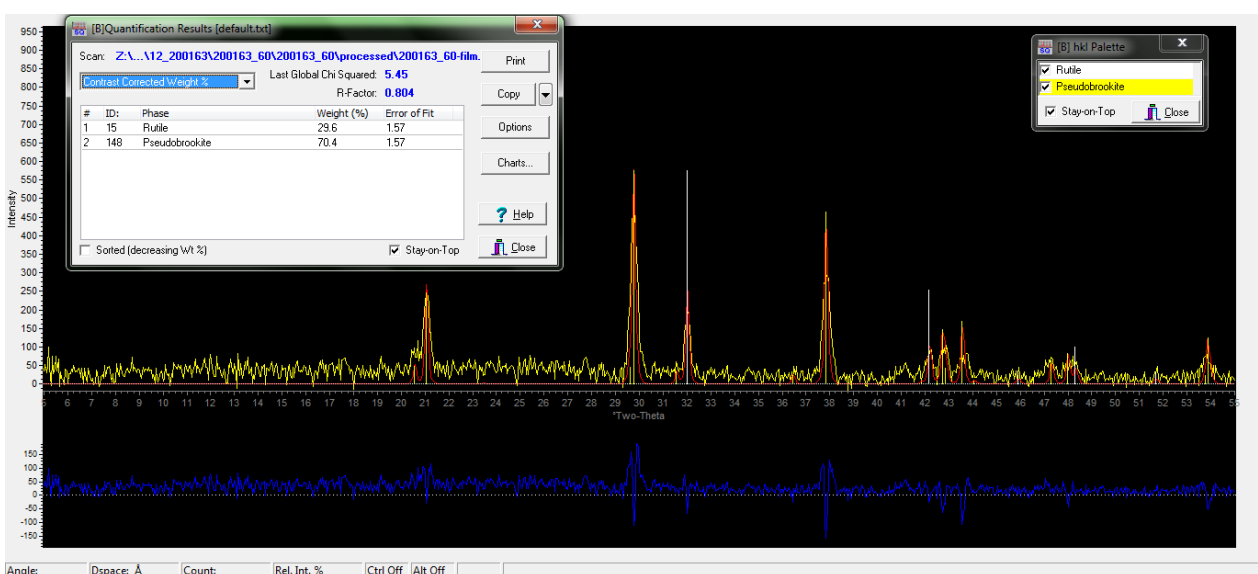
รูปที่ 4.16 แสดงผลการเผาหัวแร่โอลิเมนไนด์ (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่เวลาต่าง ๆ

ผลการศึกษาการเผาหัวแร่โอลิเมนไนด์ (ออกซิเดชัน) เพื่อเตรียมแร่สู่กระบวนการรีดักชัน ที่อุณหภูมิ 1,150 °C พบว่าเฟสของแร่เปลี่ยนจากรูไทล์และโอลิเมนไนด์ไปเป็นรูไทล์และซูโดบรูคไคต์ทั้งหมด ภายหลังจากอุณหภูมิตั้งแต่ 30 นาที เป็นต้นไป ซึ่งเทียนไชย (2533) กล่าวว่า Ferrous Oxide (FeO) ที่เป็นปัญหาต่อการทำรีดักชันจะลดลงอย่างมากและเปลี่ยนเป็น Ferric Oxide (Fe₂O₃) ของซูโดบรูคไคต์ สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทำออกซิเดชัน คือ การเปลี่ยนเฟสให้เหมาะสมกับการทำรีดักชัน และลดระยะเวลาในการทำออกซิเดชันให้เหมาะสมต่อกระบวนการทางอุตสาหกรรม

จากตารางที่ 4.5 พบว่าสัดส่วนธาตุไทเทเนียมมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังพบว่า Light Element สูญหายไปบางส่วนหลังจากผ่านกระบวนการออกซิเดชัน เนื่องจากไม่มีรีดิวเซอร์หลักไปทำปฏิกิริยาดัง Light Element ออกจากโมเลกุลแร่ เมื่อออกซิเดชันนาน 30 นาที ค่า Light Element ลดลง ในขณะที่เมื่อใช้เวลาออกซิเดชันนานขึ้นเป็น 60 นาที ค่า Light Element กลับเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการรีดิวซ์ของอากาศ ซึ่งแปรผันตรงกับระยะเวลาที่ใช้ ในขณะที่ระบบการเผาเป็นระบบเปิด ปริมาณที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของ Light Element ที่วิเคราะห์ได้อาจมีผลจากรีดิวเซอร์บางชนิดที่มีอยู่ในเนื้อแร่



รูปที่ 4.17 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่ 1,150 °C ที่เวลา 30 นาที



รูปที่ 4.18 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่ 1,150 °C ที่เวลา 60 นาที

4.2.2 การรีดักชัน

วัตถุประสงค์ในการทดลองเพื่อให้ธาตุเหล็กที่ถูกเปลี่ยนแปลงเฟสจากอิลเมนไนต์มาแล้วถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนแปลงเป็นธาตุเหล็กที่พร้อมจะสลายตัวเป็นสนิมเหล็ก

ภายหลังการทำการออกซิเดชัน 30 นาที แร่อิลเมนไนต์เปลี่ยนแปลงเฟสไปโดยสมบูรณ์ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้แร่ที่ผ่านการออกซิเดชันแล้ว 60 นาทีที่อุณหภูมิ 1,150 °C เป็นแร่ป้อนในการทำรีดักชัน ดังนี้

4.2.2.1 วิธีการทดลอง

1. ใช้แร่อิลเมนไนต์ 100 กรัม ที่ผ่านการออกซิเดชันแล้ว 60 นาทีที่อุณหภูมิ 1,150 °C เป็นแร่ป้อนในการทำรีดักชัน
2. ชั่งถ่านโค้ก 60 กรัม เป็นรีดิวเซอร์
3. ทำการผสมแร่อิลเมนไนต์และถ่านโค้กเข้าด้วยกันเข้าไปในเบ้าแกรไฟต์
4. เร่งอุณหภูมิให้ขึ้นถึง 1,360 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของเตา induction และให้คงอุณหภูมิไว้ที่ 20 นาที โดยไม่ปิดฝาเบ้าหลอม หลังจากนั้นดำเนินการตามข้อ 6 (รูปที่ 4.19)
5. เร่งอุณหภูมิให้ขึ้นถึง 1,360 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของเตา induction และให้คงอุณหภูมิไว้ที่ 30 60 และ 90 นาที ปิดฝาเบ้าหลอมตั้งแต่เริ่มเร่งอุณหภูมิจนสิ้นสุดกระบวนการเพื่อให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และเกิดปฏิกิริยารีดักชันจนสิ้นสุดปฏิกิริยาตามอุณหภูมิที่ลดลงภายในเบ้าหลอม หลังจากนั้นดำเนินการตามข้อ 6 (รูปที่ 4.20)
6. ชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ผลที่ได้ด้วย XRF และ XRD (รูปที่ 4.21)



รูปที่ 4.19 แสดงการเผารีดักชันโดยไม่ปิดฝาเบ้าหลอม



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.20 (ก) แสดงลักษณะของเบ้าหลอมที่มีการปิดฝาก่อนเริ่มเผาไรต์กซ์เพื่อให้มีบรรยากาศภายในเป็น CO
 (ข) แสดงลักษณะของเบ้าหลอมที่มีการปิดฝาขณะลดอุณหภูมิเพื่อให้มีบรรยากาศภายในเป็น CO



รูปที่ 4.21 แร่โอลิเมนไนต์หลังเผาไรต์กซ์ที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที

4.2.2.2 ผลการทดลอง

1. ลักษณะกายภาพของตัวอย่างหลังเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C แสดงดังรูปที่ 4.22 – 4.24)

2. น้ำหนักของตัวอย่างหลังเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน แสดงในตารางที่ 4.6

3. ผลวิเคราะห์ XRF ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.25 (รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก)

4. ผลวิเคราะห์ XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลา 20 30 60 และ 90 นาที แสดงดังรูปที่ 4.26 – 4.29



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบแร่โอลิเมนไนต์ (บน) หลังเผารีดักชัน (ล่าง) ก่อนเผารีดักชัน



ก)

ข)

รูปที่ 4.23 ก) ลักษณะของโอลิเมนไนต์หลังเผารีดักชันภายในเบ้า ข) แร่โอลิเมนไนต์หลังเผารีดักชันเมื่อเทออกจากเบ้า



รูปที่ 4.24 (ซ้าย) แร่โอลิเมนไนต์หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 10 นาที
(ขวา) สะเก็ดโลหะที่ได้จากการเผารีดักชันขยาย 10 เท่า

ตารางที่ 4.6 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน

Reduction Time (minute)	น้ำหนักก่อนเผารีดักชัน (กรัม)	น้ำหนักหลังเผารีดักชัน (กรัม)
20*	160	102
30**	160	132
60**	160	127
90**	160	125

หมายเหตุ: *การเผารีดักชันในระบบเปิดไม่ปิดฝาเข้าหลอม

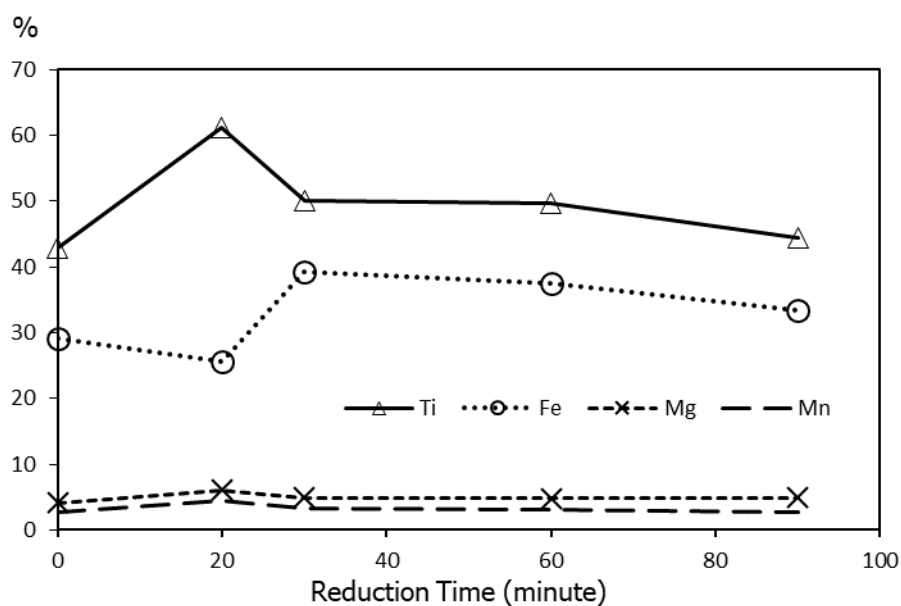
**การเผารีดักชันในระบบปิดและปิดฝาเข้าหลอม

ตารางที่ 4.7 ผลการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) ที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ

Reduction Time (minute)	Ti (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)	Light Element (%)
0	42.84	29.10	4.12	2.64	18.53
20*	61.19	25.68	6.03	4.44	-
30**	50.00	39.25	4.94	3.28	-
60**	49.74	37.58	4.84	3.03	-
90**	44.38	33.43	4.93	2.72	10.75

หมายเหตุ: *การเผารีดักชันในระบบเปิดไม่ปิดฝาเข้าหลอม

**การเผารีดักชันในระบบปิดและปิดฝาเข้าหลอม



รูปที่ 4.25 แสดงผลการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (ออกซิเดชัน) 60 นาที ที่อุณหภูมิ 1,150 °C และรีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ

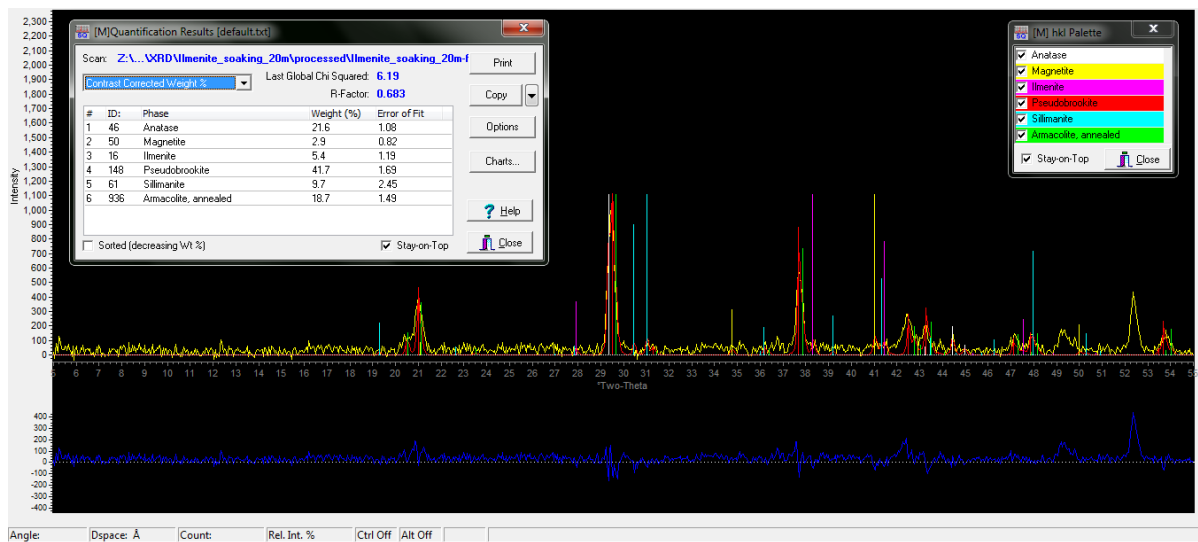
จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อเผาแร่รีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C ในระบบเปิด นาน 20 นาที จะได้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวมน้อยที่สุดเท่ากับ 102 กรัม สันนิษฐานว่า ถ่านโค้กที่ใช้มีการสลายตัวจากการเผาไหม้ไปในขณะที่เกิดการรีดักชันของแร่สูง ทำให้ออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบของแร่สลายตัวไปด้วย น้ำหนักรวมของผลิตภัณฑ์จึงลดลงสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ XRF ตามตารางที่ 4.7 ซึ่งพบว่าค่า Ti เพิ่มขึ้นจาก 42.84% เป็น 61.19%

เมื่อเผาแร่รีดักชันในระบบปิดที่เวลาต่าง ๆ กันตั้งแต่ 30 60 และ 90 นาที พบว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวมมากกว่าน้ำหนักของแร่ 30% อาจเป็นเพราะน้ำหนักของถ่านที่เผาไหม้ไม่หมดและการสลายตัวของออกซิเจนน้อยลงเนื่องจากอยู่ในสภาวะปิด แต่ค่า Light Element หายไป มีเพียงตัวอย่างที่เผาแร่รีดักชันนาน 90 นาที เกิดค่า Light Element ขึ้น 10.75% และส่งผลให้ผลวิเคราะห์ XRF ของค่า Ti ของผลิตภัณฑ์รวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าการเก็บตัวอย่างเพื่อส่งวิเคราะห์เกิดความผิดพลาด อาจทำให้แร่ที่เผาแร่รีดักชันแล้วเกิดกระบวนการออกซิเดชันซ้ำ (re-oxidation) กับอากาศ (เทียนไชย, 2533)

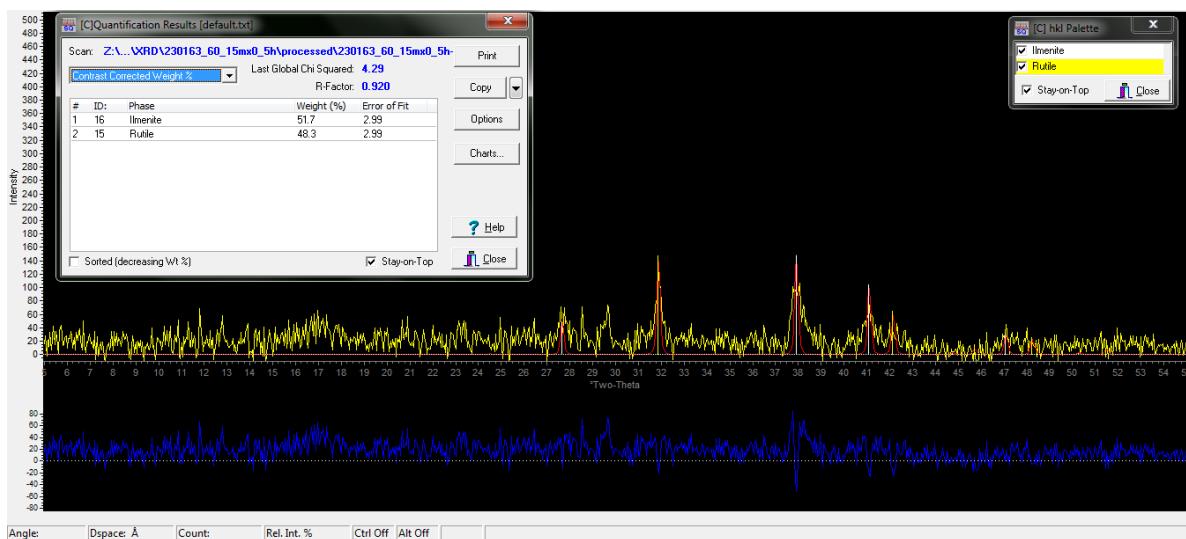
เมื่อตรวจสอบผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างที่ผ่านการเผาแร่รีดักชันแบบเปิดนาน 20 นาที พบว่าเกิดเฟสอะนาเทสถึง 21.6% ในขณะที่เฟสโอลิเมนไนต์ลดลงเหลือ 5.4% หมายความว่าโอลิเมนไนต์บางส่วนได้เปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์สังเคราะห์หรืออะนาเทส ซึ่งไม่ได้มีอยู่ในตัวอย่างแร่ดิบ นอกจากนี้ยังพบเฟสซูโดบรูคไคต์และอื่น ๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงมาจากแร่โอลิเมนไนต์เดิม

สำหรับผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างที่ผ่านการเผาแร่รีดักชันแบบปิดนาน 30 60 และ 90 นาที พบเฟสรูไทล์เพิ่มขึ้นอย่างมากถึง 48.3% เมื่อเผาแร่รีดักชันนาน 30 นาที แล้วลดลงอย่างต่อเนื่องเหลือ 35.2% ที่เวลาเผา 60

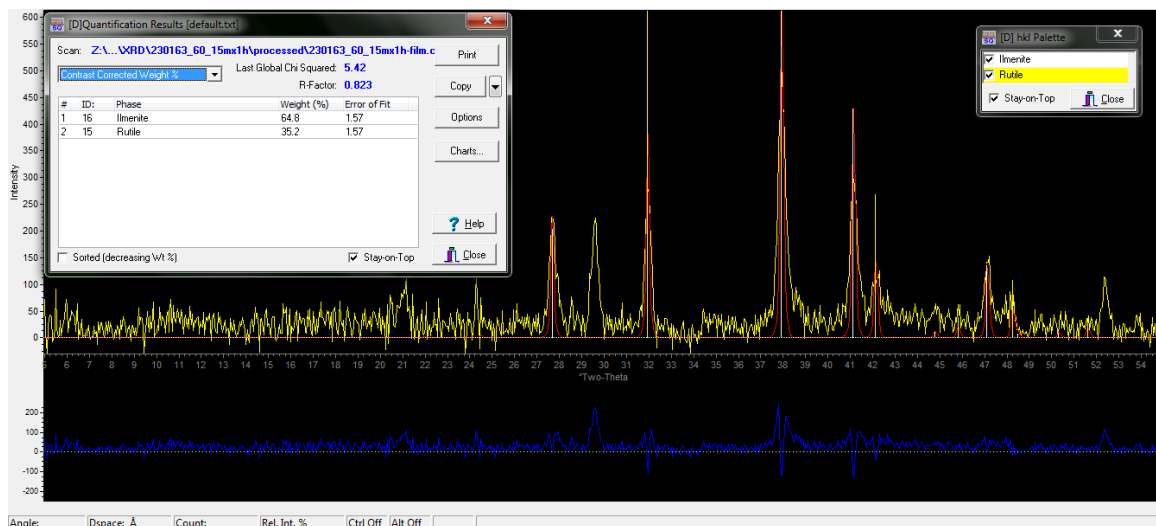
นาที่ และเหลือ 30.9% ที่เวลาเผา 90 นาที่ ในขณะที่กลับมาพบเฟสโอลิเมนไนต์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา การเผารีดักชัน อาจเป็นเพราะการแปลความหมายข้อมูลผลวิเคราะห์ของเครื่องมือ XRD ที่แปลความหมายผลวิเคราะห์ที่ได้เป็นโอลิเมนไนต์และรูไทล์ ในขณะที่การเผาออกซิเดชันก่อนหน้านี้ เฟสโอลิเมนไนต์หายไปแล้ว ซึ่งผลจากการดำเนินการนี้ เมื่อนำไปทวนพ่นอากาศในขั้นตอนต่อไป อาจทำให้เข้าใจกระบวนการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้ได้ชัดเจนขึ้น ในขั้นตอนนี้จะสรุปว่า เมื่อเผารีดักชันแบบเปิดจะได้เฟสต่าง ๆ หลายเฟส ในขณะที่เมื่อเผารีดักชันแบบปิดจะได้เฟสโอลิเมนไนต์และรูไทล์เท่านั้น ทั้งนี้ ผลวิเคราะห์ XRD ของรูไทล์ดังกล่าวยังสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ XRF ของธาตุ Ti ในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.25 นอกจากนี้จากรูปที่ 4.24 ยังพบโลหะเหล็กขนาดเล็กขนาดเท่าหัวไม้ขีดไฟอยู่ประปรายภายในบ้ำหาลอม และพบมวลสารที่เกิดการยึดตัวและเชื่อมต่อ (sinter) ที่ก้นบ้ำหาลอม คาดว่าอาจจะเป็นผลจากมลทินแมงกานีสและแมกนีเซียมที่มีอยู่ในเนื้อแร่ดิบ (เทียนไชย, 2533)



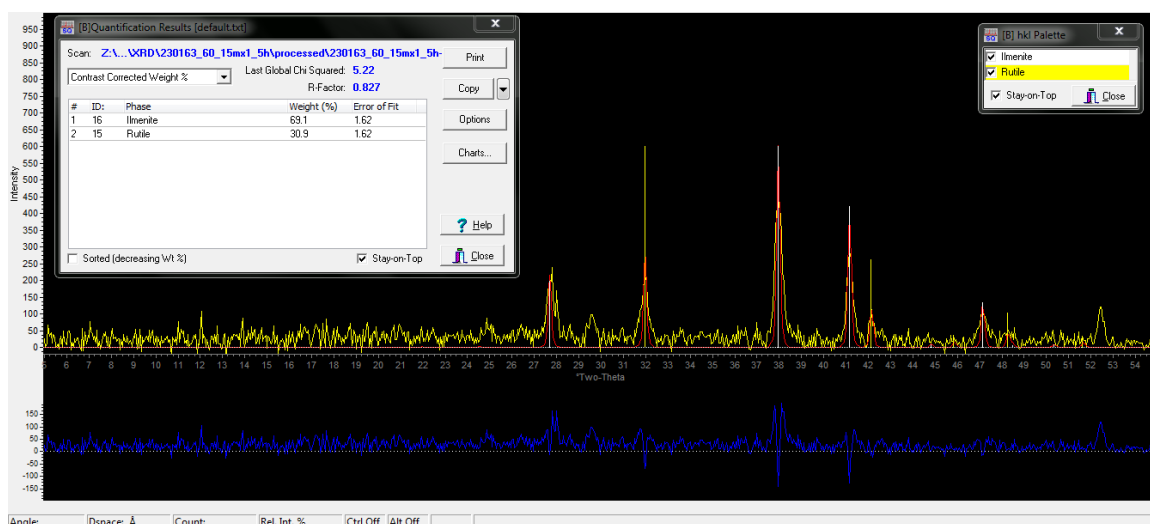
รูปที่ 4.26 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (รีดักชัน) ที่ 1,360 °C ที่เวลา 20 นาที



รูปที่ 4.27 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (รีดักชัน) ที่ 1,360 °C ที่เวลา 30 นาที



รูปที่ 4.28 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (รีดักชัน) ที่ 1,360 °C ที่เวลา 60 นาที



รูปที่ 4.29 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไนต์ (รีดักชัน) ที่ 1,360 °C ที่เวลา 90 นาที

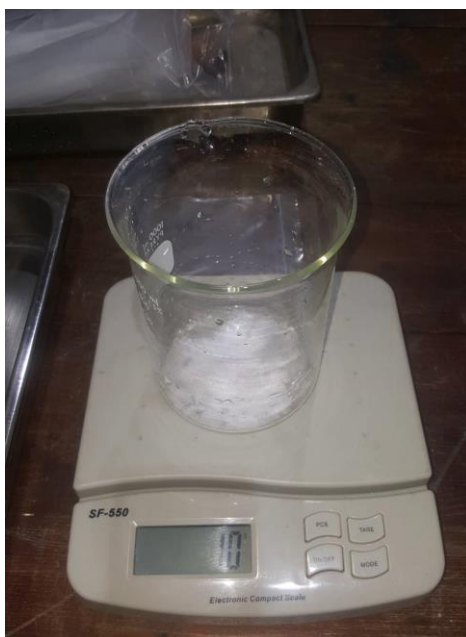
4.2.3 การกวนพ่นอากาศ

วัตถุประสงค์การทดลองเพื่อเปลี่ยนแปลงธาตุหลักของเฟสของแร่ที่ได้จากกระบวนการรีดักชันให้เป็นสนิมเหล็กและแขวนลอยและทิ้งไปกับน้ำ ซึ่งคาดว่าจะทำให้มวลของธาตุ Ti เพิ่มขึ้น

4.2.3.1 วิธีการทดลอง

1. เลือกใช้ตัวอย่างแร่ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที โดยชั่งน้ำหนักแร่ 100 กรัม
2. เตรียมสารละลาย 1% NH_4Cl (แอมโมเนียมคลอไรด์) ในน้ำ 1 ลิตร (รูปที่ 4.30)
3. บดตัวอย่างแร่ด้วยโกร่งเซรามิกและคัดขนาดผ่านตะแกรง 8 เมช เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและให้เริ่มโอกาสสัมผัสกับอากาศมากขึ้น (รูปที่ 4.31)

4. เทตัวอย่างแร่ในข้อ 3 และสารละลายในข้อ 2 ประมาณ 400 กรัม ลงในเครื่องกวนพ่นอากาศขนาดถึงกวน 0.5 ลิตร โดยให้ของผสมท่วมใบพัดกวนแร่
5. เปิดเครื่องกวนพ่นอากาศที่ความเร็วประมาณ 600 รอบต่อนาที โดยสังเกตให้มีอากาศถูกดูดผ่านใบพัดในขณะที่ทำการกวน (รูปที่ 4.32)
6. ทำการกวนแร่เป็นเวลา 180 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุก 30 60 120 และ 180 นาที
7. รินสารแขวนลอยทิ้งภายในหลังการกวน 180 นาที
8. ล้างตัวอย่างที่เก็บได้ด้วยน้ำสะอาด อบแห้งและวิเคราะห์ผลด้วย XRD และ XRF



รูปที่ 4.30 การเตรียมสารละลาย 1% NH_4Cl ในน้ำ



รูปที่ 4.31 การเก็บตัวอย่างอลิเมนไนต์หลังเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ $1,150^\circ\text{C}$ นาน 60 นาที และรีดักชันที่อุณหภูมิ $1,360^\circ\text{C}$ นาน 30 นาที ก่อนทำการกวนพ่นอากาศ



รูปที่ 4.32 ความเร็วรอบของใบพัดที่ใช้ในการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ด้วยเครื่อง Flotation Sub-A

4.2.3.2 ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองแสดงตามรูปที่ 4.33 – 4.34
2. น้ำหนักตัวอย่างแร่ที่เหลือจากกระบวนการล้างตัวอย่างแร่ภายหลังการกวนพ่นอากาศ 180 นาที เท่ากับ 68.0 กรัม
3. ผลวิเคราะห์ XRF แสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.35 (รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก)

เมื่อศึกษาผลวิเคราะห์ XRF ของตัวอย่างแร่ที่เก็บได้ตามระยะเวลาการกวนพ่นอากาศต่าง ๆ กัน พบว่าธาตุ Ti มีปริมาณเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มการกวนพ่นอากาศไปจนถึง 30 นาที และมีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้นหลังจาก 30 นาที ในขณะที่เหล็กที่มีอยู่ในเนื้อแร่มีปริมาณคงที่ เมื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายสแกนเหล็กที่แขวนลอยในสารละลายที่เททิ้ง พบว่ามีมวลเหล็กสูญหายไปอย่างชัดเจน โดยน้ำหนักของแร่รวมภายหลังการกวนพ่นอากาศ 180 นาที เท่ากับ 68.0 กรัม แสดงว่ามีมวลหายไป 32.0 กรัม คาดว่าเป็นมวลของน้ำเหล็กสีส้มและมวลของถ่านที่เหลือจากกระบวนการ ในขณะที่เหล็กที่ละลายออกค่อย ๆ ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสนิมเหล็กมีสีส้มชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป ดังรูปที่ 4.34ค



ก) ขณะเริ่มต้น

ข) หลังกวนพ่นอากาศ 30 นาที

ค) หลังกวนพ่นอากาศ 60 นาที



ง) หลังกวนพ่นอากาศ 120 นาที



จ) หลังกวนพ่นอากาศ 180 นาที คราบสนิมเหล็กเกาะติดใบพัด

รูปที่ 4.33 แสดงการทำการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ในน้ำที่ผสมสาร 1% NH_4Cl



ก) แร่โอลิเมนไต์ก่อนทำความสะอาด
จะเห็นคราบน้ำสนิมโดยรอบ

ข) แร่โอลิเมนไต์หลังล้าง
สนิมเหล็กออกแล้ว

ค) สนิมเหล็กที่แขวนลอย
ที่รินทิ้งหลังกวนพ่นอากาศ 180 นาที

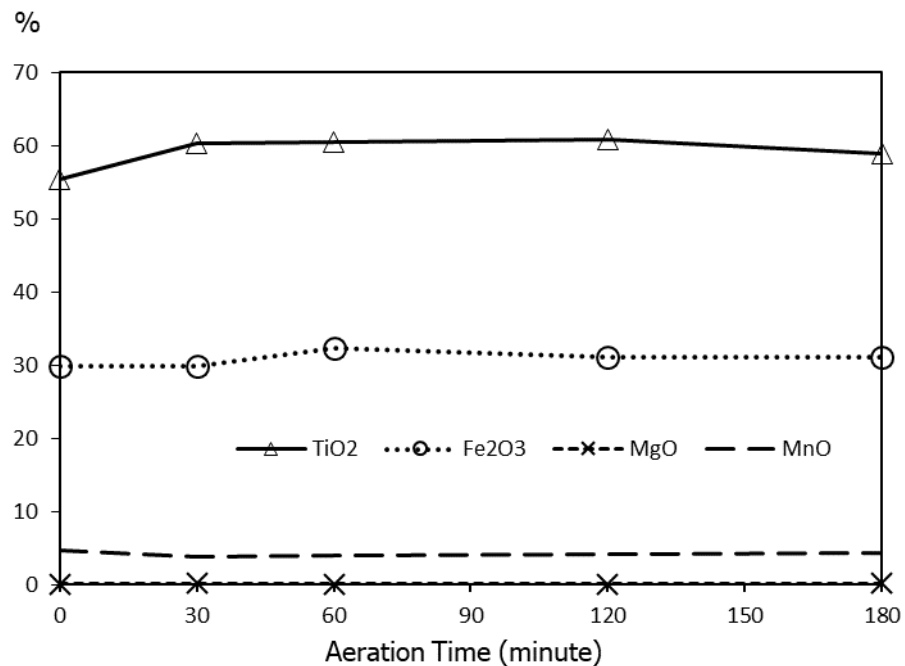
รูปที่ 4.34 ลักษณะแร่โอลิเมนไต์หลังการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ในสารละลาย 1% NH_4Cl นาน 180 นาที

ตารางที่ 4.8 ผลการเผาแร่โอลิเมนไต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที และทำการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ที่เวลาต่าง ๆ

Aeration Time (minute)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	MnO (%)
0	55.43	29.83	0.11	4.72
30	60.37	29.81	0.18	3.86
60	60.46	32.37	0.07	4.06
120	60.73	31.10	0.08	4.24
180	58.83	31.15	0.14	4.31

หมายเหตุ: วิเคราะห์ XRF ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ของภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์ XRF ของ OLYMPUS ที่ใช้อยู่ชำรุดอยู่ในระหว่างซ่อมแซม



รูปที่ 4.35 ผลการเผาแร่โอลิเมนไต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที และทำการกวนพ่นอากาศ (Aeration) ที่เวลาต่าง ๆ

4.2.4 การสกัดด้วยสารเคมี

เพื่อชะละลายเหล็กออกไซด์ที่เหลืออยู่และมลทินอื่น ๆ เช่น แมงกานีส ทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ละลายเหลืออกไซด์ให้มากที่สุด ภายหลังการกวนพ่นอากาศในสภาวะที่เป็นกรด อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ จึงทำการเลือกสภาวะใดสภาวะหนึ่งในการกักตุนมาทำการศึกษการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้เป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และต้นทุนต่ำ

4.2.4.1 วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างแร่ที่ได้จากกระบวนการพ่นอากาศตามน้ำหนักแร่ที่มีอยู่ (68.0 กรัม) มาใช้เป็นสารตั้งต้นเดิมลงในเครื่องกวน (ในที่นี้เป็นเครื่องเดียวกันเครื่องกวนพ่นอากาศ)
2. เตรียมสารละลายกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ จำนวน 1 ลิตร
3. เติมสารละลายกรดซัลฟูริกตามข้อ 2 ลงในเครื่องกวน ความเร็ว 600 รอบต่อนาที นาน 30 นาที
4. ทำความสะอาดแร่ภายหลังกระบวนการ อบแห้ง ชั่งน้ำหนัก รวมทั้งวิเคราะห์ XRF และ XRD

4.2.4.2 ผลการทดลอง

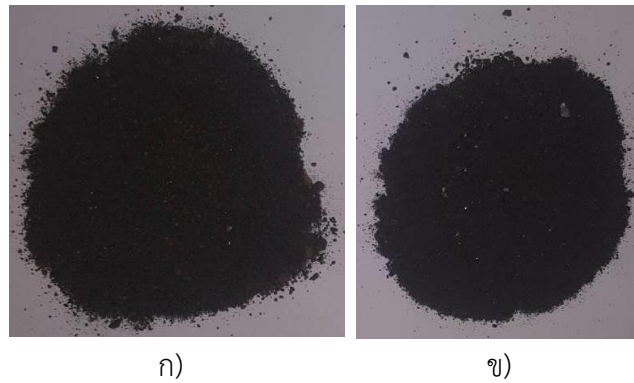
1. ตัวอย่างส่วนผสมแร่และสารละลายกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ ภายหลังกักตุนนาน 30 นาทีแสดงในรูปที่ 4.36
2. น้ำหนักแร่ที่ได้ภายหลังการอบแห้งเท่ากับ 57.3 กรัม แสดงในรูปที่ 4.37ก
3. ผลวิเคราะห์ XRF ตามตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.38 (รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก)
4. ผลวิเคราะห์ XRD รูปที่ 4.39 – 4.40

ในขณะที่ทำการกักตุนพบว่ามีการไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟูริกกับมวลสารบางชนิดที่มีอยู่ในตัวอย่างแร่ ซึ่งจะพบว่าน้ำหนักของมวลหายไปในขณะที่ทำการกักตุน แต่จากรูปที่ 4.36 ไม่เห็นสีสนิมเกิดขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารแขวนลอยที่ละลายออกมานี้อยู่ในสภาพอื่นหรือเป็นเหล็กรูปแบบอื่น เมื่อตรวจสอบผล XRF พบว่าค่า Ti เพิ่มขึ้นจาก 40.59% เป็น 53.51% ในขณะที่ค่า Fe ลดลงจาก 49.91% เป็น 23.12% ซึ่งสัดส่วนของ Fe ที่ลดลง ส่งผลให้สัดส่วนของ Ti เพิ่มขึ้น เมื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแร่หลังการสกัดด้วยกรดเปรียบเทียบกับแร่ที่ผ่านการกวนพ่นอากาศเพียงอย่างเดียวพบว่า แร่ที่ผ่านการกวนพ่นอากาศเพียงอย่างเดียวยังคงมีสีออกน้ำตาลเล็กน้อย ในขณะที่แร่ที่ผ่านการสกัดกรดแล้ว มีสีเข้มขึ้น คาดว่าเหล็กออกไซด์ที่ยังคงเหลืออกไซด์เล็กน้อยเกิดปฏิกิริยาอื่นหรือถูกชะล้างไปในขณะที่ทำการสกัดด้วยกรด (รูปที่ 4.37)

เมื่อตรวจสอบเฟสของแร่ที่ผ่านการสกัดด้วยกรดด้วยเครื่อง XRD พบว่าเฟสของแร่ยังคงเป็นรูไทล์และซูโดบรูคไต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเฟสของแร่ที่ผ่านกระบวนการพ่นอากาศเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.39 – 4.40) และเฟสอิลเมนไนต์หายไป



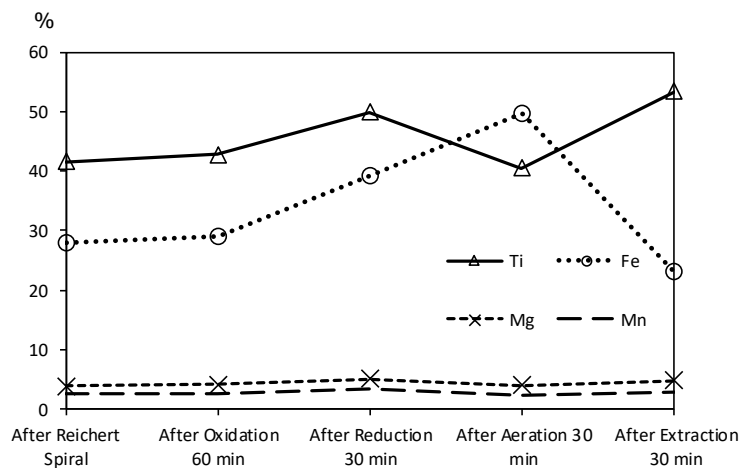
รูปที่ 4.36 ตัวอย่างส่วนผสมแร่และสารละลายกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ ภายหลังกักตุนนาน 30 นาที (ซ้าย) ในเครื่องกวนพ่นอากาศ (ขวา) ส่วนผสมที่ผ่านกระบวนการแล้วก่อนเทสารละลายและสารแขวนลอยทิ้ง



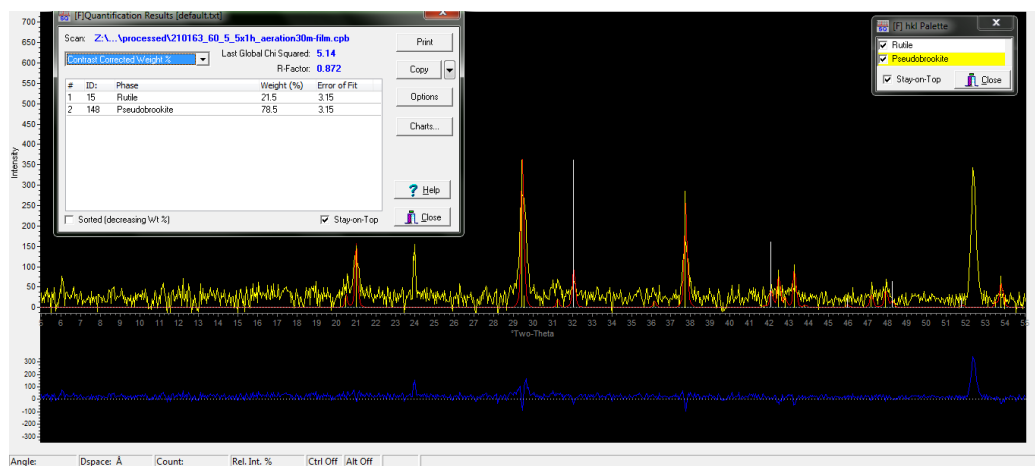
รูปที่ 4.37 ก) แร่ภายหลังการกวนพ่นอากาศและกักด้วยกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์
ข) แร่ภายหลังการกวนพ่นอากาศ

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์แร่โอลิเมนไต์หลังผ่านการเพิ่มความเข้มข้นและการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีทางโลหวิทยา

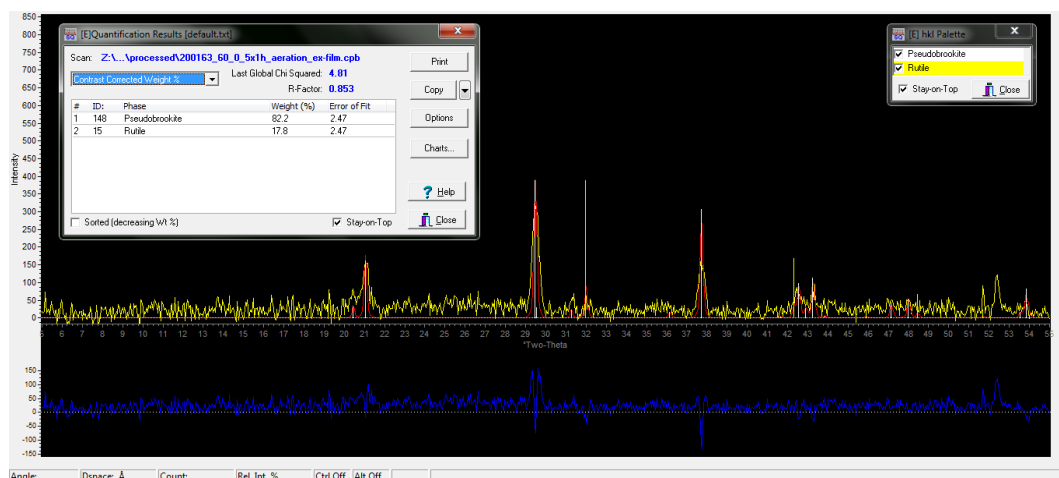
ตัวอย่าง	Ti (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)
ขั้นตอนที่ 1: การเพิ่มความเข้มข้นของแร่โอลิเมนไต์	41.63	27.89	3.84	2.61
ขั้นตอนที่ 2: การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา				
ขั้นตอนที่ 2.1: แร่โอลิเมนไต์จากขั้นตอนที่ 1 ที่ผ่านการออกซิเดชันที่ 1,150 °C นาน 60 นาที	42.84	29.10	4.12	2.64
ขั้นตอนที่ 2.2: แร่โอลิเมนไต์จากขั้นตอนที่ 2.1 ที่ผ่านการรีดักชันที่ 1,360 °C นาน 30 นาที	50.00	39.25	4.94	3.28
ขั้นตอนที่ 2.3: แร่โอลิเมนไต์จากขั้นตอนที่ 2.2 ที่ผ่านการกวนพ่นอากาศ นาน 30 นาที	40.59	49.91	3.94	2.28
ขั้นตอนที่ 2.4: แร่โอลิเมนไต์จากขั้นตอนที่ 2.3 ที่ผ่านการกักตุนด้วยกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ นาน 30 นาที	53.51	23.12	4.68	2.74



รูปที่ 4.38 ผลวิเคราะห์แร่โอลิเมนไต์หลังผ่านการเพิ่มความเข้มข้น และการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา



รูปที่ 4.39 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไต์ (ออกซิเดชัน) ที่ 1,150 °C นาน 60 นาที รีดักชันที่ 1,360 °C นาน 30 นาที และกวนพ่นอากาศนาน 30 นาที



รูปที่ 4.40 แสดงผล XRD ของการเผาแร่โอลิเมนไต์ (ออกซิเดชัน) ที่ 1,150 °C นาน 60 นาที รีดักชันที่ 1,360 °C นาน 30 นาที กวนพ่นอากาศนาน 30 นาทีและผ่านการกัดกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์นาน 30 นาที

บทที่ 5

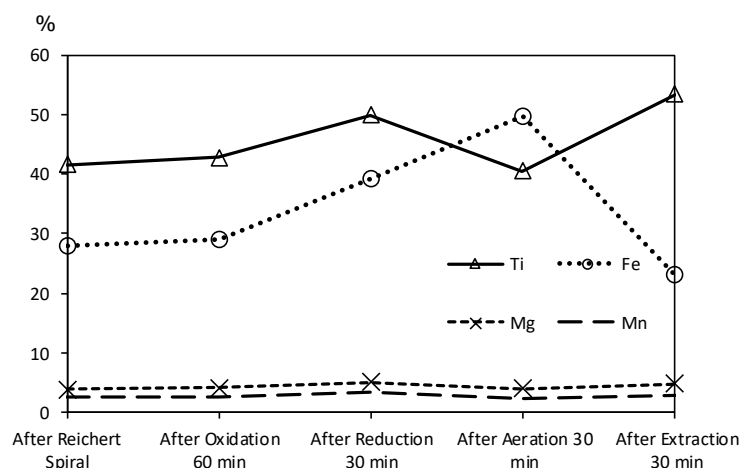
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

1. Reichert Spiral เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มความเข้มข้นของหัวแร่ดิบโอลิเมนได้
2. เครื่องแยกแร่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Induced Roll สามารถแยกแร่โอลิเมนคุณภาพสูงได้
3. เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) สามารถใช้ทำกระบวนการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C และคงอุณหภูมิไว้ได้
4. เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) สามารถใช้ทำกระบวนการรีดักชันที่อุณหภูมิสูงสุด 1,360 °C และคงอุณหภูมิไว้ได้
5. สามารถใช้เซลล์ลอยแร่ (Sub-A Flotation Cell) เป็นเครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกวน
6. สามารถใช้เซลล์ลอยแร่ (Sub-A Flotation Cell) เป็นเครื่องสกัดแร่ด้วยสารเคมี (กรดซัลฟูริก H_2SO_4) ได้
7. กระบวนการเพิ่มสัดส่วนธาตุไทเทเนียม (Ti) ด้วยกระบวนการ Becher Process โดยใช้เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) สามารถดำเนินการได้
8. แร่โอลิเมนสามารถผลิตจากหัวแร่ดิบเหลือทิ้งของโรงแต่งแร่ทรายแก้วจากแหล่งธรรมชาติและโรงแต่งแร่ทรายแก้วจากทรายเหลือทิ้งของโรงล้างทรายก่อสร้างได้
9. สัดส่วนของธาตุไทเทเนียม (Ti) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มกระบวนการตามตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.38 ดังนี้

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์แร่โอลิเมนหลังจากการเพิ่มความเข้มข้นและการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา

ตัวอย่าง	Ti (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)
ขั้นตอนที่ 1: การเพิ่มความเข้มข้นของแร่โอลิเมน	41.63	27.89	3.84	2.61
ขั้นตอนที่ 2: การเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา				
ขั้นตอนที่ 2.1: แร่โอลิเมนจากขั้นตอนที่ 1 ที่ผ่านการออกซิเดชันที่ 1,150 °C นาน 60 นาที	42.84	29.10	4.12	2.64
ขั้นตอนที่ 2.2: แร่โอลิเมนจากขั้นตอนที่ 2.1 ที่ผ่านการรีดักชันที่ 1,360 °C นาน 30 นาที	50.00	39.25	4.94	3.28
ขั้นตอนที่ 2.3: แร่โอลิเมนจากขั้นตอนที่ 2.2 ที่ผ่านการกวนพ่นอากาศ นาน 30 นาที	40.59	49.91	3.94	2.28
ขั้นตอนที่ 2.4: แร่โอลิเมนจากขั้นตอนที่ 2.3 ที่ผ่านการกักกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ นาน 30 นาที	53.51	23.12	4.68	2.74



รูปที่ 4.38 ผลวิเคราะห์แร่โอลิเมนไต์หลังผ่านการเพิ่มความเข้มข้น และการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางโลหวิทยา

10. อัตราส่วนของน้ำหนักของหัวแร่หนักเข้มข้นที่ผ่าน Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้งต่อน้ำหนักของหัวแร่ดิบที่ได้จากโรงแต่งแร่ทรายแก้วของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด คิดเป็น 21:1 และ 20:1 ตามลำดับ

11. คุณภาพของหัวแร่หนักเข้มข้นที่ผ่าน Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้งของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ประกอบด้วย TiO_2 เท่ากับ 2.99% และ 15.50% ตามลำดับ

12. อัตราส่วนของน้ำหนักของหัวแร่หนักเข้มข้นที่ผ่าน Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้งต่อน้ำหนักของแร่โอลิเมนไต์ที่ได้จากกระบวนการแต่งแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด คิดเป็น 82:1 และ 22:1 ตามลำดับ

13. คุณภาพของหัวแร่โอลิเมนไต์ที่ผ่านการแต่งแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ประกอบด้วย TiO_2 เท่ากับ 59.70% และ 60.10% ตามลำดับ

14. ผลวิเคราะห์ XRD ของแร่โอลิเมนไต์จากแหล่งของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด ประกอบด้วยเฟสของแร่โอลิเมนไต์และรูไทล์

15. ในหัวแร่โอลิเมนไต์ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด เมื่อผ่านการเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ $1,150^\circ\text{C}$ ที่ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ (Soaking Time) 30 และ 60 นาที สัดส่วนของธาตุ Ti เท่ากับ 44.32% และ 42.84% สัดส่วนของธาตุ Fe เท่ากับ 33.49% และ 29.10% และสัดส่วนของ Light Element เท่ากับ 10.81% และ 18.53% ตามลำดับ

16. ผลวิเคราะห์ XRD ของหัวแร่โอลิเมนไนต์ของบริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด เมื่อผ่านการเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C ที่ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ (Soaking Time) 30 และ 60 นาที พบเฟสรูไทล์ และซูโดบรูคไคต์ เฟสโอลิเมนไนต์หายไป

17. ผลการเผาที่อุณหภูมิ 1,360 °C หลังผ่านการเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที โดยใช้ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ (Soaking Time) 20 30 60 และ 90 นาที พบค่า Ti เท่ากับ 61.19% 50.00% 49.74% และ 44.38% ค่า Fe เท่ากับ 25.68% 39.25% 37.58% และ 33.43% ตามลำดับ และพบค่า Light Element ในแร่ที่ผ่านการรีดักชันนาน 90 นาทีเท่ากับ 10.75%

18. การเผาที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 20 นาทีในระบบเปิด หลังผ่านการเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที พบเฟสอะนาเทส แมกนีไทต์ อิลเมนไนต์ ซูโดบรูคไคต์ Silimanite และ Amacolite

19. การเผาที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 60 และ 90 นาทีในระบบปิด หลังผ่านการเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที พบเฟสโอลิเมนไนต์และรูไทล์

20. ผลการกวนพ่นอากาศนาน 30 60 120 และ 180 นาทีของแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที พบค่า TiO₂ เท่ากับ 60.37% 60.46% 60.73% และ 58.83% ค่า Fe₂O₃ เท่ากับ 29.81% 32.37% 31.10% และ 31.15% ตามลำดับ

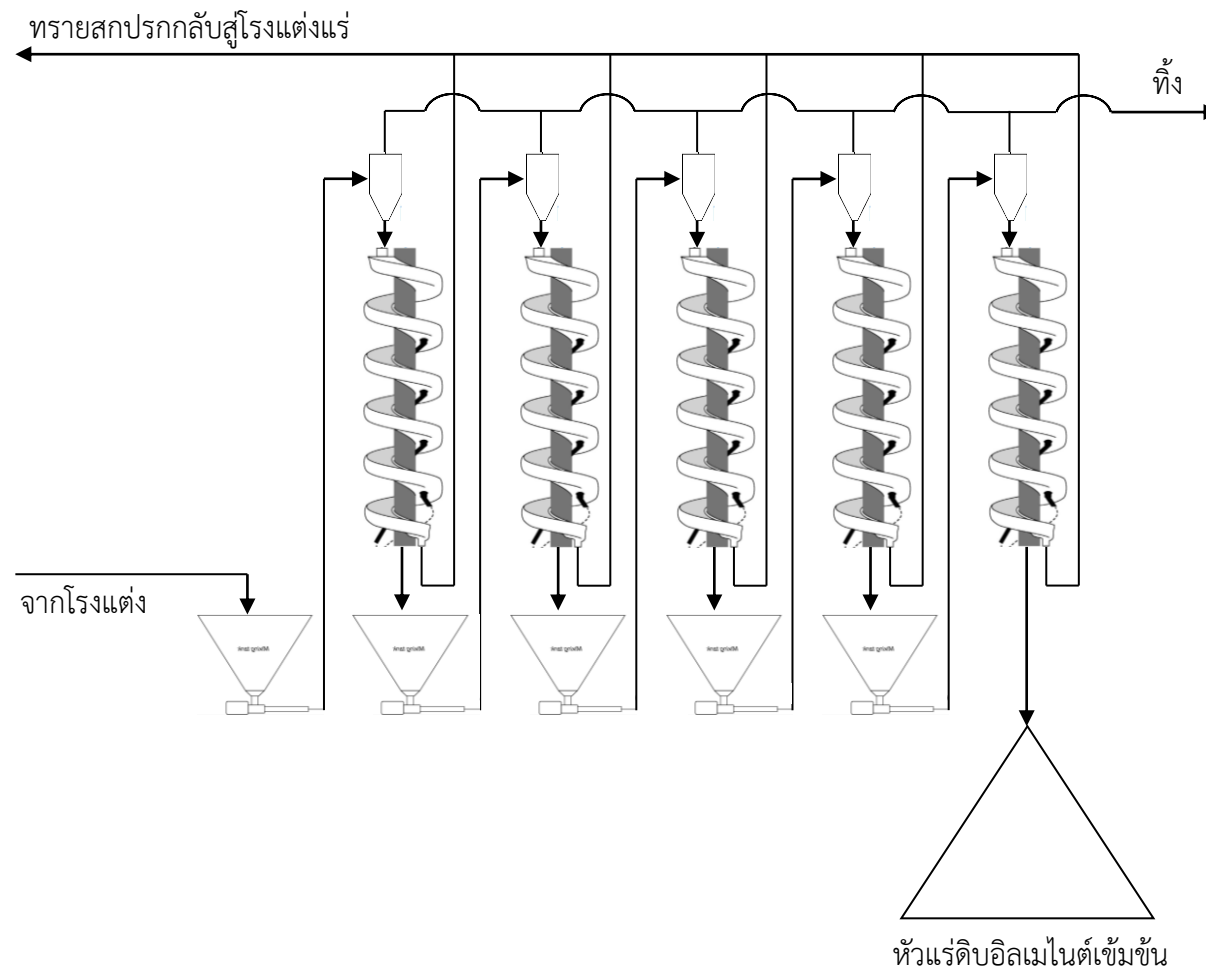
21. ผลการสกัดด้วยสารเคมี (กรดซัลฟูริก H₂SO₄, 0.5 Molar) นาน 30 นาทีของแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และรีดักชันที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที และผ่านการกวนพ่นอากาศนาน 30 นาที พบค่า Ti และ Fe เท่ากับ 53.51% และ 23.12% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาเน้นให้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และประหยัด

1. ขั้นตอนการเตรียมแร่ดิบโอลิเมนไนต์

ควรติดตั้ง Reichert Spiral จำนวน 5 ชุด (ประกอบด้วย Sump รับแร่ ป้อนส่งส่วนผสม ไซโคลน และ Reichert Spiral) แบบอนุกรม กับเครื่องมือแยกแร่แบบ Reichert Spiral ที่ใช้กันอยู่ในกระบวนการแต่งแร่ทรายแก้วหรือทรายพลอยได้จากการล้างทรายก่อสร้างเดิม โดยจัดให้หัวแร่เหลือทิ้งจาก Reichert Spiral ของโรงแต่งแร่เป็นแร่ป้อนลงบน Sump รับแร่ของ Reichert Spiral ชุดที่ 2 ชุดที่ 3 ชุดที่ 4 และชุดที่ 5 ตามลำดับ จะทำให้ความเข้มข้นของหัวแร่ที่ได้จาก Reichert Spiral ชุดที่ 5 มีองค์ประกอบของแร่โอลิเมนไนต์สูงเพียงพอต่อกระบวนการแยกแร่ด้วยแม่เหล็ก ส่วนทรายที่ได้จาก Reichert Spiral ทุกขั้นตอน สามารถนำไปใช้เป็นแร่ป้อนของกระบวนการแต่งแร่ในโรงแต่งแร่ทรายแก้วได้ใหม่ (รูปที่ 5.1) ซึ่งจะลดการสูญเสียทรายแก้วและแร่โอลิเมนไนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5.1 แสดงการจัดเครื่องมือเพิ่มความชื้นของหัวแร่ดิบอิลเมไนต์ชุดที่ 1 2 3 4 และ 5

2. ขั้นตอนการเตรียมแร่โอลิเมนไนต์

เมื่อหัวแร่ดิบจากกระบวนการแต่งแร่ด้วย Reichert Spiral มีความเข้มข้นเพียงพอแล้ว ต้องทำการรอบหัวแร่ดิบที่ได้จนแห้งเพื่อใช้เป็นแร่ป้อนในกระบวนการแต่งแร่ด้วยแม่เหล็กแรงสูง

ในที่นี้สามารถใช้ลูกกลิ้งแม่เหล็กถาวรกำลังสูงประมาณ 10,000 – 20,000 เกาส์ (Gauss) เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้สายพานส่งแร่ผ่านลูกกลิ้งแม่เหล็กที่อยู่ด้านใต้สายพานด้วยความเร็วพอเหมาะ แร่ที่ไม่ติดแม่เหล็กจะถูกแรงเฉื่อยจากการเคลื่อนที่ในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้งแม่เหล็กเหวี่ยงออกพ้นจากอำนาจแม่เหล็กของลูกกลิ้ง ขณะที่แร่ติดแม่เหล็กหรือแร่โอลิเมนไนต์จะเกาะติดกับสายพานที่พาดบนลูกกลิ้ง สายพานจะพาแร่ออกจากสนามแม่เหล็กของลูกกลิ้งไปตกลงบนช่องเก็บ ทำให้ได้แร่โอลิเมนไนต์สะอาด (รูปที่ 5.2)

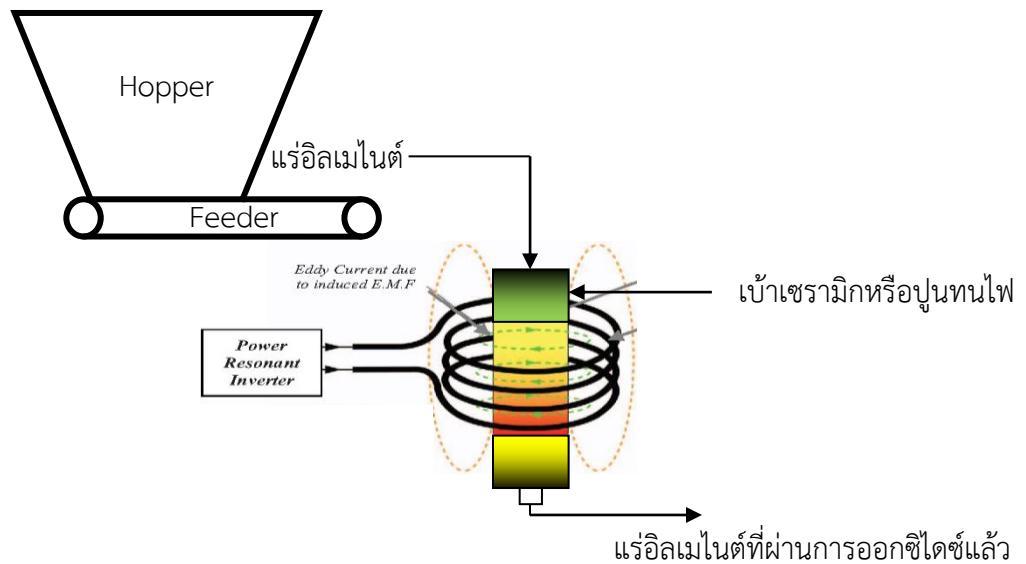


รูปที่ 5.2 แสดงสายพานแยกแร่ผ่านลูกกลิ้งแม่เหล็กกำลังสูง (Permanent Magnetic Separator)

3. กระบวนการเผาออกซิเดชันด้วยเตาเผาแบบ Induction

ในการทดลองนี้การเผาแร่เป็นแบบครั้งต่อครั้ง (Batch) ทำให้เสียเวลามากในการเพิ่มและลดอุณหภูมิของแร่ในแต่ละครั้ง แต่เนื่องจากแร่มีความเป็นโลหะสูง จากองค์ประกอบของธาตุ Ti และ Fe จึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน คาดว่าสามารถใช้เตาเผาแร่ที่ทำจากเซรามิกหรือปูนทนไฟที่มีการจัดเตรียมทางออกของแร่ด้านล่างเข้าไว้ โดยปรับตั้งให้แร่ค่อย ๆ ไหลออกที่ก้นหรือด้านข้างของก้นเตาหลังจากเคลื่อนตัวผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของเตา โดยให้อุณหภูมิและระยะเวลาที่เคลื่อนตัวผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นจุดให้อุณหภูมิสูงสุดของเตาในขณะนั้นตามความเหมาะสมที่ต้องการ (รูปที่ 5.3)

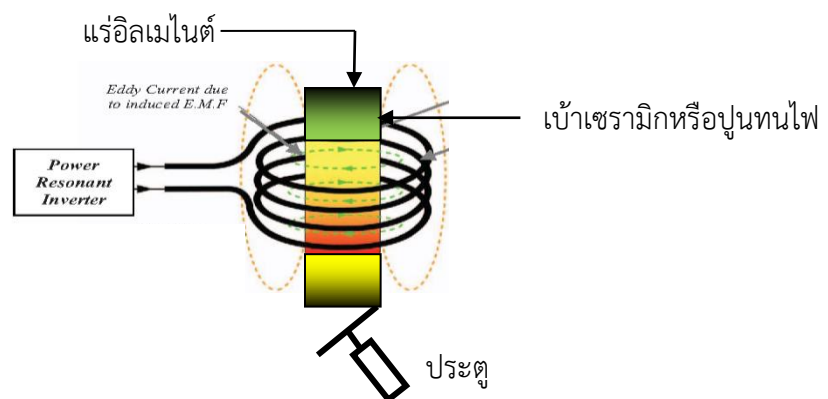
กระบวนการลักษณะนี้จะใช้กับเตาที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 1 ตัน แร่จะถูกเติมเข้าสู่เตาด้วยอุปกรณ์ป้อนแร่ (Hopper feeder) ที่สามารถปรับอัตราการป้อนได้ให้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่ต้องการให้แร่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและขนาดของรูเปิดที่ก้นเตา



รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะของเบ้าและการเคลื่อนผ่านของแร่โอลิเมนไต์เข้าสู่และออกจากเบ้า

4. กระบวนการทำ Reduction

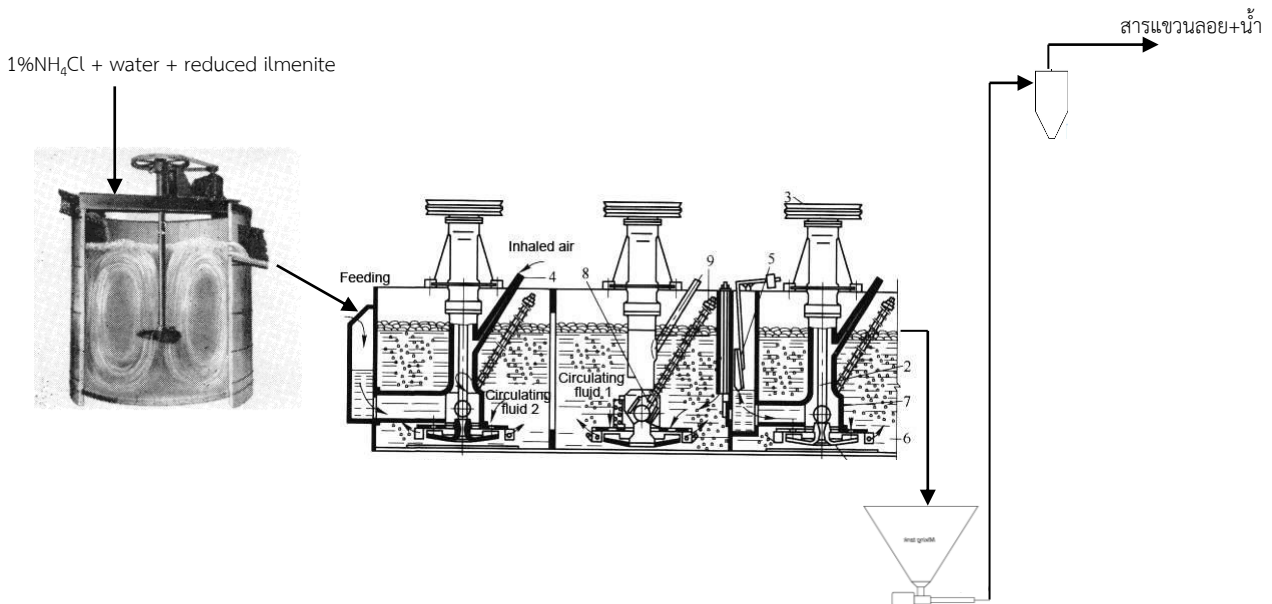
แร่ที่ผ่านการทำ Oxidation และไหลออกจากเบ้าเผาแร่กองรวมกัน ส่วนของแร่ที่เย็นตัวลงเพียงพอแล้ว จะถูกตักผสมและคลุกเคล้ากับถ่านนำเข้าสู่ถึงป้อนแร่ชุดที่ 2 เพื่อป้อนเข้าสู่เตาเผาแร่แบบ Induction ชุดที่ 2 ซึ่งมีการจัดเตรียมเบ้าลักษณะเดียวกับเบ้าที่ใช้ทำ Oxidation ในชุดที่ 1 เมื่อส่วนผสมแร่และถ่านไหลผ่านขดลวดจะเกิดความร้อนจากทำให้ถ่านเผาไหม้สามารถลดกำลังไฟฟ้าในการเหนี่ยวนำได้อย่างมาก เมื่อจัดเตรียมเบ้าที่เหมาะสม ส่วนผสมของแร่และถ่านที่อยู่เหนือและห่างจากขดลวดเหนี่ยวนำมาก ๆ จะสร้าง Reduction Zone ก่อนแร่ไหลผ่านจุดอุณหภูมิสูงสุด กระบวนการนี้สามารถปรับตั้งอุณหภูมิ ระยะเวลาการทำ Reduction ตามความเหมาะสมและสามารถนำแร่ที่ผ่านกระบวนการแล้วออกจากเบ้าตามต้องการได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ตำแหน่งและขนาดของช่องทางออกอาจต้องมีการปรับตั้งเพื่อความเหมาะสมหรืออาจติดตั้งอุปกรณ์เพื่อนำแร่ที่มีโอกาสเกิดการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ออกมาได้อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 5.4)



รูปที่ 5.4 แสดงประตูปิดเปิดกรณีจำเป็นต้องนำแร่ที่มีการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ออกจากเบ้า

5. การกวนพ่นอากาศ

สามารถใช้เครื่องกวนแร่แบบดูดอากาศขณะกวน (Sub-A Flotation Cell) หรือเซลล์ลอยแร่ทั่วไปที่มีช่องกวนแร่ติดกันเป็นอนุกรมจำนวนไม่น้อยกว่า 4 ช่อง เป็นเครื่องมือกวนแบบเติมอากาศที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยนำแร่ที่ผ่านกระบวนการรีดักชันแล้วไปทำการบดคัดขนาดแล้วใช้อุปกรณ์ป้อนแร่ที่สามารถปรับตั้งปริมาณได้ (Hopper Feeder) ป้อนแร่ลงในถังกวนส่วนผสมที่มีการเติมส่วนผสมของน้ำและแอมโมเนียมคลอไรด์ 1% ($1\% \text{NH}_4\text{Cl}$) ส่วนผสมที่ได้จะไหลลงเซลล์ลอยแร่ช่องแรกเพื่อกวนและเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง ส่วนผสมจะค่อย ๆ ไหลผ่านเซลล์ลอยแร่ในขณะที่มีการกวน ดูดอากาศและส่งแร่ไปสู่ทางออกของเซลล์ช่องสุดท้าย เพื่อส่งส่วนผสมที่มีเหล็กออกไซด์ (สีส้ม) แขนลอยอยู่ในน้ำผสม $1\% \text{NH}_4\text{Cl}$ ลงสู่ชุดแยกสารแขวนลอยและน้ำด้วยไฮโดรไซโคลอน (รูปที่ 5.5)

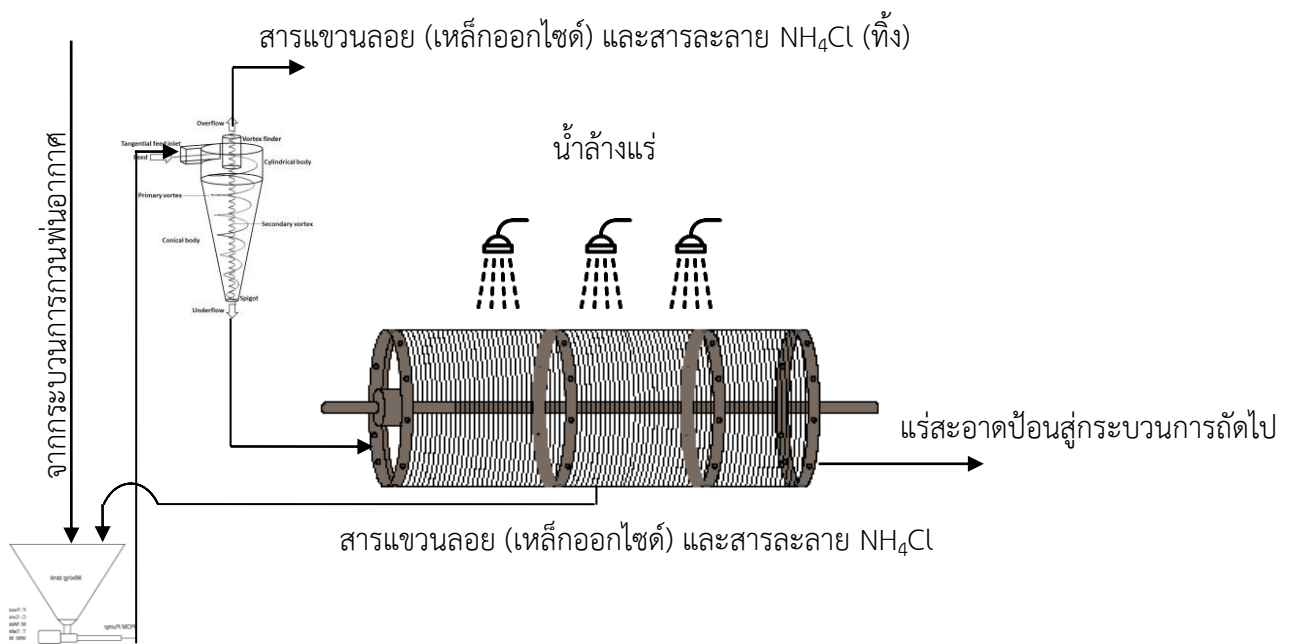


รูปที่ 5.5 แสดงอนุกรมของเครื่องกวนส่วนผสม เซลล์ลอยแร่แบบต่อเนื่องและชุดแยกสารแขวนลอยด้วยไฮโดรไซโคลอน

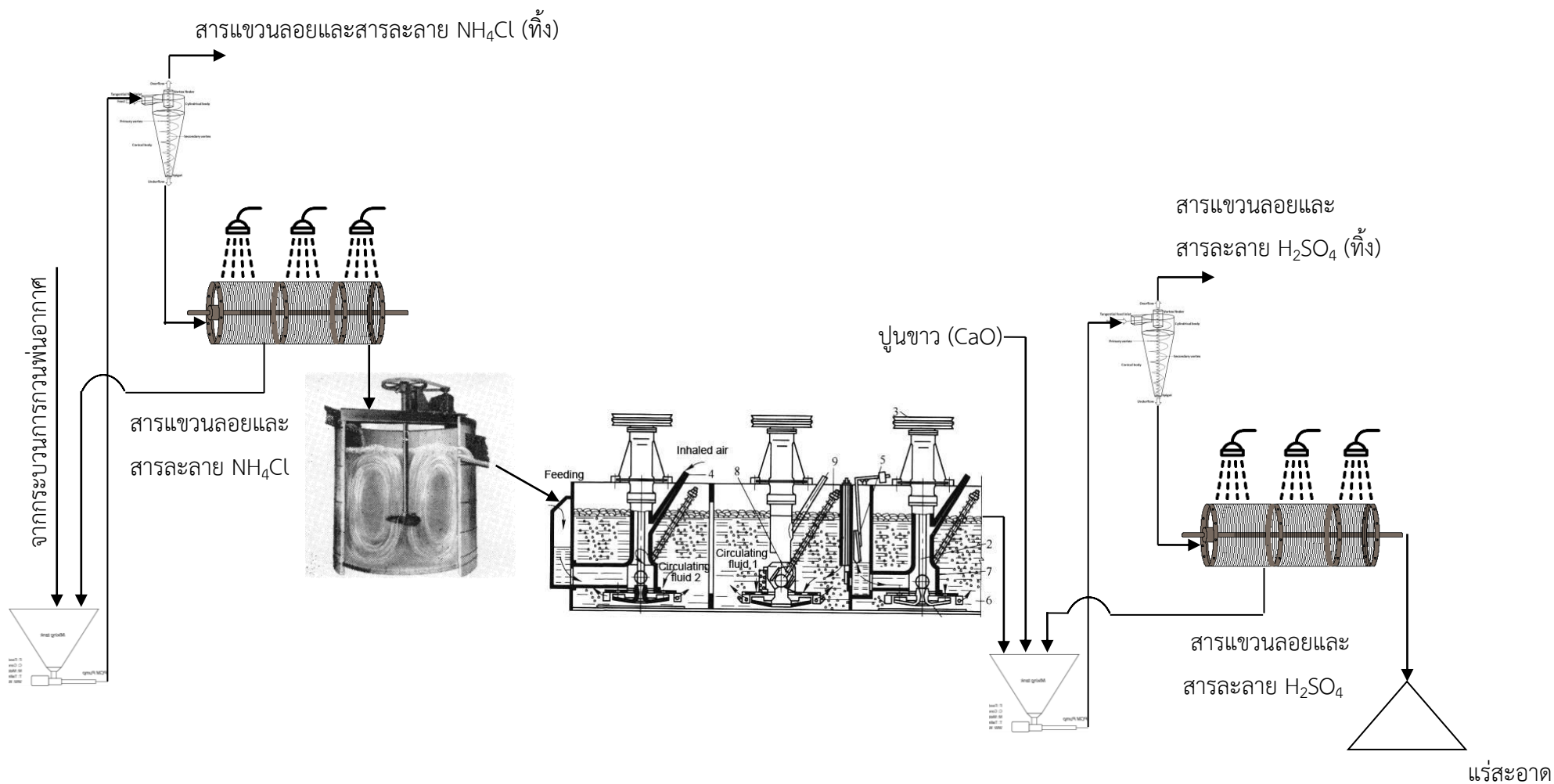
6. การสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลายกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์จะถูกเตรียมเบื้องต้น แร่ที่ได้จากไฮโดรไซโคลอนที่มีปริมาณของแข็งในสารละลาย (%solid) 70% ในข้อ 5 จะไหลออกจากด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนลงสู่ตะแกรงหมุนที่มีรูตะแกรงละเอียดฉีดพ่นด้วยน้ำสะอาดตลอดเวลา (รูปที่ 5.6) ในขณะที่แร่ไหลผ่านตะแกรงต้องไม่มีแร่ลอดผ่านรูตะแกรง ยกเว้นสารแขวนลอย (เหล็กออกไซด์และถ่าน) บางส่วนที่ยังหลงเหลืออยู่ แร่ที่ค้างและเคลื่อนตัวผ่านตะแกรงจะไหลลงสู่ถังกวนส่วนผสมแร่กับสารละลายกรดซัลฟูริกเพื่อไหลเข้าสู่เซลล์ลอยแร่ชุดที่ 2 ซึ่งเซลล์ลอยแร่ชุดนี้ต้องทำการเคลือบผิวโลหะทั้งหมดไม่ให้มีโอกาสสัมผัสกับสารละลายกรด ป้องกันการถูกกัดกร่อนของเซลล์ลอยแร่ แร่จะ

ผ่านเซลล์ลอยแร่โดยปิดกั้นอุปกรณ์การให้อากาศของเซลล์ลอยแร่ การควบคุมระยะเวลาการสกัดทำได้โดยการเพิ่มหรือลดขนาดของเซลล์ลอยแร่และ/หรือเพิ่มจำนวนเซลล์ลอยแร่ ส่วนผสมที่ผ่านการสกัดจะไหลออกจากเซลล์ลอยแร่ช่องสุดท้าย (เช่นเดียวกับการจัดเรียงในขณะกวนพ่นอากาศ) ลงสู่ถังผสมที่เติมปูนขาวในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อสลายความเป็นกรดในส่วนผสมเข้าสู่การล้างแร่ด้วยตะแกรงหมุนเช่นเดียวกับการกวนพ่นอากาศ ส่วนสารละลาย สารแขวนลอยและตะกอนจากการกำจัดกรดจะถูกคัดแยกด้วยไฮโดรไซโคลนและตะแกรงหมุน (รูปที่ 5.7) แร่ที่ผ่านตะแกรงหมุนจะเป็นแร่สะอาด มีสัดส่วนของธาตุ Ti สูง ตามต้องการ



รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการจัดเรียงอุปกรณ์ล้างทำความสะอาดแร่และคัดแยกสารแขวนลอย



รูปที่ 5.7 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์เพื่อสกัดแร่ด้วยกรดซัลฟูริก ล้างทำความสะอาด และทำลายความเป็นกรดของสารละลายและสารแขวนลอยที่เหลือ

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. (2527). *คู่มือการแต่งแร่* (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: ฝ่ายสนเทศและวิเทศสัมพันธ์ กองเศรษฐกิจและเผยแพร่ กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2545). *คุณภาพของทรายแก้วจังหวัดระยอง* (รายงานวิชาการ ฉบับที่ กว 15/2545). กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2552). *เอกสารเผยแพร่ภาคอุตสาหกรรม โครงการส่งเสริมและเผยแพร่เทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงาน DISPLAY CENTER และบ้านประหยัดพลังงาน หมวดที่ 3: การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating)*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2550). *คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานการใช้งานและมาตรฐานการซื้อขายแร่ในตลาดแร่*. กรุงเทพฯ: สำนักพัฒนาและส่งเสริมและสำนักวิชาการแร่ ศูนย์สารสนเทศอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2554). *รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โครงการพัฒนาคุณภาพผลพลอยได้ (By-product) จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก*. กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- คณิต ประสิทธิการกุล. (2545). ทรายแก้ว (Silica sand). *วารสารเศรษฐธรณีวิทยา*, 4(4), 8 หน้า. กรุงเทพฯ: กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.
- จุมพล คีนตัก. (2539). กรรมวิธีการแต่งแร่ทรายแก้ว จากทรายท้ายราง. *ข่าวสารการธรณี*, 41(1-2), 28-31.
- เทียนไชย ต้นไทย. (2533). *การผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่โอลิเมนไนต์*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เทียนไชย ต้นไทย ภิญญู มีจันทร์ และวิกรม วัชรคุปต์. (2535). *การผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่โอลิเมนไนต์. ในการประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่และปิโตรเลียม ครั้งที่ 4* (น. F3-1 – F3-34). กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี.
- ธีรพร รับคำอินทร์. (2535). *การผลิตแม่สีไทเทเนียมจากแร่โอลิเมนไนต์ในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: กองโลหกรรม กรมทรัพยากรธรณี.
- นิคม โชติกานนท์. (2536). *การแต่งแร่*. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ภิญญู มีจันทร์. (2532). *การแยกแร่ด้วยเครื่องไฟฟ้าสถิต-ไฟฟ้าแรงสูง และเครื่องแยกแร่แม่เหล็ก* (เอกสารประกอบการบรรยาย). กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และธรณีวิทยาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- ภิญโญ มีชำนะ. (2532). แร่โอลิเมนไนต์ของประเทศไทย. *วารสารโลหะ วัสดุ และแร่*, 1(2), 45-54.
- ภิญโญ มีชำนะ. (2552). *Mineral and Process Engineering* (เอกสารประกอบการบรรยาย). กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชาญ อมตาริยกุล. (2530). แร่โอลิเมนไนต์ในแง่เศรษฐกิจ. *วารสารสมาคมวิศวกรเหมืองแร่ไทย*, 1(1), 72-80.
- วิเชียร อำนวยสุขวงศ์ วิชาญ อมตาริยกุล และสุมิตร จิตต์เกื้อ. (2532). การแต่งแร่ด้วยเครื่องแยกแร่ไฟฟ้าแรงสูงให้มีประสิทธิภาพ. ใน *การจัดการทรัพยากรธรณี: การประชุมวิชาการเหมืองแร่ครั้งที่ 3* (น. 342-352). กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี.
- วีระพงศ์ เอี้ยวพานทอง และวิชาญ อมตาริยกุล. (2530). การแต่งแร่โอลิเมนไนต์ (ILMENITE) ในเชิงอุตสาหกรรม. ใน *การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ครั้งที่ 4* (น. 458-485). กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี.
- อรกุล โภคาการวิจารณ์. (2543). *แร่* (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.
- Becher, R.G. (1963). *Improved Process for the Beneficiation of Ores Containing Contaminating Iron*. Australian Patent 247,110.
- Borowiec, K. and Rosenqvist, T. (1981). Phase Relations and Oxidation Studies in the Systems Fe-Fe₂O₃-TiO₂ at 700-1,000 °C. *Scandinavian Journal of Metallurgy* (10, pp. 217-224). United Kingdom: Blackwell Publishing.
- Bracanin, B.F., et al. (1972). The Development of a Direct Reduction and Leach Process for Ilmenite Upgrading. *101st Annual Meeting AIME* (Paper Selection No. A72-31, pp. 209-259). San Francisco: AIME.
- CARPCO Research and Engineering. (1954). Separation Characteristics of Minerals. In *Mineral Processing Flowsheets* (1st ed., pp. 219). Denver: Denver Equipment Company.
- Department of Primary Industries and Mines. (2019). *Mineral Statistics of Thailand 2014 – 2018* (Statistics Report No. ICTC 1/2019). กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- Farrow, J.B. Ritchie, I.M. and Mangano, P. (1987). The Reaction between Reduced Ilmenite and Oxygen in Ammonium Chloride Solutions. *Hydrometallurgy* (18, pp. 21-38). Amsterdam: Elsevier BV.
- Goto, S. (2531). *Upgrading of Ilmenite*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Grey, I.E., Jones, D.F., and Reid, A.F. (1974). Reaction Sequences in the Reduction of Ilmenite: 1 - Introduction. In *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy)* (83, pp. C151-152). United Kingdom: Taylor and Francis Ltd.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Hurlbut, C.S. Jr. and Klein, C. (1977). *Manual of Mineralogy* (19th ed.). New York: John Wiley & Son.
- Ismail, M.G.M.U., Amarasekera, J. and Kumarasingha, J.S.N. (1983). The Upgrading of Ilmenite from Sri Lanka by the Oxidation – Reduction – Leach Process. *International Journal of Mineral Processing* (10, pp. 161-164). Amsterdam: Elsevier BV.
- Johnstone, S.J. and Johnstone, M.G. (1961). *Mineral of chemical and allied industries* (2nd ed.). London: Chapman and Hall.
- Jones, D.G. (1973). Reaction Sequences in the Reduction of Ilmenite: 2 – Gaseous Reduction by Carbon Monoxide. In *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy)* (82, pp. C186-192). United Kingdom: Taylor and Francis Ltd.
- Jones, D.G. (1974). Optical Microscopy and Electron Probe Microanalysis Study of Ilmenite Reduction. In *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy)* (83, pp. C1-9). United Kingdom: Taylor and Francis Ltd.
- Jun – Ichiro Yagi, Reijiro Takahashi and Walmen Simandjuntak. (2531). Kinetics of Gas – solid Reactions for Upgrading Ilmenite Ores. *การสัมมนานานาชาติทางวิชาการ เรื่อง กระบวนการโลหกรรม*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Kataoka, S. and Yamada, S. (1972). Beneficiation of Ilmenite Ore by Ishihara Process. *Joint Meeting MMIJ – AIME* (pp.1-10). Tokyo: MMIJ.
- Kostov, I. (1968). *Mineralogy*. Great Britain: Oliver and Boyd.
- Lawver, J.E. and Hopstock, D.M. (1985). Electrostatic and Magnetic Separation. In N.L. Weiss (Ed.), *SME Mineral Processing Handbook*. New York: AIME.
- Lyne, L.E. and Hough, R.A. (1984). *Titanium*. Virginia: U.S. Bureau of Mines.
- Mackey, T.S. (1974). Selective Leaching of Iron from Ilmenite to Produce Synthetic Rutile. *Australian Mining* (66, pp. 44-53). Australia: Prime Creative media.
- Merk R. and Pickles C.A. (1988). Reduction of Ilmenite by Carbon Monoxide. In *Canadian Metallurgical Quarterly* (27, pp. 179-185). Canada: Maney Publishing.
- Neville, G.H.J. (1969). Titanium Compounds (Inorganic). In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (2nd ed., pp. 398-405). New York: Interscience Publishers.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Ramakrishna, R.S., Paul, A.A. and Fonseka, J.P.R. (1988). Sea Water as a 'Rusting Agent' in Direct Reduction Technology for the Production of Synthetic Rutile. In *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy)* (97, pp. C125-128). United Kingdom: Taylor and Francis Ltd.
- Rao, D.B. and Rigaud, M. (1975). Kinetics of the Oxidation of Ilmenite. *Oxidation of Metals* (9, pp. 99-116). United States of America: Springer/Plenum Publishers.
- Roberts, J.M.C. (1971). Ilmenite Upgrading. *Mining Magazine* (125, pp. 543-551). London: Aspermont Media.
- Sinha, H.N. (1972). Ilmenite Upgrading by the Murso Process. *101st Annual Meeting AIME* (Paper Selection No. A72-31, pp. 261-274). San Francisco: AIME.
- Sinha, H.N. (1984). Hydrochloric Acid Leaching of Ilmenite. *Extractive Metallurgy Symposium* (pp. 163-168). Australia: The Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- Tittle, K. (1974). Hydrochlorination of Beach Sand Ilmenite. In *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy)* (83, pp. C203-208). United Kingdom: Taylor and Francis Ltd.
- Tittle, K. and Foley, E. (1973). Investigation of the Segregation of Iron from Ilmenite. In *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy)* (82, pp. C135-139). United Kingdom: Taylor and Francis Ltd.
- Weast, R.C. (1964). *Handbook of Chemistry and Physics* (45th ed.). Ohio: Chemical Rubber Publishing Co.

ภาคผนวก ก

รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF ของแร่โอลิเมนไนต์

ตารางที่ ก.1 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของหัวแร่นักเข็มเข็มที่ผ่าน Reichert Spiral จำนวน 5 ครั้ง ตามตารางที่ 4.2

(บน) บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (ล่าง) บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด

Al2O3	SiO2	CaO	TiO2	Cr2O3	Fe2O3	ZrO2	HfO2	K2O	CuO	MnO	SO3
1.0	63.7	0.26	2.990	0.080	6.502	6.011	0.180	0.100		0.034	19

SiO2	TiO2	ZrO2	Fe2O3	Al2O3	SO3	K2O	MgO	Na2O	Cr2O3	CaO	MnO
63.30%	15.50%	12.70%	3.08%	1.96%	1.78%	595 PPM	0.26%	0.12%	0.79%	660 PPM	0.11%

ตารางที่ ก.2 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของหัวแร่อิลเมไนต์ที่ผ่านการแต่งด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ตามตารางที่ 4.4

(บน) บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (ล่าง) บริษัท ธรรมชาติทรายแก้ว จำกัด

TiO2	Fe2O3	MnO	Al2O3	SiO2	P2O5	MgO	Nb2O5
59.70%	33.50%	3.18%	1.47%	1.23%	0.17%	0.11%	0.16%
60.10%	33.90%	3.11%	1.29%	0.77%	0.17%	919 PPM	0.16%

ตารางที่ ก.3 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของแร่อิลเมไนต์หลังเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C

ณ เวลาต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.5

Oxidation Time 0 minute

El	PPM	+/-
Ti	41.63%	0.1595%
Fe	27.89%	0.1149%
LE	20.46%	0.2010%
Mg	3.84%	0.1809%
Mn	2.61%	0.0317%
P	5594	52.70
Al	5411	307.27
Si	5404	79.24
Y	4122	25.37
Ce	3700	48.03
Cr	2621	211.62
La	1744	31.00
Zr	1277	12.09
Th	1152	19.58
Nb	1097	17.40
Zn	1038	33.37
Ni	946	75.65
S	701	14.62
Ta	201	37.41
U	156	8.98
Pb	142	18.42
Nd	137	10.01
Sn	115	4.39
Bi	90	21.80

Oxidation Time 30 minute

El	PPM	+/-
Ti	44.32%	0.1543%
Fe	33.49%	0.1243%
LE	10.81%	0.1337%
Mg	4.49%	0.2025%
Mn	3.11%	0.0358%
Si	7653	97.04
Al	7154	350.94
Y	4201	26.92
Ca	3035	26.78
P	2991	44.76
Cr	2517	194.49
Ce	2309	44.06
Zn	1502	43.50
Nb	1350	20.36
La	1114	29.93
Zr	1100	12.13
Th	975	20.49
Ni	783	87.58
S	352	14.90
Pb	190	20.27
U	138	9.47
Sn	134	5.08
Ba	103	10.64
Nd	97	9.62
Sb	16	4.45

Oxidation Time 60 minute

El	PPM	+/-
Ti	42.84%	0.1553%
Fe	29.10%	0.1143%
LE	18.53%	0.1873%
Mg	4.12%	0.1738%
Mn	2.64%	0.0316%
Si	6084	84.00
Al	5969	313.89
Y	3019	20.64
Ce	2402	44.05
Ca	2161	23.07
P	2138	37.97
Nb	1204	16.87
La	1039	28.86
Zn	893	31.87
Zr	816	9.47
Th	657	15.84
Ni	613	73.82
S	144	12.76
Sn	129	4.53
Ta	115	34.57
U	108	7.64
Nd	71	9.83
Pb	65	14.69
As	47	10.67
Sb	17	4.31
Mo	14	3.66

ตารางที่ ก.4 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของแร่โอลิเมนไต์หลังเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และ
รีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C ที่เวลาต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.7

Reduction Time 20 minute

EI	PPM	+/-
Ti	61.19%	0.2543%
Fe	25.68%	0.1614%
Mg	6.03%	0.3076%
Mn	4.44%	0.0685%
S	1.32%	0.0085%
Cr	3698	274.22
Al	3604	572.00
Si	2875	115.08
Nb	1172	22.86
Zn	501	43.31
Zr	416	10.76
Y	407	11.49
P	368	51.93
Th	188	17.52
Bi	116	19.73
U	27	7.74

Reduction Time 30 minute

EI	PPM	+/-
Ti	50.00%	0.1705%
Fe	39.25%	0.1458%
Mg	4.94%	0.2399%
Mn	3.28%	0.0394%
Al	1.13%	0.0434%
Cr	3400	167.76
Si	3359	85.31
Ca	3319	31.52
Nb	1228	17.30
P	796	39.57
Zn	654	34.91
Y	518	9.45
Zr	309	6.83
S	248	16.93
Th	102	11.73
Bi	76	12.49
U	35	5.93
Sn	16	3.92

Reduction Time 60 minute

EI	PPM	+/-
Ti	49.74%	0.1648%
Fe	37.58%	0.1385%
Mg	4.84%	0.2224%
Mn	3.03%	0.0385%
Al	1.58%	0.0443%
Si	1.45%	0.0137%
Ca	4636	34.91
Cr	4055	187.86
P	2840	49.63
Y	1957	18.94
Nb	1695	21.97
Zr	528	9.36
Ce	451	33.01
Th	442	17.68
Zn	409	30.71
S	387	17.47
La	236	23.40
Bi	158	19.85
U	74	8.11
Sn	16	4.37

Reduction Time 90 minute

EI	PPM	+/-
Ti	44.38%	0.1556%
Fe	33.43%	0.1252%
LE	10.75%	0.1324%
Mg	4.93%	0.2041%
Mn	2.72%	0.0338%
Al	1.44%	0.0397%
Si	1.12%	0.0114%
Ca	2855	26.79
Cr	2762	180.36
Nb	1582	18.02
S	1533	19.07
P	1080	36.04
Y	788	10.57
Ce	512	36.88
Zr	341	6.69
La	271	25.77
Zn	267	24.19
Th	209	12.79
Ba	92	10.77
Bi	63	13.47
U	26	5.37
Sn	24	4.32
Mo	16	2.74

ตารางที่ ก.5 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของแร่โอลิเมนต์หลังเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 60 นาที และ
รีดักชันด้วยถ่านที่อุณหภูมิ 1,360 °C นาน 30 นาที แล้ว และทำการกวนพ่นอากาศ (Aeration)
ที่เวลาต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.8

Aeration Time 0 minute

Formula	Concentration(%wt)
TiO ₂	55.43
Fe ₂ O ₃	29.83
SO ₃	6.23
MnO	4.72
SiO ₂	1.78
Al ₂ O ₃	0.79
Na ₂ O	0.26
Y ₂ O ₃	0.23
CaO	0.19
Nb ₂ O ₅	0.16
MgO	0.11
P ₂ O ₅	0.10
Cr ₂ O ₃	0.09
K ₂ O	0.08

Aeration Time 30 minute

Formula	Concentration(%wt)
TiO ₂	60.37
Fe ₂ O ₃	29.81
MnO	3.86
SO ₃	2.32
SiO ₂	1.27
Al ₂ O ₃	0.88
Na ₂ O	0.50
Y ₂ O ₃	0.22
MgO	0.18
P ₂ O ₅	0.16
Nb ₂ O ₅	0.15
CaO	0.15
Cr ₂ O ₃	0.07
K ₂ O	0.05

Aeration Time 60 minute

Formula	Concentration(%wt)
TiO ₂	60.46
Fe ₂ O ₃	32.37
MnO	4.06
SO ₃	1.11
SiO ₂	0.68
Al ₂ O ₃	0.54
Y ₂ O ₃	0.21
Nb ₂ O ₅	0.15
P ₂ O ₅	0.12
CaO	0.08
ZrO ₂	0.08
MgO	0.07
Cr ₂ O ₃	0.06

Aeration Time 120 minute

Formula	Concentration(%wt)
TiO ₂	60.73
Fe ₂ O ₃	31.10
MnO	4.24
SO ₃	1.69
SiO ₂	0.80
Al ₂ O ₃	0.62
Y ₂ O ₃	0.22
Nb ₂ O ₅	0.16
P ₂ O ₅	0.12
CaO	0.08
ZrO ₂	0.08
MgO	0.08
Cr ₂ O ₃	0.07

Aeration Time 180 minute

Formula	Concentration(%wt)
TiO ₂	58.83
Fe ₂ O ₃	31.15
MnO	4.31
SO ₃	2.92
SiO ₂	1.03
Al ₂ O ₃	0.67
Y ₂ O ₃	0.23
Nb ₂ O ₅	0.16
CaO	0.16
MgO	0.14
Na ₂ O	0.12
P ₂ O ₅	0.12
ZrO ₂	0.08
Cr ₂ O ₃	0.07

ตารางที่ ก.6 แสดงผลวิเคราะห์แร่โอลิเมนไนด์หลังผ่านการเพิ่มความเข้มข้นและการเพิ่มสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีทางโลหวิทยาตามตารางที่ 4.9

แร่โอลิเมนไนด์ที่ผ่านการกวนพ่นอากาศ 30 นาที

EI	PPM	+/-
Fe	49.91%	0.1426%
Ti	40.59%	0.1330%
Mg	3.94%	0.1966%
Mn	2.28%	0.0284%
Si	7976	96.16
Al	4041	343.17
Ca	3995	27.62
S	3984	26.04
Cr	3366	128.23
Zn	3236	64.13
P	1942	38.88
Y	1668	16.28
Nb	1107	17.10
Zr	634	9.18
Th	300	13.97
Ce	205	21.27
La	106	14.87
Bi	95	15.63
U	51	6.65
Sn	39	3.92

แร่โอลิเมนไนด์ที่ผ่านการกวนพ่นอากาศ 30 นาที
และผ่านการกัดกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ 30 นาที

EI	PPM	+/-
Ti	53.51%	0.1608%
Fe	23.12%	0.0960%
LE	13.02%	0.1404%
Mg	4.68%	0.1766%
Mn	2.74%	0.0340%
Si	8371	94.99
Al	4668	319.73
Ca	2359	23.95
P	2104	38.35
Cr	2037	204.60
S	1896	18.84
Nb	1653	17.48
Zn	1602	40.44
Y	1579	13.90
Ce	974	44.76
Zr	624	7.99
La	438	30.43
Ni	351	70.61
Th	324	13.11
Ta	118	36.38
Sn	68	4.03
U	57	5.96
Bi	54	13.90
Mo	25	3.17
Sb	25	4.30