

การผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ซิลิเกต



นาย เกียนไชย ต้นไทย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และธรณีวิทยาเหมืองแร่

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2533

ISBN 974-578-250-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

017226

PRODUCTION OF TITANIUM OXIDE FROM ILMENITE

Mr Tienchai Tonthai

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Mining Engineering and Mining Geology
Graduate School
Chulalongkorn University

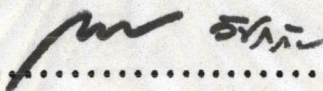
1990

ISBN 974-578-250-5

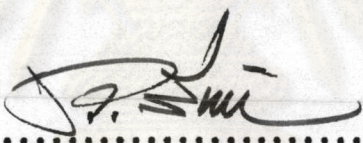


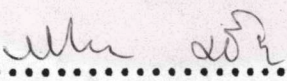
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ฮิลเมไนต์
โดย นายเทียนไชย ต้นไทย
ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และธรณีวิทยาเหมืองแร่
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญญา มีชานะ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิกรม วัชรคุปต์

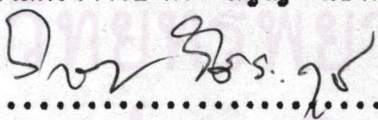
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

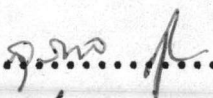
.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรากัย)

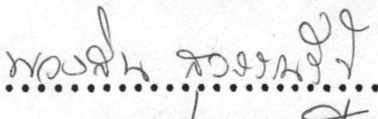
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยชัย สีเฟ่านันท์)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญญา มีชานะ)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิกรม วัชรคุปต์)

.....  กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุนทล ภู่วิจิตร)

.....  กรรมการ
(นางพวงสิน สุวรรณรัฐ)

เทียนไชย ดันไทย : การผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่อิลเมนิต์ (PRODUCTION OF TITANIUM OXIDE FROM ILMENITE) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ภิญโญ มีชำนะ, ผศ.วิกรม วัชรคุปต์, 205 หน้า. ISBN 974-578-250-5

การวิจัยการผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่อิลเมนิต์ โดยการนำตัวอย่างแร่อิลเมนิต์ที่เป็นผลแร่พลอยได้จากการแต่งมูลแร่ดิบจากโรงแต่งแร่ทางหุ่นส่วนจำกัด รุ่งอรุณตะกั่วป่า อ. ตะกั่วป่า จ. พังงา ที่มีส่วนประกอบเคมีคือ $TiO_2 = 51.86 \%$, $Fe \text{ total} = 31.98 \%$, $FeO = 22.74 \%$, $Fe_2O_3 = 20.44 \%$ และ $MnO = 4.10 \%$ ผ่านกรรมวิธีการผลิต 4 ขั้นตอนคือ การเผาออกซิเดชัน การเพาโรคักชัน การกวนที่มีการพ่นอากาศ และการชะละลายทางเคมี

การเผาออกซิเดชัน เป็นการเผาแร่เพื่อออกซิไดส์เฟอร์รัสไอออนเป็นเพอริกไอออน สภาวะที่เหมาะสมคือ การเผาที่อุณหภูมิ $1000^\circ C$. เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง เฟสของผลผลิตเป็นซูโครโคไซด์ และรูไทล์ มีส่วนประกอบเคมีคือ $TiO_2 = 51.86 \%$, $Fe \text{ total} = 31.98 \%$, $FeO = 0.99 \%$, $Fe_2O_3 = 44.62 \%$ และ $MnO = 4.10 \%$


การเพาโรคักชัน โดยใช้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่จากการเผาคาร์บอนทำการรีดิวซ์เหล็กออกไซด์ในตัวอย่างแร่ที่ผ่านการออกซิเดชัน เป็นโลหะเหล็ก สภาวะที่เหมาะสมคือ การเผาที่อุณหภูมิ $1200^\circ C$. เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง เฟสของผลผลิตเป็นซูโครโคไซด์ อะนาเทส และโลหะเหล็ก มีโลหะเหล็กที่เกิดขึ้น 23.73% ค่าเปอร์เซ็นต์การเป็นโลหะ เท่ากับ 74.20

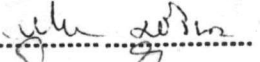
การกวนตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ที่มีการพ่นอากาศ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกวนตัวอย่างแร่ 30 กรัม ในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2% ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำหนักรวม 40 น้ำหนักต่อน้ำหนัก ๗ อุณหภูมิ $60^\circ C$. โดยใช้ความเร็วรอบในการกวน 500 รอบต่อนาที และใช้อัตราการไหลของอากาศ 15 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง เฟสของผลผลิตที่ได้เป็นซูโครโคไซด์ และอะนาเทส มีส่วนประกอบเคมีคือ $TiO_2 = 84.63 \%$, $Fe \text{ total} = 5.26 \%$, $FeO = 3.34 \%$, $Fe_2O_3 = 3.80 \%$ และ $MnO_2 = 5.29 \%$

การชะละลาย ตัวอย่างแร่ที่ผ่านการกวนที่มีการพ่นอากาศด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟิวริก การชะละลายมีผลต่อตัวอย่างแร่น้อย การชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก เฟสของผลผลิตเป็นอะนาเทส และ รูไทล์ มีส่วนประกอบเคมีคือ $TiO_2 = 87.61 \%$, $Fe_2O_3 = 3.49 \%$ และ $MnO_2 = 4.90 \%$ ที่เปอร์เซ็นต์การเก็บ TiO_2 ได้ = 98.03 สำหรับการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก เฟสของผลผลิตเป็นอะนาเทส และรูไทล์ มีส่วนประกอบเคมีคือ $TiO_2 = 88.13 \%$, $Fe_2O_3 = 3.89 \%$ และ $MnO_2 = 5.07 \%$ ที่เปอร์เซ็นต์การเก็บ TiO_2 ได้ = 94.16



ภาควิชา ...วิศวกรรมเหมืองแร่และธรณีวิทยาเหมืองแร่
สาขาวิชา ...วิศวกรรมเหมืองแร่
ปีการศึกษา 2533

ลายมือชื่อนิสิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

TIENCHAI TONTHAI : PRODUCTION OF TITANIUM OXIDE FROM ILMENITE.
THESIS ADVISOR ; ASSI.PROF.PINYO MEECHUMNA, Ph.D., ASSI.PROF.WIKROM VAJRAGUPTA.
205 PP.

Ilmenite concentrate from a tin dressing plant of Roong - Aroon Takuapa Limited Partnership, Amphoe Takuapa, Phangnga Province, was selected for this research. The sample was a by-product from tin dressing plant containing 51.86 % TiO_2 , 31.98 % Fe total, 22.74 % FeO, 20.44 % Fe_2O_3 and 4.10 % MnO. The process to produce titanium oxide includes oxidation roast, reduction roast, aeration and chemical leaching.

Oxidation roast was done to oxidise ferrous iron to ferric iron. Suitable conditions for oxidation roast were at 1000 °C for 4 hours. Phases of the roasted product were pseudobrookite and rutile containing 51.86 % TiO_2 , 31.98 % Fe total, 0.99 % FeO, 44.62 % Fe_2O_3 and 4.10 % MnO.

Reduction roast was done by carbon monoxide gas produced by carbon roasting to reduce iron oxide in oxidised ilmenite to be metallic iron. Suitable conditions for reduction roast were at 1200 °C for 4 hours. Phases produced were pseudobrookite, anatase and metallic iron. It contained 23.73 % metallic iron and percentage of metallisation was 74.20.

Aeration stage was done by stirring of reduced ilmenite in ammonium chloride with aeration. Aeration of 30 gram reduced ilmenite in 2 % ammonium chloride with 40 % solids at 60 °C with 500 rpm stirrer speed and flow rate of 15 litres per minute for 12 hours were suitable conditions for aeration. Phases of the product were pseudobrookite and anatase having chemical compositions of 84.63 % TiO_2 , 5.26 % Fe total, 3.34 % FeO, 3.80 % Fe_2O_3 and 5.29 % MnO_2 .

Leaching stage of the aerated sample was done using hydrochloric acid or sulphuric acid. Leaching had few effect on the sample. For hydrochloric acid leaching, the phases of the leached product were anatase and rutile having chemical composition of 87.61 % TiO_2 , 3.49 % Fe_2O_3 and 4.90 % MnO_2 with 98.03 % TiO_2 recovery. For sulphuric acid leaching, the leached product were anatase and rutile having chemical composition of 88.13 % TiO_2 , 3.89 % Fe_2O_3 and 5.07 % MnO_2 with 94.16 % TiO_2 recovery.

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา Mining Engineering and Mining Geology

สาขาวิชา Mining Engineering

ปีการศึกษา 2533

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชานะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิกรม วัชรคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาตลอด และ ยังได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานหรือบุคคลต่าง ๆ ด้วยดี ดังนี้

- ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ฝ่ายแต่งแร่และใช้ประโยชน์แร่ กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี
- ฝ่ายพัฒนาโลหกรรม กองโลหกรรม กรมทรัพยากรธรณี
- ฝ่ายนิสิทส์วิเคราะห์ กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คุสกุล อาจารย์พิเศษภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และธรณีวิทยาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

-น.ส. นวลรัตน์ พรหมเสถียร และ น.ส. อรนิษฐ์ แดงประไพ ผู้ช่วยเลขาธิการ ชาติต่าง ๆ ในการวิจัย

จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ได้รับเงินอุดหนุนจากกองทุนอิตาเลีย ฟาวน์เดชัน ฟอร์ด และทุนการศึกษาจากกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม จึงขอขอบพระคุณมา ณ. ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ขอขอบคุณ พี่ และเพื่อน ที่ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิทยานิพนธ์.....	3
2 อิลเมไนต์และการผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่อิลเมไนต์.....	4
2.1 แร่อิลเมไนต์.....	4
2.1.1 คุณสมบัติทางนิลิกส์และเคมีของแร่อิลเมไนต์.....	4
2.1.2 การกำเนิดของแร่อิลเมไนต์.....	6
2.1.3 แหล่งกำเนิดของแร่อิลเมไนต์.....	6
2.1.4 การใช้ประโยชน์แร่อิลเมไนต์.....	6
2.2 แร่ไทเทเนียมออกไซด์.....	7
2.2.1 แร่รูไทล์.....	7
2.2.2 แร่อะนาเทส.....	9
2.2.3 แร่บรูคไคต์.....	10
2.3 แร่อิลเมไนต์ในประเทศไทย.....	11
2.3.1 แหล่งแร่ที่เกิดร่วมกับแร่ดีบุก.....	11
2.3.2 แหล่งแร่ชายหาด.....	12
2.4 คุณสมบัติเฉพาะ (Specifications) ของแร่อิลเมไนต์ในการซื้อขาย.....	13

2.5	ผลผลิตแร่โอลิเมนไนต์และรูไทล์ในประเทศไทย.....	13
2.6	ตัวอย่างแร่โอลิเมนไนต์ที่นำมาวิจัย.....	18
2.7	การผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่โอลิเมนไนต์.....	29
2.8	กระบวนการผลิตไทเทเนียมออกไซด์จากแร่โอลิเมนไนต์ในอุตสาหกรรม.....	32
2.8.1	การผลิตสารสีไทเทเนียมออกไซด์.....	32
2.8.2	กระบวนการไทรอน.....	33
2.8.3	กระบวนการอิธิวารา.....	34
2.8.4	กระบวนการเบนนิไลต์.....	36
2.8.5	กระบวนการไซโร.....	36
2.8.6	กระบวนการมิตซูบิชิ.....	37
2.8.7	กระบวนการไฮโดรคลอริเนชั่น.....	39
2.8.8	Western Titanium Process.....	40
2.9	กระบวนการที่ใช้ในการวิจัย.....	42
3	การออกซิเดชัน.....	43
3.1	การออกซิเดชันแร่โอลิเมนไนต์ดิบ.....	43
3.2	การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการออกซิเดชัน.....	50
3.2.1	อุปกรณ์.....	50
3.2.2	วิธีการวิจัย.....	53
3.2.3	ผลการวิจัย.....	54
3.2.4	สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	54
3.3	การเตรียมตัวอย่างแร่ที่ผ่านการออกซิเดชันสำหรับขั้นตอนรีดักชัน.....	69
4	การรีดักชัน.....	79
4.1	การรีดักชันแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันมาแล้ว.....	79
4.2	การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการรีดักชัน.....	83
4.2.1	อุปกรณ์.....	83
4.2.2	สารที่ใช้ในการวิจัย.....	84
4.2.3	การคำนวณปริมาณไดคัทที่ใช้ในการรีดักชัน.....	84
4.2.4	วิธีการวิจัย.....	85
4.2.5	ผลการวิจัย.....	86
4.2.6	สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	86

4.3	การเตรียมตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักซ์สำหรับขั้นตอนการกวนที่มีการพ่นอากาศ.....	90
5	การกวนที่มีการพ่นอากาศ.....	97
5.1	การกวนที่มีการพ่นอากาศ.....	97
5.2	การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการกวนที่มีการพ่นอากาศ.....	101
5.2.1	อุปกรณ์.....	101
5.2.2	สารที่ใช้ในการวิจัย.....	102
5.2.3	วิธีการวิจัย.....	103
5.2.4	ผลการวิจัย.....	103
5.2.5	สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	103
5.3	การเตรียมตัวอย่างแร่ที่ผ่านการการกวนที่มีการพ่นอากาศสำหรับขั้นตอนการชะละลาย.....	113
6	การชะละลายแร่ที่ผ่านการกวนที่มีการพ่นอากาศมาแล้ว.....	124
6.1	การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลาย.....	128
6.1.1	อุปกรณ์.....	128
6.1.2	สารที่ใช้ในการวิจัย.....	129
6.1.3	วิธีการวิจัย.....	130
6.1.4	ผลการวิจัย.....	130
	1. การชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	130
	2. การชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	138
6.1.5	สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	146
	1. การชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	146
	2. การชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	147
7	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	155
7.1	การออกซิเดชัน.....	155
7.2	การรีดักซ์.....	156
7.3	การกวนที่มีการพ่นอากาศ.....	156
7.4	การชะละลาย.....	157
7.4.1	การชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	157
7.4.2	การชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก.....	158
7.5	ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ.....	159

เอกสารอ้างอิง.....	161
ภาคผนวก.....	170
ก การจำแนกแร่ด้วยเครื่องรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน.....	171
ข กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (เอสอีเอ็ม).....	175
ค การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ไทเทเนียม.....	178
ง การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เหล็ก.....	181
จ การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เฟอร์ริกออกไซด์.....	185
ฉ การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์แมงกานีส.....	188
ช การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเครื่องรังสีเอกซ์เรือง.....	193
ซ การวัดค่าสภาพรับแม่เหล็กไว้ได้.....	196
ณ การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์โลหะเหล็ก.....	201
ประวัติผู้เขียน.....	205

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงส่วนประกอบทางเคมีของแร่โอลิเมไนต์จากจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทย	14
2.2	คุณลักษณะเฉพาะของแร่โอลิเมไนต์จากผู้ซื้อเฉพาะราย.....	15
2.3	ผลผลิต การส่งออก การบริโภคภายในประเทศ การนำเข้า แร่โอลิเมไนต์ของประเทศไทย และมูลค่าระหว่างปี พ.ศ. 2527-2532.....	16
2.4	ผลผลิต การส่งออก การบริโภคภายในประเทศ การนำเข้า แร่รูไทล์ของประเทศไทย และมูลค่าระหว่างปี พ.ศ. 2527-2532.....	17
2.5	ผลการแยกแร่โอลิเมไนต์ด้วยเครื่องแยกแร่ไฟฟ้าแรงสูงของโรงแต่งแร่ ห.จ.ก. รุ่งอรุณตะกั่วป่า.....	20
2.6	การกระจายขนาดของแร่โอลิเมไนต์ที่นำมาวิจัยจากโรงแต่งแร่ ห.จ.ก. รุ่งอรุณตะกั่วป่า.....	21
3.1	ส่วนประกอบของแร่โอลิเมไนต์จากแหล่ง Rodsand และ Sogndal ประเทศนอร์เวย์.....	49
3.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ.....	55
3.3	ผลการวัดค่าสภาพรับแม่เหล็กไว้ได้ของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ.....	65
3.4	ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เฟอร์รัสไอออนของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ.....	67
4.1	ผลการวัดกัมมันต์ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ.....	87
5.1	ผลการเปรียบเทียบการใช้สารละลาย $2 \times \text{NH}_4\text{Cl}$ กับน้ำทะเล ในการกวนที่มี การพ่นอากาศ.....	101
5.2	ผลของเวลาในการกวนที่มี การพ่นอากาศ.....	104
5.3	ผลของอุณหภูมิในการกวนที่มี การพ่นอากาศ.....	105
5.4	ผลของความเร็วรอบของเครื่องกวนในการกวนที่มี การพ่นอากาศ.....	106
5.5	ผลของอัตราการไหลของอากาศในการกวนที่มี การพ่นอากาศ.....	107
5.6	ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียคลอไรด์ในการกวนที่มี การพ่นอากาศ.....	108
5.7	ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำหนักรวมในการกวนที่มี การพ่นอากาศ.....	109

ตารางที่	หน้า
5.8 ผลการวิเคราะห์ขนาดของผงเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการกวนที่มีการพ่นอากาศ.	122
6.1 ผลของอุณหภูมิในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	131
6.2 ผลของความเข้มข้นของกรดในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก....	132
6.3 ผลของความเร็วรอบในการกวนในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.	133
6.4 ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำหนักรวมในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	134
6.5 ผลของเวลาในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	135
6.6 ผลของอุณหภูมิในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	139
6.7 ผลของความเข้มข้นของกรดในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	140
6.8 ผลของความเร็วรอบในการกวนในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	141
6.9 ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำหนักรวมในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก	142
6.10 ผลของเวลาในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	143

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 รูปผลึกของแร่โอลิเมไนต์.....	4
2.2 (ก) โครงสร้างภาคตัดแนวตั้งของคอร์นดัมหรืออีมาไทต์แสดงเฉพาะประจุบวก (ข) โครงสร้างภาคตัดแนวตั้งของโอลิเมไนต์ แสดงเฉพาะประจุบวก.....	5
2.3 แสดงองค์ประกอบธรรมชาติของแร่ออกไซด์ในระบบ $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$	6
2.4 โครงสร้างของรูไทล์.....	7
2.5 รูปผลึกของรูไทล์.....	8
2.6 (ก) โครงสร้างของอะนาเทส (ข) รูปผลึกของอะนาเทส.....	9
2.7 (ก) โครงสร้างของบรูคไคต์ (ข) รูปผลึกของบรูคไคต์.....	10
2.8 แผนผังการแต่งแร่ดิบแบบทั่วไปในประเทศไทย.....	11
2.9 แผนผังการแต่งแร่โอลิเมไนต์ออกจากอำมแบบทั่วไป.....	12
2.10 แผนผังการแต่งแร่โอลิเมไนต์ของโรงแต่งแร่ ห.จ.ก. รุ่งอรุณตะกั่วป่า.....	19
2.11 การกระจายขนาดของแร่โอลิเมไนต์ที่นำมาวิจัยจากโรงแต่งแร่ ห.จ.ก. รุ่งอรุณ ตะกั่วป่า.....	22
2.12 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่โอลิเมไนต์ การแผ่รังสี CuK_{α_1}	23
2.13 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่โอลิเมไนต์ การแผ่รังสี CoK_{α}	24
2.14 เม็ดแร่โอลิเมไนต์ที่นำมาวิจัยถ่ายด้วยกล้องสองตา.....	25
2.15 ภาพแร่ชัดมันของแร่โอลิเมไนต์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	25
2.16 เม็ดแร่โอลิเมไนต์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	26
2.17 (ก) ภาพแร่ชัดมันของแร่โอลิเมไนต์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ข) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม (ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก (ง) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส.....	27
2.18 แผนภาพเฟสสำหรับระบบวิสไทต์-รูไทล์-อีมาไทต์.....	30
2.19 แผนผังการผลิตสารสีไทเทเนียมออกไซด์จากแร่โอลิเมไนต์.....	33
2.20 แผนผังกระบวนการไทรอน.....	34

รูปที่	หน้า	
2.21	แผนผังกระบวนการอิทธิวารา.....	35
2.22	แผนผังกระบวนการ เบนนิไลต์.....	36
2.23	แผนผังกระบวนการ ไฮโร.....	37
2.24	แผนผังกระบวนการ มิตรุบิชิ.....	38
2.25	แผนผังกระบวนการ ไฮโดรคลอรีเนชั่น.....	39
2.26	Western Titanium Process.....	41
3.1	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการออกซิเดชันอลูมิเนียม.....	44
3.2	ผลของปริมาณออกซิเจนที่มีต่อการออกซิเดชันอลูมิเนียม.....	44
3.3	ผลของขนาดเม็ดแร่ที่มีต่อการออกซิเดชันอลูมิเนียม 610 °ซ.....	45
3.4	แสดงกลไกการออกซิเดชันแร่อลูมิเนียมในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ.....	46
3.5	การกระจายของเฟสระหว่างการออกซิเดชัน.....	47
3.6	ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อการออกซิเดชันแร่อลูมิเนียม.....	48
3.7	ปริมาณเฟอร์รัสไอออนจากการออกซิเดชันแร่อลูมิเนียมแหล่ง Sogndal ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ.....	51
3.8	ถาดเซรามิก.....	52
3.9	เตาเผาแบบ Muffle.....	52
3.10	เครื่องวัดสภาพรับแม่เหล็กไว้ได้.....	53
3.11	แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิ 600 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	56
3.12	แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิ 650 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	57
3.13	แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิ 700 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	58
3.14	แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิ 750 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	59
3.15	แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิ 800 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	60
3.16	แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิ 850 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	61
3.17	แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่อลูมิเนียมที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิ 900 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	62

รูปที่	หน้า
3.18 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิตั้งที่ 950 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	63
3.19 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันอุณหภูมิตั้งที่ 1000 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ.....	64
3.20 ผลการวัดค่าสภาพรับแม่เหล็กไว้ได้ของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิตั้งที่และเวลาต่าง ๆ.....	66
3.21 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เฟอร์รัสไอออนของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิตั้งที่และเวลาต่าง ๆ.....	68
3.22 เตาหมุน.....	71
3.23 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุนที่อุณหภูมิตั้งที่ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง.....	72
3.24 แร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุนที่อุณหภูมิตั้งที่ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องสองตา.....	73
3.25 เม็ดแร่และผิวแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุนที่อุณหภูมิตั้งที่ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	74
3.26 ภาพแร่ขีดมันของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุนที่อุณหภูมิตั้งที่ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	75
3.27 (ก) ภาพแร่ขีดมันของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุนที่อุณหภูมิตั้งที่ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ข) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม (ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก (ง) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส.....	76
4.1 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันด้วยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 1000 °ซ. เวลาต่าง ๆ.....	80
4.2 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันที่อุณหภูมิตั้งที่ 1200 °ซ. เวลาต่าง ๆ.....	81
4.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันที่อุณหภูมิตั้งที่ 1100 °ซ. เวลาต่าง ๆ.....	82
4.4 เตาเผาแบบท่อ.....	83
4.5 รางเซรามิก.....	84
4.6 ตำแหน่งรางเซรามิกในท่อเตาเผาสำหรับการรีดักชัน.....	86

รูปที่	หน้า
4.7 ผลการรีดักชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน (แร่ไม่ปนโคก).....	88
4.8 ผลการรีดักชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน (แร่ปนโคก).....	88
4.9 ผลของมลทิน (1 x น้ำหนัก) ต่อการรีดักชันแร่โอลิเมไนต์ด้วยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์.....	89
4.10 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง และรีดักชันที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง.....	91
4.11 ภาพแร่ชัดเจนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	92
4.12 การกัดเพลสโลหะเหล็กของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	93
4.13 เม็ดแร่และผิวแร่ของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	94
4.14 (ก) ภาพแร่ชัดเจนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ข) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม (ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก (ง) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส.....	95
5.1 แสดงขั้นตอนการเพิ่มคุณภาพแร่โอลิเมไนต์เป็นรีดิวิซ์โอลิเมไนต์และรูไทล์สังเคราะห์.....	97
5.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ในรีดิวิซ์โอลิเมไนต์ภายหลังการกวนที่มีการพ่นอากาศ.....	98
5.3 ผลของชนิดของสารละลายที่มีต่อปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ในรีดิวิซ์โอลิเมไนต์ภายหลังการกวนที่มีการพ่นอากาศ.....	99
5.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการชะเหล็กในรีดิวิซ์โอลิเมไนต์.....	100
5.5 ผลของความเร็วยวรอบในการกวนที่มีต่อการชะเหล็กในรีดิวิซ์โอลิเมไนต์.....	101
5.6 อุปกรณ์การกวนที่มีการพ่นอากาศ.....	102
5.7 ผลของเวลาในการกวนที่มีการพ่นอากาศที่มีต่อการลด % Fe total.....	110
5.8 ผลของอุณหภูมิในการกวนที่มีการพ่นอากาศที่มีต่อการลด % Fe total.....	110

รูปที่	หน้า
5.9 ผลของความเร็วรอบของเครื่องกว่นในการกว่นที่มีการพ่นอากาศที่มีต่อการลด % Fe total.....	111
5.10 ผลของอัตราการไหลของอากาศในการกว่นที่มีการพ่นอากาศที่มีต่อการลด % Fe total.....	111
5.11 ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียมคลอไรด์ในการกว่นที่มีการพ่นอากาศที่มีต่อการลด % Fe total.....	112
5.12 ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำหนักรวมในการกว่นที่มีการพ่นอากาศที่มีต่อการลด % Fe total.....	112
5.13 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง การรีดักชันที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง และการกว่นที่มีการพ่นอากาศ.....	115
5.14 เม็ดแร่และผิวแร่ของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการกว่นที่มีการพ่นอากาศด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	117
5.15 ภาพแร่ชัดเจนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการกว่นที่มีการพ่นอากาศถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	118
5.16 (ก) ภาพแร่ชัดเจนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการกว่นที่มีการพ่นอากาศถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ข) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม (ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก (ง) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส.....	119
5.17 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของเหล็กออกไซด์ที่เกิดจากการกว่นที่มีการพ่นอากาศ.....	121
5.18 ผลการวิเคราะห์ขนาดของผงเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการกว่นที่มีการพ่นอากาศ..	123
6.1 ผลของอัตราการรีดักชันที่มีต่อการชะละลายแร่.....	125
6.2 ผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่มีต่อการชะละลายแร่.....	125
6.3 ผลของการออกซิเดชันและรีดักชันที่มีต่อการชะละลายโอลิเมไนต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	126
6.4 ผลของอุณหภูมิในการออกซิเดชันที่มีต่ออัตราการชะละลาย.....	127
6.5 ผลของอุณหภูมิในการรีดักชันที่มีต่ออัตราการชะละลาย.....	128
6.6 อุปกรณ์การชะละลายด้วยกรด.....	129
6.7 ผลของอุณหภูมิในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	136

รูปที่	หน้า
6.8 ผลของความเข้มข้นของกรดในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	136
6.9 ผลของความเร็วรอบในการกวนในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก..	137
6.10 ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำหนักรวมในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	137
6.11 ผลของเวลาในการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	138
6.12 ผลของอุณหภูมิในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	144
6.13 ผลของความเข้มข้นของกรดในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	144
6.14 ผลของความเร็วรอบในการกวนในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	145
6.15 ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำหนักรวมในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก	145
6.16 ผลของเวลาในการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	146
6.17 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	148
6.18 (ก) ตัวอย่างแร่ที่ผ่านการชะละลายเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	
(ข) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม	
(ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก	
(ง) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส.....	149
6.19 แบบอย่างรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริก.....	151
6.20 (ก) ตัวอย่างแร่ที่ผ่านการชะละลายเหล็กด้วยกรดซัลฟิวริกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	
(ข) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม	
(ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก	
(ง) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส.....	153
ก.1 แสดงความยาวคลื่นที่ใช้สำหรับในงานวิเคราะห์ต่าง ๆ.....	171
ก.2 แสดงหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	172
ก.3 เครื่องรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนชนิดหัตถ์.....	173
ข.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง.....	176
จ.1 การผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลงในชาวรูปกรวย.....	186
ช.1 แผนภาพเครื่องรังสีเอกซ์เรือง.....	193
ช.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพรับแม่เหล็กไว้ได้กับปริมาณแมงกานีไทต์.....	197

รูปที่

หน้า

๕.๒ ส่วนประกอบของเครื่องวัดสภาพรับแม่เหล็กไว้ได้ยี่ห้อ Bison รุ่น 3101..... 198



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย