จลนพลศาสตร์ของการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยเฟอร์รัสคลอไรด์

นายบดีพล รุ่งเรืองธรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรราศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543
ISBN 974-13-0374-2
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

KINETICS OF MANGANESE LEACHING FROM PYROLUSITE BY FERROUS CHLORIDE

Mr. Bordeephol Rungruangthum

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0374-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	จลนพลศาสตร์ของการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยเฟอร์รัสคลอไรด์
โดย	นายบดีพล รุ่งเรืองธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคร จารุพิสิฐธร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคร จารุพิสิฐธร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บดีพล รุ่งเรืองธรรม : จลนพลศาสตร์ของการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยเฟอร์รัสคลอไรด์.(KINETICS OF MANGANESE LEACHING FROM PYROLUSITE BY FERROUS CHLORIDE) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ชาคร จารุพิสิฐธร, 96 หน้า. ISBN 974-13-0374-2.

งานวิจัยนี้ศึกษาการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ของเหมืองหนองสองห้อง จังหวัดเชียงราย ด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ในกรดไฮโดรคลอริก ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอัตราการกวน อุณหภูมิตั้งแต่ 33 องศาเซลเซียส ถึง 90 องศาเซลเซียส ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายตั้งแต่ 0.5 ถึง 3.0 โมลต่อลิตร ขนาดเม็ดแร่ และเปอร์เซ็นต์ของแข็งไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองพบว่า การใช้อุณหภูมิและปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์เพิ่มขึ้นมีผลให้ได้เปอร์เซ็นต์การสกัดแมงกานีสจากแร่เพิ่มขึ้น พลังงานกระตุ้นที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 3.88 กิโลจูลต่อโมล (0.92 กิโลแคลอรีต่อโมล) อันดับของปฏิกิริยาในแง่ความเข้มข้นของเฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับ 0.83 ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ไม่มีผลต่ออัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาในการศึกษานี้ ขนาดเม็ดแร่ที่เล็กลงช่วยให้อัตราเร็วในการละลายแมงกานีสสูงขึ้น ในขณะที่การใช้เปอร์เซ็นต์ของแข็งมากขึ้นทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การสกัดแมงกานีสลดลง กลไกในการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามแบบจำลองการเกิดนิวเคลียสและการโตขึ้นของเกรน และกรรมวิธีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้สกัดแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมโลหการ	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2543	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170379621 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD: KINETICS / MANGANESE / LEACHING / PYROLUSITE / FERROUS CHLORIDE

BORDEEPHOL RUNGRUANGTHUM : KINETICS OF MANGANESE LEACHING FROM PYROLUSITE BY FERROUS CHLORIDE. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF. SUMALEE VONGCHAN,Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. CHARKORN JARUPISITTHORN,M.E. 96 pp. ISBN 974-13-0374-2.

Kinetics of manganese leaching from pyrolusite of Nhong Shong Hong mine, Chaing Rai province by ferrous chloride in hydrochloric acid was investigated. The variables studied included stirring speed, reaction temperature of 33 degree celcius to 90 degree celcius, amount of ferrous chloride and ferric chloride, hydrochloric acid concentrations of 0.5 to 3.0 M, various particle sizes and percent solid up to 10 percent.

The results indicate that the rate of manganese leaching from pyrolusite increases with increased reaction temperature and increased amount of ferrous chloride. The activation energy was measured to be 3.88 KJ/mol (0.92 Kcal/mol). The reaction order with respect to ferrous chloride concentration was determined to be 0.83. Ferric chloride concentration does not affect the rate in this study. With decreased particle size of pyrolusite the rate of leaching increases. But with increased percent solid in the leaching solution, the rate of manganese extraction decreases. The reaction mechanism follows nucleation and grain growth model. This process can be applied to extract manganese from pyrolusite.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Metallurgical Engineering	Student's signature…….
Field of study Metallurgical Engineering	Advisor's signature…….
Academic year 2000	Co-advisor's signature……...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคร จารุพิสิฐธร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมซึ่งให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆในการวิจัยตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโลหการและประธานคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่ได้ให้คำแนะนำ และความรู้ต่องานวิจัยฉบับนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณบุคคลที่ได้ให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกระหว่างปฏิบัติงานวิจัยในแต่ละขั้นตอนอย่างดียิ่งดังต่อไปนี้ คุณจิตตพงศ์ สระชิต วิศวกร กองเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกๆท่าน

ท้ายนี้ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลรอบข้างที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือเสมอมา

บดีพล รุ่งเรืองธรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ฌ

สารบัญรูป.....ฎ

คำอธิบายย่อ.....ฒ

บทที่.....1

1. บทนำ.....1
   - 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....1
   - 1.2 วัตถุประสงค์.....3
   - 1.3 ขอบเขตการศึกษา.....3
   - 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3
2. ปริทัศน์วรรณกรรม.....4
3. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....9
   - 3.1 การเตรียมแร่แมงกานีส.....9
   - 3.2 การตรวจวิเคราะห์แร่ที่ใช้ในการทดลอง.....9
   - 3.3 การละลายแร่ด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริก.....9
   - 3.4 การตรวจสอบกากแร่หลังผ่านการละลาย.....10
   - 3.5 รายละเอียดเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบจากตัวแปร.....11
4. ผลการทดลองและอภิปราย.....16
   - 4.1 ผลวิเคราะห์แร่ที่ใช้ในการทดลอง.....16
   - 4.2 การละลายแร่ด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริก.....19
   - 4.3 ผลการตรวจวิเคราะห์แร่ที่ใช้ภายหลังทำการทดลอง.....36
5. สรุปผลการทดลอง.....38
6. ข้อเสนอแนะ.....39

หน้า

รายการอ้างอิง.....40
ภาคผนวก.....42
ภาคผนวก ก.....43
ภาคผนวก ข.....52
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 ปริมาณการละลายแมงกานีสที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ.....6

3.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากอัตราการกวน.....11

3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ.....12

3.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากปริมาณของเฟอร์รัสคลอไรด์.....12

3.4 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากปริมาณของเฟอร์ริกคลอไรด์.....13

3.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก.....14

3.6 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของขนาดเม็ดแร่.....14

3.7 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์ของแข็ง.....15

4.1 การกระจายขนาดของแร่แมงกานีสภายหลังการคัดขนาด.....16

4.2 อัตราเร็วของการละลายเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ผสมเฟอร์รัสคลอไรด์ 1 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....21

4.3 อัตราเร็วการละลายเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเฟอร์รัสคลอไรด์ต่างๆ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....25

ข-1-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 100 รอบต่อนาที...54

ข-1-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 300 รอบต่อนาที...55

ข-1-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที...56

ข-1-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 750 รอบต่อนาที...57

ข-1-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที...58

ข-1-6 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 100 รอบต่อนาที...59

ข-2-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....61

ข-2-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....62

ข-2-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....63

ข-2-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....64

ตารางที่ หน้า

ข-2-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....65
ข-2-6 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส.....66
ข-3-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 0.25 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี.....68
ข-3-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 0.50 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี.....69
ข-3-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 0.75 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี.....70
ข-3-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 1.00 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี.....71
ข-3-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 1.25 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี.....72
ข-4-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 0.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์.....74
ข-4-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 1.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์.....75
ข-4-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 1.5 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์.....76
ข-4-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 3.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์.....77
ข-4-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 5.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์.....78
ข-5-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลต่อลิตร.....80
ข-5-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.0 โมลต่อลิตร.....81
ข-5-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.5 โมลต่อลิตร.....82

ตารางที่ หน้า

ข-5-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.0 โมลต่อลิตร.....83
ข-5-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลต่อลิตร.....84
ข-5-6 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3.0 โมลต่อลิตร.....85
ข-6-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –45+65 เมช...87
ข-6-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –65+100 เมช.....88
ข-6-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช.....89
ข-6-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –150+200 เมช.....90
ข-6-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –200+270 เมช.....91
ข-7-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 5 เปอร์เซ็นต์.....93
ข-7-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร.....94
ข-7-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 3.5 โมลต่อลิตร.....95

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงปริมาณการละลายแมงกานีสกับตัวแปรต่างๆ (ก) เวลา (ข) ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (ค) ขนาดเม็ดแร่ (ง) อุณหภูมิ.....5

2.2 แสดงเปอร์เซ็นการละลายของแมงกานีส ที่ปริมาณแร่แมงกานีสไดออกไซด์ 100 กรัม ขนาด –30 ถึง +60 เมช ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดย A, B, C และ D แสดงความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนในรูปของแมกนีเซียมคลอไรด์ตั้งแต่ 5, 7, 8 และ 9 กรัมอิออนต่อลิตร ตามลำดับ.....7

3.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....10

4.1 แสดงรูปร่างของเม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 350 เท่า.....17

4.2 ผลการตรวจสอบตัวอย่างแร่แมงกานีสด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์.....18

4.3 ปริมาณการละลายแมงกานีสต่อเวลาที่อัตราการกวนต่างๆ สภาวะความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....19

4.4 สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ สภาวะซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์ 1 เท่าของปริมาณ สตอยชีโอเมตรี ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....21

4.5 อาร์รีเนียสพล็อตสำหรับปฏิกิริยาการละลายแมงกานีส ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์ 1 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....22

4.6 สัดส่วนการละลายแมงกานีสเป็นฟังก์ชั่นของเวลาที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ต่างๆ ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....24

4.7 แสดงอันดับปฏิกิริยาในแง่ความเข้มข้นเฟอร์รัสคลอไรด์.....25

รูปที่ หน้า

4.8 สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายเป็นฟังก์ชันของเวลาที่อัตราส่วนของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ต่างๆ ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....27

4.9 สัดส่วนการละลายของแมงกานีสเป็นฟังก์ชันของเวลาที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่างๆ สภาวะอันได้แก่ เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....28

4.10 สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายเป็นฟังก์ชันของเวลา ที่สภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....29

4.11 สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายเป็นฟังก์ชันของเวลาที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และ ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกต่างๆ ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที.....30

4.12 กราฟระหว่าง $1-(2/3)F-(1-F)^{2/3}$ กับเวลา สำหรับขนาดเม็ดแร่ต่างๆ ที่สภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....32

4.13 กราฟระหว่าง $\log (\ln (1/(1-F)))$ กับ $\log (t)$ สำหรับขนาดเม็ดแร่ต่างๆ ที่สภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....34

รูปที่ หน้า

4.14 กราฟระหว่าง log (ln (1/(1-F))) กับ log (t) สำหรับอุณหภูมิต่างๆ ที่สภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์.....35

4.15 กากแร่ที่เหลือจากการละลายแร่แมงกานีสที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 350 เท่า.....36

4.16 ผลเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันของกากแร่ที่เหลือจากการละลายแร่แมงกานีสที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....37

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
F	manganese fraction reacted	สัดส่วนของแมงกานีสที่ถูกละลาย
V	initial rate	อัตราเร็วของการละลายเริ่มต้น
t	time	เวลา
T	temperature	อุณหภูมิ
E_a	activation energy	ค่าพลังงานกระตุ้น
R	gas constant	ค่าคงที่ก๊าซ
K	rate constant	ค่าคงที่ของอัตราเร็ว
C	ferrouschloride concentration	ความเข้มข้นของเฟอร์รัสคลอไรด์
N	order of reaction	อันดับของปฏิกิริยา
M	power	เลขชี้กำลัง
k’	rate constant	ค่าคงที่ของอัตราเร็ว
ΔG°	standard free energy change	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน
[ ]	ion concentration (molar)	ความเข้มข้นของอิออนเป็นโมลาร์
ΔH°	standard enthalpy change	การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

แร่แมงกานีสเป็นธาตุที่เกิดอยู่ร่วมกับธาตุอื่นๆ ในธรรมชาติ เป็นธาตุที่มีความสมบูรณ์จัดอยู่ในลำดับที่ 12 ของธาตุที่มีอยู่ในโลก มีปริมาณกระจายอยู่ตามเปลือกโลกประมาณ 0.085 เปอร์เซ็นต์[1] แร่แมงกานีสที่พบในธรรมชาติมีหลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ปริมาณแมงกานีส แหล่งกำเนิด สิ่งมลทินที่เจือปน และคุณสมบัติทางกายภาพ แร่แมงกานีสที่สำคัญอยู่ในรูปของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดในไพโรลูไซต์ (pyrolusite) นอกจากนี้ยังมีแร่แมงกานีสชนิดอื่นที่สำคัญรองลงมา เช่น ไซโลมีเลน (psilomelane) สูตรทางเคมีคือ $BaMn.Mn_8O_{16}(OH_4)$ โรโดโครไซต์ (rhodochrosite) สูตรทางเคมีคือ $MnCO_3$ แมงกาไนต์ (manganite) สูตรทางเคมีคือ $Mn_2O.3H_2O$ เป็นต้น[2,3]

แหล่งผลิตแร่แมงกานีสที่สำคัญได้แก่ ประเทศรัสเซีย สาธารณรัฐอาฟริกาใต้ บราซิล อินเดีย และจีน[1] ส่วนในประเทศไทยมีเหมืองแร่แมงกานีสอยู่หลายที่ เช่น จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน นาราธิวาส เลย เป็นต้น[4,5]

แร่แมงกานีสแบ่งชนิดตามลักษณะการใช้งานโดยแบ่งเป็น 3 เกรด ตามมาตรฐานของ Minerals for the chemical and allied industries[6]

1. แร่แมงกานีสเกรดโลหกรรม (metallurgical grade) เป็นแร่ที่มีความเหมาะสมในการทำเฟอร์โรแมงกานีสที่ใช้ในการทำโลหะผสม และใช้ประโยชน์ในด้านเคมีที่ไม่ต้องการปริมาณแมงกานีสสูงนัก

2. แร่แมงกานีสเกรดแบตเตอรี่ (battery grade) หมายถึง แร่แมงกานีสในธรรมชาติ และแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ ที่นำไปใช้ในการทำถ่านไฟฉาย (dry cell) แบ่งออกเป็นหลายเกรด คือ แมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ เกรด A ประกอบด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ 85 เปอร์เซ็นต์ แร่แมงกานีสไดออกไซด์เกรด A มีแมงกานีสไดออกไซด์อย่างน้อย 75 เปอร์เซ็นต์ และเกรด B มีแมงกานีสไดออกไซด์อย่างน้อย 68 เปอร์เซ็นต์

3. แร่แมงกานีสเกรดเคมี (chemical grade) แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิด A ใช้เป็นตัวเติมออกซิเจนในกระบวนการทางเคมีเช่น การผลิต hydroquinone และชนิด B ใช้ในการผลิต ด่างทับทิม (โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต) และเปอร์แมงกาเนตชนิดอื่นๆ

ในประเทศไทยซึ่งมิได้เป็นประเทศอุตสาหกรรมนั้นการบริโภคหรือนำแร่แมงกานีสมาใช้ภายในประเทศส่วนใหญ่จึงเน้นไปทางด้านอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่โลหกรรม (Non-metallurgical industry) ได้แก่อุตสาหกรรมทำถ่านไฟฉายเป็นสำคัญ แต่ในปัจจุบันแร่แบตเตอรี่เกรดดังกล่าวข้างต้น กำลังประสบปัญหาหลายๆ ด้าน เหมืองบางแหล่งใกล้จะหมด บางแหล่งมีมากแต่มีคุณภาพต่ำ บางแหล่งประสบปัญหาในการทำกิจการเหมือง จึงจำเป็นต้องนำแร่จากต่างประเทศ เช่น ญี่ปุ่น จีน เบลเยี่ยม[7] เข้ามาใช้ภายในประเทศ และมีแนวโน้มจะสูงขึ้นในอนาคตทำให้เสียดุล การค้าเพิ่มขึ้น

จากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีพบว่าแหล่งแร่แมงกานีสเกรดโลหกรรมภายในประเทศมีอยู่หลายแห่งที่มีความอุดมสมบูรณ์ แต่แร่ชนิดนี้ส่วนมากถูกส่งขายไปยังต่างประเทศในสภาพแร่ดิบ ราคาแร่ค่อนข้างต่ำ[6] จึงมีการค้นคว้าทดลองหาวิธีผลิตแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ หรือ synthetic manganese dioxide[4] โดยแปรสภาพจากแร่แมงกานีสเกรดโลหกรรมมาเป็นแมงกานีสไดออกไซด์เกรดแบตเตอรี่ ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบสำหรับ อุตสาหกรรมถ่านไฟฉาย ทั้งยังเพิ่มมูลค่าของแร่ และลดการทิ้งแร่ไปโดยเปล่าประโยชน์
กรรมวิธีการผลิตแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 วิธี[4] คือ

1. electrolytic precipitation process เป็นการผลิตแมงกานีสไดออกไซด์ โดยกรรมวิธีแยกสารละลายแมงกานีสซัลเฟตด้วยกระแสไฟฟ้า

2. chemical precipitation process เป็นการผลิตแมงกานีสไดออกไซด์ โดยกรรมวิธีตกตะกอนในรูปแมงกานีสคาร์บอเนตก่อนเผาให้สลายตัวเป็นแมงกานีสไดออกไซด์

เนื่องจากกรดซัลฟูริกละลายแมงกานีสไดออกไซด์ในวัตถุดิบได้ยาก ดังนั้นในการสกัดแมงกานีสจากไพโรลูไซด์จึงต้องทำการย่างรีดิวซ์ (reducing roast) เพื่อเปลี่ยนรูปแมงกานีสไดออกไซด์เป็นแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ก่อนจึงจะละลายด้วยกรดซัลฟูริกได้

อย่างไรก็ตามการละลายแร่แมงกานีสออกจากแมงกานีสไดออกไซด์สามารถทำได้โดยตรงเมื่อใช้ตัวรีดิวซ์ร่วมในสารละลายกรดซัลฟูริกด้วย เช่นเฟอร์รัสซัลเฟต ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนการย่างแร่ได้และอาจนำ pickling solution ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานเหล็กมาใช้ในการละลายแร่ได้เนื่องจากสารละลายดังกล่าวมีเฟอร์รัสซัลเฟต หรือเฟอร์รัสคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ

ในการศึกษานี้จะใช้สารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์เป็นตัวละลายแมงกานีสจากโพโรลูไซต์ โดยศึกษาในแง่ความเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในกลไกการเกิดปฏิกิริยาการละลายแมงกานีสจากแร่แมงกานีสไดออกไซด์ด้วยสารละลายดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์

1.เพื่อศึกษาความเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์

2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยสารละลาย เฟอร์รัสคลอไรด์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ทำการทดลองเพื่อหาอัตราการกวนตั้งแต่ 100 รอบต่อนาที เพื่อให้ได้อัตราการกวนที่เหมาะสม

2. ทำการทดลองเพื่อหาผลของอุณหภูมิ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 90 องศาเซลเซียส

3. ทำการทดลองเพื่อหาผลของปริมาณของเฟอร์รัสคลอไรด์ ตั้งแต่ 0.25 ถึง 1.25 เท่าของปริมาณที่ต้องใช้ในสมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

4. ทำการทดลองเพื่อหาผลของปริมาณของเฟอร์ริกคลอไรด์ ตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ที่ใช้

5. ทำการทดลองเพื่อหาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ตั้งแต่ 0.5 ถึง 3 โมลต่อลิตร

6. ทำการทดลองเพื่อหาผลของขนาดเม็ดแร่ ตั้งแต่ –45 ถึง +270 เมช

7. ทำการทดลองเพื่อหาผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งตั้งแต่ 0.4 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ทราบถึงจลนพลศาสตร์ในการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ที่ผสมกรดไฮโดรคลอริก

2. ช่วยให้ทราบถึงอัตราการกวน อุณหภูมิ ปริมาณของเฟอร์รัสคลอไรด์ ปริมาณของเฟอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ขนาดเม็ดแร่ และเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่เหมาะสมในการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์

3. เป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแมงกานีสจากแร่แมงกานีสเกรด โลหกรรมภายในประเทศไทย

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรม

Hydrometallurgy[8] เป็นส่วนหนึ่งของโลหวิทยาว่าด้วยการสกัด และการละลายของโลหะ โดยใช้สารละลายหรือสารประกอบอินทรีย์ ขั้นตอนของ hydrometallurgy ประกอบด้วยการละลายแร่ (โดยมากมักเป็นแร่เกรดต่ำ) เพื่อจะละลายโลหะ การแยกสารละลายที่ได้ออกจากกากแร่ และการนำเอาโลหะที่ละลายออกมาจากสารละลาย

โดยปกติกระบวนการละลายในระบบของโลหวิทยาสารละลาย[9] ปรากฏเป็นสามขั้นตอน คือ

1. การแพร่ของสารตั้งต้นผ่านผลผลิตของแข็ง (product layer) หรือผ่านชั้นของ สารละลาย (boundary layer)

2. การเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือเรียกว่าปฏิกิริยาที่ผิว (surface reaction)

3.การแพร่ของผลผลิตที่ละลายได้ออกจากผิวที่ทำปฏิกิริยา

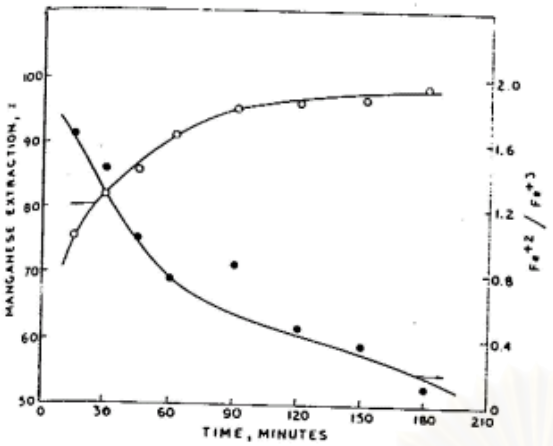
ที่สภาวะของการทดลองแต่ละชุด หนึ่งในขั้นตอนเหล่านี้ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (rate limiting step)

จากความรู้ด้าน hydrometallurgy นี้ทำให้เกิดการศึกษา และการทดลองเกี่ยวกับการละลายแร่เกรดต่ำ หรือฝุ่นที่เกิดจากการถลุงโลหะ โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลาย เป็นต้น

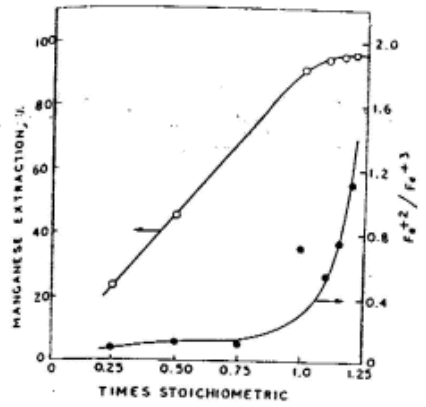
Das และคณะ[10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสกัดแร่แมงกานีสไดออกไซด์เกรดต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์แมงกานีส โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตผสมกรดซัลฟูริก จะเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1)

$$MnO_2 + 2FeSO_4 + 2H_2SO_4 = MnSO_4 + Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \qquad (2.1)$$

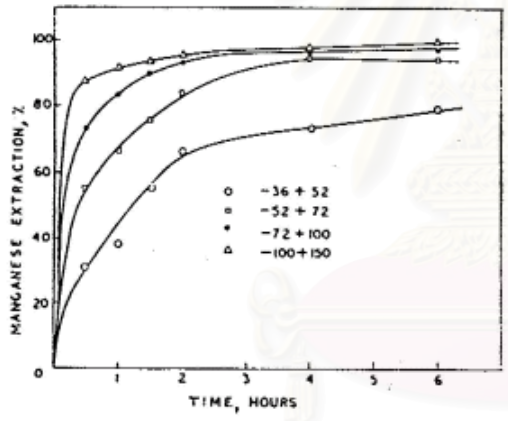
พบว่าสามารถละลายแมงกานีสได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ขนาดเม็ดแร่ –100 เมช ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในปริมาณที่ต้องใช้ตามปฏิกิริยาเคมี ที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเป็น 1 ต่อ 10 ผลของเวลา ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต ขนาดเม็ดแร่ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ต่อการสกัดแมงกานีสเป็นไปตามรูปที่ 2.1(ก) ถึง 2.1(ง) และ ตารางที่ 2.1 ตามลำดับ



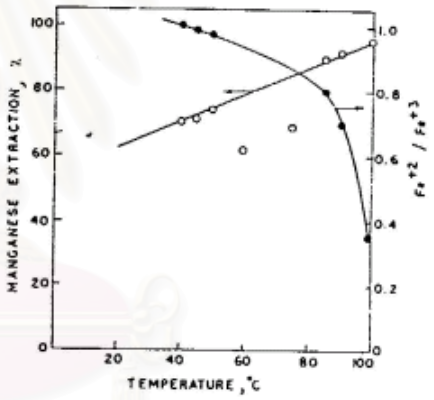
2.1(ก)



2.1(ข)



2.1(ค)



2.1(ง)

รูปที่ 2.1 แสดงปริมาณการละลายแมงกานีสกับตัวแปรต่างๆ (ก) เวลา (ข) ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (ค) ขนาดเม็ดแร่ (ง) อุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการละลายแมงกานีสที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ

Concentration of sulphuric acid g/l	Manganese extraction, %	Remarks
0	90.2	Formation of thick gel
9.2	90.2	
18.4	91.2	
46.01	92.1	
92.01	94.2	Formation of thin gel
147.0	96.8	No gel formation

Scaife และคณะ[11] ทำการวิจัยพัฒนาการผลิตแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์เกรดแบตเตอรี่จากแร่แมงกานีสเกรดต่ำ โดยใช้วิธี BHP CMD โดยการละลายแร่ขนาด –100 เมช ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกผสมโลหะคลอไรด์ เช่น แมกนีเซียมคลอไรด์ (pH 1 ถึง 2) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จะได้สารละลายแมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$) ตามสมการที่ (2.2)

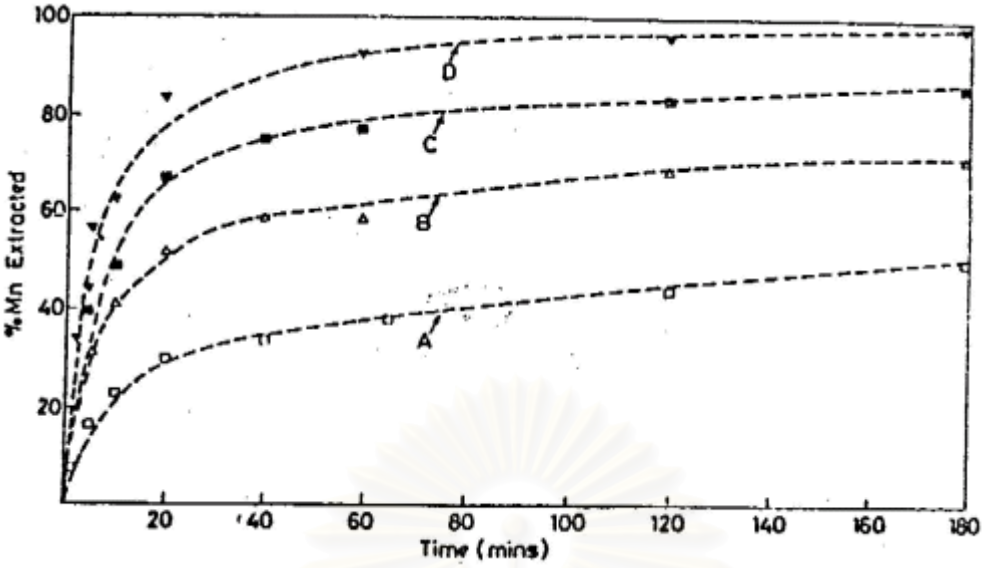
$$MnO_2 + 4HCl = MnCl_2 + 2H_2O + Cl_2 \qquad (2.2)$$

หลังจากนั้นปรับค่า pH ขึ้นเป็น 4 ถึง 5 โดยการเติมแมกนีเซีย (MgO) เพื่อให้โลหะอื่นเช่นเหล็กตกตะกอน และกรองออก ส่วนสารละลายแมงกานีสคลอไรด์นำไปผ่านก๊าซคลอรีนเพื่อตกตะกอนเป็นแมงกานีสไดออกไซด์ ตามสมการที่ (2.3)

$$MnCl_2 + Cl_2 + 2H_2O = MnO_2 + 4HCl \qquad (2.3)$$

กรองแมงกานีสไดออกไซด์ออก ล้างแล้วทำให้แห้ง รูปที่ 2.2 แสดงผลของความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนในสารละลายต่อเปอร์เซ็นต์การละลายของแมงกานีส โดยปริมาณการละลายของแมงกานีสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคลอไรด์อิออนเพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 แสดงเปอร์เซ็นการละลายของแมงกานีส ที่ปริมาณแร่แมงกานีสไดออกไซด์ 100 กรัม ขนาด –30 ถึง +60 เมช ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดย A, B, C และ D แสดงความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนในรูปของแมกนีเซียมคลอไรด์ ตั้งแต่ 5, 7, 8 และ 9 กรัมอิออนต่อลิตร ตามลำดับ

ในส่วนของประเทศไทยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการสกัดแร่แมงกานีสอยู่บ้าง พวงสิน สุวรรณรัฐ[4] ได้ทดลองผลิตแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ ด้วยวิธี electrolytic precipitation และ chemical precipitation process ได้ปริมาณการสกัดแมงกานีสประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยแมงกานีสส่วนหนึ่งสูญเสียอยู่ในกากแร่ที่ผ่านการย่างแล้ว อีกส่วนหนึ่งสูญเสียไปจากการปรับค่า pH ขณะไล่มลทิน

วิชิต วิชิตอมรพันธ์ และ สมบูรณ์ รอดเกิด[5] ค้นคว้าวิจัยผลิตแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ จากแร่แมงกานีสเกรดต่ำ (ปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์ประมาณ 50 ถึง 55 เปอร์เซ็นต์) และจากแร่แมงกานีสเกรดสูง (ปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์) แต่ไม่มีคุณสมบัติทางแบตเตอรี่ โดยใช้วิธี activated manganese dioxide โดยนำแร่ทั้งสองเกรดมาบดคัดขนาด -200 เมช นำไปผสมถ่านไม้แล้วเผาในเตาไฟฟ้าประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่เผาได้มาเทลงในกรดซัลฟูริกความเข้มข้นประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ กวนนานประมาณ 2 ชั่วโมง ในกรดร้อนที่อุณหภูมิ 120 ถึง 150 องศาเซลเซียส เสร็จแล้วทิ้งสารประกอบแมงกานีสผสมกรดไว้ให้เย็น ปล่อยให้กรดทำปฏิกิริยาต่อไปอีก 1 ถึง 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองเอาสารละลายแมงกานีสซัลเฟตออก แล้วนำสารประกอบแมงกานีสที่เหลือไปล้างน้ำให้สะอาด เพื่อปรับค่า pH ให้อยู่ที่ 5 ถึง 5.5 เพื่อเอาเหล็กออกไซด์ออก ผลการตรวจสอบพบว่า ปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์

ของแร่แมงกานีสเกรดต่ำที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วอยู่ในช่วง 65 ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์ของแร่แมงกานีสเกรดสูงที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วอยู่ในช่วง 67 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ที่ได้มีคุณสมบัติดีสามารถนำไปทำถ่านไฟฉายได้

ภาณุมาศ ขาวสุวรรณศรี[7] ได้ศึกษาการละลายของแมงกานีสออกจากไพโรลูไซต์ โดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตในสภาวะที่เป็นกรด ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ เวลา ขนาดเม็ดแร่ ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต อุณหภูมิ และปริมาณกรดซัลฟูริก พบว่าการเพิ่มเวลา ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต และอุณหภูมิ เป็นผลให้ปริมาณการละลายแมงกานีสเพิ่มขึ้น การลดขนาดเม็ดแร่เป็นผลให้ปริมาณการละลายแมงกานีสเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่การเพิ่มปริมาณกรดซัลฟูริกไม่มีผลต่อการละลายของแมงกานีส

แม้ว่าแมงกานีสไดออกไซด์สามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกแต่ต้องใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกค่อนข้างสูง การใช้เฟอร์รัสคลอไรด์ร่วมกับกรดไฮโดรคลอริกสามารถละลายแมงกานีสไดออกไซด์ได้เช่นเดียวกับการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตผสมกรดซัลฟูริกตามสมการที่ (2.4)

$$MnO_2 + 2FeCl_2 + 4HCl = MnCl_2 + 2FeCl_3 + 2H_2O \qquad (2.4)$$

งานวิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการใช้สารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริกในการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศที่จำเป็นต้องใช้ pickling solution ในการขจัดสนิมบนเหล็ก นิยมใช้ pickling solution ที่เป็นกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจะได้สารละลายของเสียที่มีเฟอร์รัสคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมแร่แมงกานีส

แร่แมงกานีสที่ใช้ในการทดลองได้จากเหมืองหนองสองห้อง จังหวัดเชียงราย โดยนำมาบดด้วยเครื่องบดจอว์ครัชเชอร์ (jaw crusher) และโรลครัชเชอร์ (roll crusher) ตามลำดับ แล้วอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำไปคัดขนาดด้วยตะแกรงคัดให้มีขนาดต่างๆ

3.2 การตรวจวิเคราะห์แร่ที่ใช้ในการทดลอง

รูปร่างของเม็ดแร่ที่ใช้ในการทดลองตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (scanning electron microscope) การตรวจสอบสารประกอบต่างๆ ในแร่กระทำด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (x-ray diffractometer) การหาส่วนประกอบทางเคมีของแร่ใช้การวิเคราะห์ทางเคมี

3.3 การละลายแร่ด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริก

การทดลองละลายแร่กระทำในภาชนะทำปฏิกิริยาแก้วมีฝาครอบซึ่งมีช่องเปิดสี่ช่อง ช่องกลางใช้สอดใบพัดกวนที่ทำด้วยแก้ว ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของสารละลายตลอดเวลาที่ทดลอง ช่องเปิดอีกช่องหนึ่งติดตั้งรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์เพื่อลดการสูญเสียสารละลายเนื่องจากการระเหย ใช้ฮีทติ้งแมนเทิลเป็นตัวให้ความร้อนแก่ภาชนะทำปฏิกิริยาโดยควบคุมความร้อนให้สารละลายมีอุณหภูมิที่กำหนด โดยติดตั้งอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1 สำหรับกรดไฮโดรคลอริกและเฟอร์รัสคลอไรด์ที่ใช้เป็นเกรดเคมีความบริสุทธิ์ต่ำสุด 99 เปอร์เซ็นต์ ลำดับการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. ชั่งแร่ตามจำนวนที่กำหนด

2.เตรียมสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นที่กำหนดจำนวน 500 มิลลิลิตร

3.ใส่สารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริกในภาชนะทำปฏิกิริยา ปิดฝาครอบและติดตั้งรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์และเครื่องกวน เริ่มให้ความร้อน

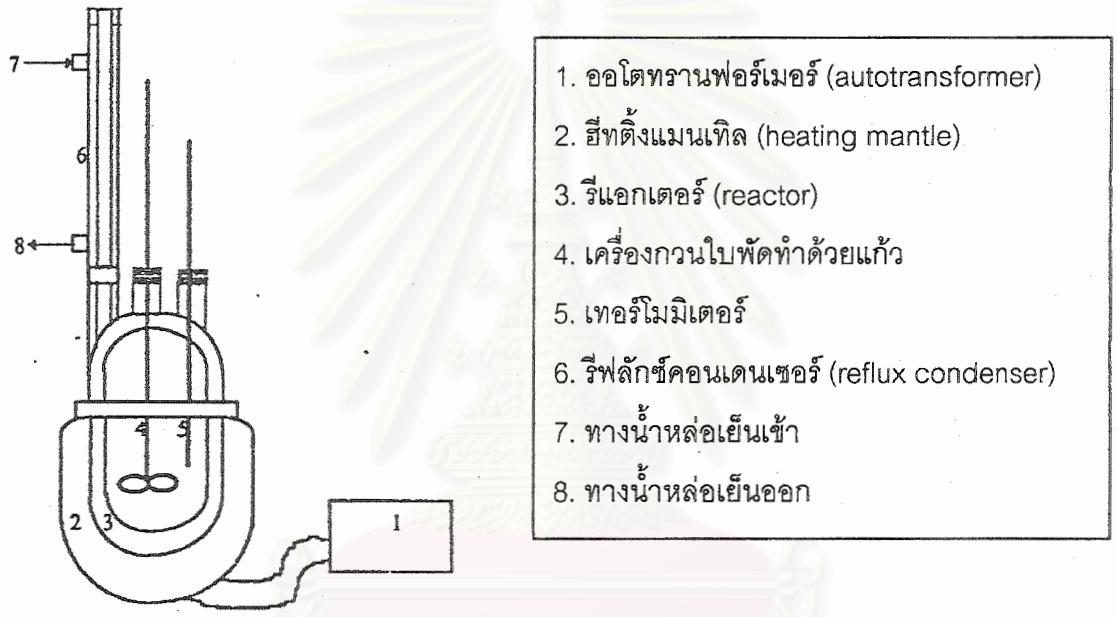
4. เมื่อสารละลายมีอุณหภูมิที่กำหนดจึงใส่แร่ลงในสารละลาย

5. ชักตัวอย่างสารละลายด้วยปิเปตที่เวลา 2, 5, 10, 20, 40 และ 60 นาที จำนวนประมาณ 5 มิลลิลิตร

6. กรองตัวอย่างสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรอง

7. ชักตัวอย่างจากสารละลายที่กรองแล้วด้วยปิเปตจำนวน 2 มิลลิลิตร ผสมน้ำกลั่นเป็น 250 มิลลิลิตร

8. วิเคราะห์หาปริมาณแมงกานีสในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมิกแอบซอฟชั่น (atomic absorption spectrometer)



รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

3.4 การตรวจสอบกากแร่หลังผ่านการละลาย

กากที่เหลือจากการละลายนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดแร่หลังการละลาย บางตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์เพื่อหาสารประกอบที่เหลืออยู่

3.5 รายละเอียดเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบจากตัวแปร

ตัวแปรที่ศึกษาทั้งหมดมี 6 ตัวแปรดังนี้

3.5.1 อัตราการกวน

ในการทดลองนี้ใช้อัตราการกวนตั้งแต่ 100 รอบต่อนาทีถึง 1000 รอบต่อนาที โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช 2 กรัม ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรีตามสมการที่ (2.4) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตารางที่ 3.1 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากอัตราการกวน

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากอัตราการกวน

ชุดการทดลองที่	อัตราการกวน (รอบต่อนาที)	ปริมาณเม็ดแร่ (กรัม)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ (เท่า)*	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	100	2	2.0	1	70
2	300	2	2.0	1	70
3	500	2	2.0	1	70
4	750	2	2.0	1	70
5	850	2	2.0	1	70
6	1000	2	2.0	1	70

*หมายเหตุ จำนวนเท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรีตามสมการที่ (2.4)

3.5.2 อุณหภูมิ

การทดลองเพื่อหาผลของอุณหภูมิกระทำที่อุณหภูมิ 33 ถึง 90 องศาเซลเซียส โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช 2 กรัม สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ปริมาตร 500 มิลลิลิตร อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ตารางที่ 3.2 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

ชุดการทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเม็ดแร่ (กรัม)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ (เท่า)	อัตราการกวน (รอบต่อนาที)
7	33	2	2.0	1	850
8	50	2	2.0	1	850
9	60	2	2.0	1	850
5	70	2	2.0	1	850
10	80	2	2.0	1	850
11	90	2	2.0	1	850

3.5.3 ปริมาณของเฟอร์รัสคลอไรด์

ในการทดลองเพื่อหาผลของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ได้ใช้ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ตั้งแต่ 0.25 ถึง 1.25 เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช จำนวน 2 กรัม สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ตารางที่ 3.3 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากปริมาณของเฟอร์รัสคลอไรด์

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากปริมาณของเฟอร์รัสคลอไรด์

ชุดการทดลองที่	ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ (เท่า)	ปริมาณเม็ดแร่ (กรัม)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการกวน (รอบต่อนาที)
12	0.25	2	2.0	70	850
13	0.50	2	2.0	70	850
14	0.75	2	2.0	70	850
5	1.00	2	2.0	70	850
15	1.25	2	2.0	70	850

3.5.4 ปริมาณของเฟอร์ริกคลอไรด์

ในการทดลองเพื่อหาผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ ใช้อัตราส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ ตั้งแต่ 0 ถึง 5.0 โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช 2 กรัม สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ปริมาตร 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ตารางที่ 3.4 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากปริมาณของเฟอร์ริกคลอไรด์

ตารางที่ 3.4 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากปริมาณของเฟอร์ริกคลอไรด์

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	ปริมาณเม็ดแร่ (กรัม)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการกวน (รอบต่อนาที)
5	0	2	2.0	70	850
16	1.0	2	2.0	70	850
17	1.5	2	2.0	70	850
18	3.0	2	2.0	70	850
19	5.0	2	2.0	70	850

3.5.5 ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ในการทดลองเพื่อหาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้ใช้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 ถึง 3.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช 2 กรัม อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ตารางที่ 3.5 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ตารางที่ 3.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ชุดการทดลองที่	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ปริมาณเม็ดแร่ (กรัม)	ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ (เท่า)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการกวน (รอบต่อนาที)
20	0.5	2	1	70	850
21	1.0	2	1	70	850
22	1.5	2	1	70	850
5	2.0	2	1	70	850
23	2.5	2	1	70	850
24	3.0	2	1	70	850

3.5.6 ขนาดเม็ดแร่

การทดลองเพื่อหาผลของขนาดเม็ดแร่ต่อการละลายกระทำโดยนำเม็ดแร่ขนาดตั้งแต่ –100 ถึง +270 เมช ขนาดละ 2 กรัม ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ปริมาตร 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ตารางที่ 3.6 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของขนาดเม็ดแร่

ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของขนาดเม็ดแร่

ชุดการทดลองที่	ขนาดเม็ดแร่ (เมช)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ (เท่า)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการกวน (รอบต่อนาที)
25	-45+65	2.0	1	70	850
26	-65+100	2.0	1	70	850
5	-100+150	2.0	1	70	850
27	-150+200	2.0	1	70	850
28	-200+270	2.0	1	70	850

3.5.7 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง

การทดลองเพื่อหาผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งต่อการละลายของเม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช กระทำที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที นอกจากนี้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3.5 โมลต่อลิตรสำหรับเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วย ตารางที่ 3.7 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์ของแข็ง

ตารางที่ 3.7 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์ของแข็ง

ชุดการทดลองที่	เปอร์เซ็นต์ของแข็ง (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ (เท่า)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการกวน (รอบต่อนาที)
29	5	2.0	1	70	850
30	10	2.0	1	70	850
31	10	3.5	1	70	850

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลวิเคราะห์แร่ที่ใช้ในการทดลอง

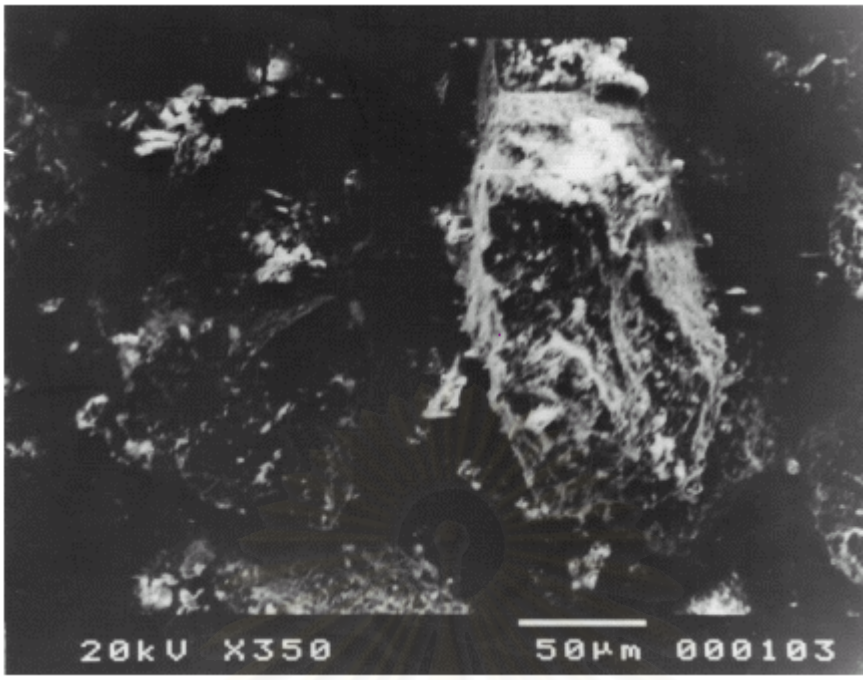
แร่แมงกานีสที่ใช้ในการทดลองเป็นไพโรลูไซต์ได้จากเหมืองหนองสองห้อง จังหวัดเชียงราย ภายหลังจากการบดด้วยเครื่องบดจอว์ครัชเชอร์ และโรลครัชเชอร์ แล้วอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จึงนำไปคัดขนาดด้วยตะแกรงเพื่อคัดขนาดเม็ดแร่สำหรับทดลองผลของขนาดเม็ดแร่ต่อการละลายของแมงกานีส เม็ดแร่ที่ผ่านการบดมีการกระจายตัวของขนาดตั้งแต่ –45 (300 ไมโครเมตร) ถึง -270 เมช (ประมาณ 53 ไมโครเมตร) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดของแร่แมงกานีสภายหลังการคัดขนาด

ขนาดเมช	น้ำหนัก(กิโลกรัม)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	เปอร์เซ็นต์สะสม
-45+65	2.2	36.67	36.67
-65+100	0.9	15.00	51.67
-100+150	0.8	13.33	65.00
-150+200	0.8	13.33	78.33
-200+270	0.8	13.33	91.66
-270	0.5	8.34	100

รูปที่ 4.1 แสดงรูปร่างของเม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช ที่ตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

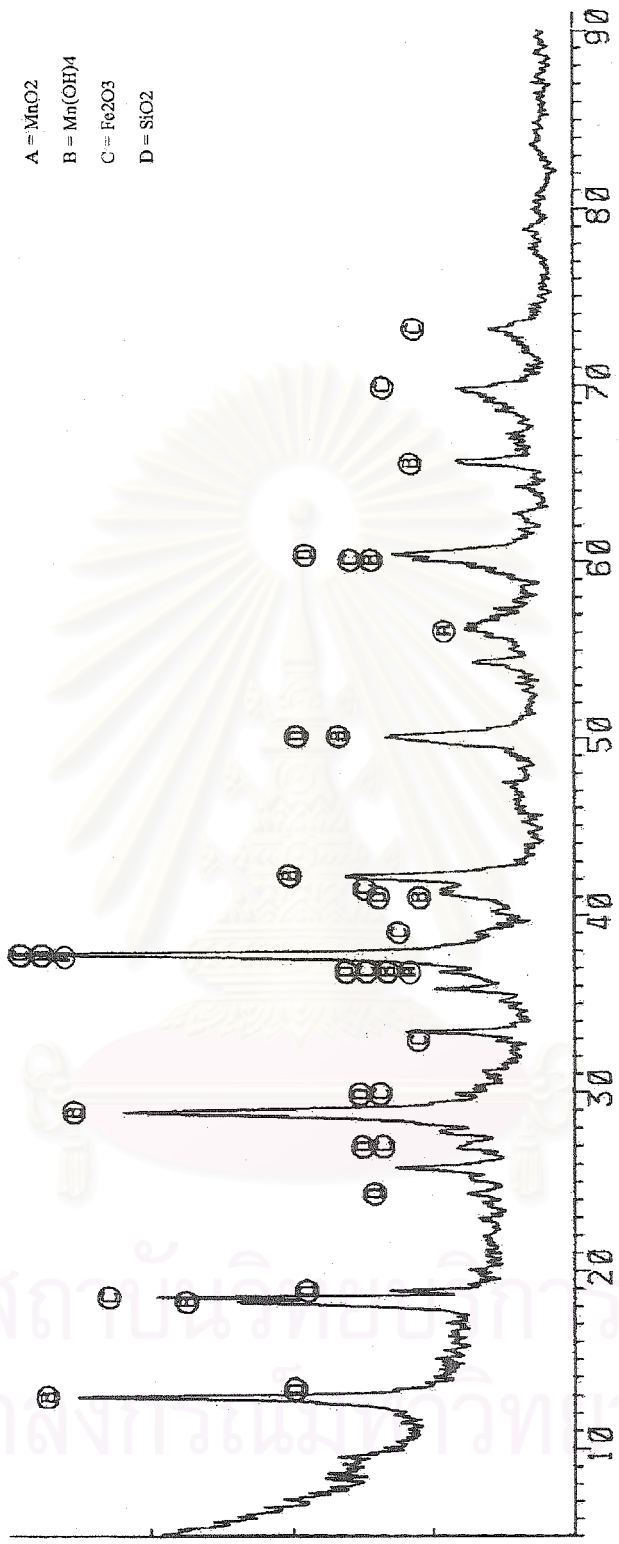
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 แสดงรูปร่างของเม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 350 เท่า

จากการตรวจสอบสารประกอบต่างๆ ในแร่ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ สารประกอบที่สำคัญที่พบได้แก่ ไพโรลูไซต์ (MnO_2) เวอนาไดต์ ($Mn(OH)_4$) เฮมาไทต์ (Fe_2O_3) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าแร่ดังกล่าวมีแมงกานีสไดออกไซด์อยู่ร้อยละ 66.79 และมีแมงกานีสทั้งหมดอยู่ร้อยละ 44.78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



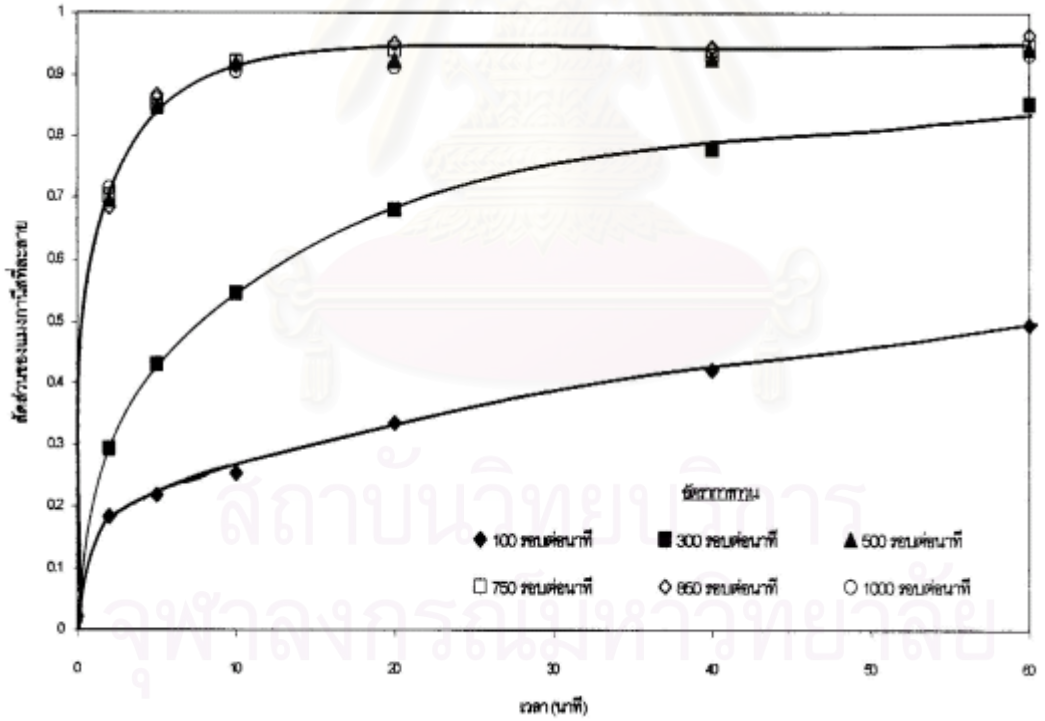
รูปที่ 4.2 ผลการตรวจสอบตัวอย่างแร่แมงกานีสด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การละลายแร่ด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริก

4.2.1 ผลของอัตราการกวน

การทดลองเริ่มจากการหาผลของอัตราการกวนต่ออัตราเร็วของการละลายแมงกานีสจากแร่ พบว่าในการใช้เม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์ โดยกวนสารละลายด้วยอัตราการกวน 100, 300, 500, 750, 850 และ 1000 รอบต่อนาทีได้ผลของสัดส่วนแมงกานีสที่ละลายออกจากแร่ ต่อเวลาดังรูปที่ 4.3 เห็นได้ชัดว่าอัตราการกวนที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราเร็วของแมงกานีสที่ละลายออกมาเร็วขึ้น แต่ไม่มีผลต่ออัตราเร็วในการละลายแมงกานีสที่อัตราการกวนตั้งแต่ 500 รอบต่อนาทีขึ้นไป ดังนั้นในการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรอื่นจึงได้ใช้อัตราการกวนคงที่ที่ 850 รอบต่อนาที ตลอดเพื่อตัดผลกระทบของอัตราการกวนต่อความเร็วของปฏิกิริยา



รูปที่ 4.3 ปริมาณการละลายแมงกานีสต่อเวลาที่อัตราการกวนต่างๆ สภาวะความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

4.2.2 ผลของอุณหภูมิ

ในการทดลองเพื่อหาผลของอุณหภูมิต่อการละลายแร่ ทำที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร ผสมเฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี โดยใช้ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที โดยใช้อุณหภูมิ 33, 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ปรากฏผลตามรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าอัตราเร็วของการละลายสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้น ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) แมงกานีสในแร่ละลายได้เพียง 76 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 10 นาที แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส แมงกานีสละลายได้ประมาณ 77, 83, 91, 91 และ 93 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ชี้ให้เห็นแนวโน้มว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเร็วในการละลายจะเพิ่มขึ้นแต่มีผลน้อยลงเมื่อใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 70 องศาเซลเซียสขึ้นไป และสามารถละลายแมงกานีสได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 10 นาทีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในการหาอัตราเร็วของการละลายแมงกานีสเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถหาได้โดยใช้สมการโพลีโนเมียลที่สอดคล้องกับข้อมูลระหว่างสัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายตามเวลา (t) ในรูปที่ 4.4

กำหนดให้สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลาย $(F) = a + bt + ct^2$ (4.1)

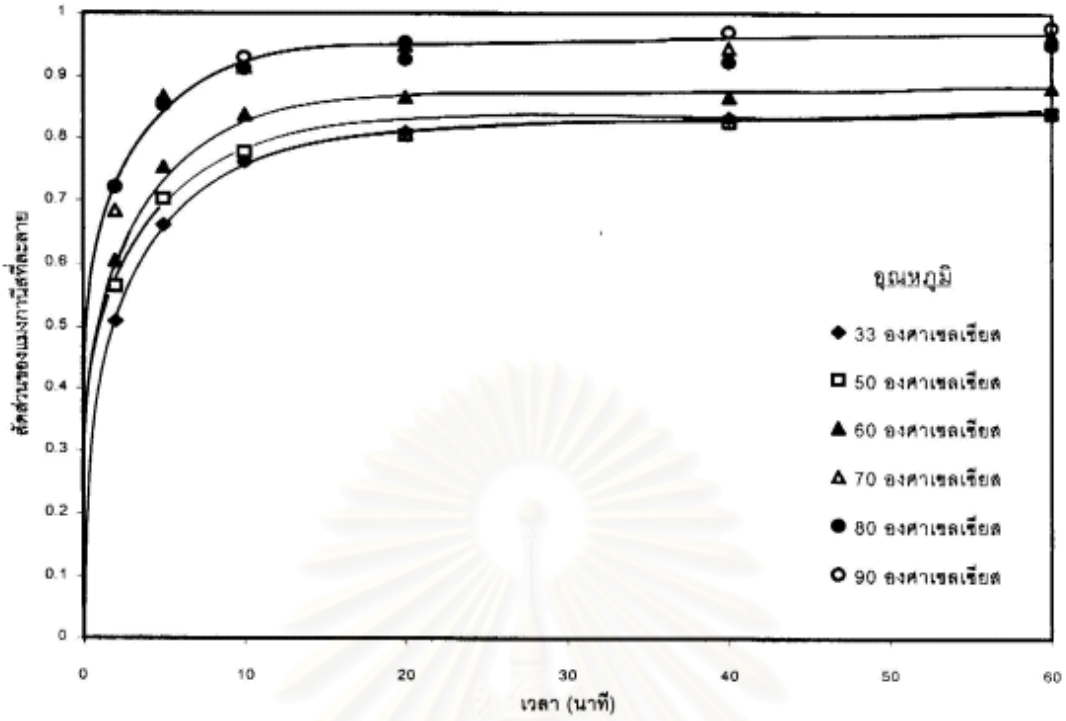
เมื่อ a, b และ c เป็นค่าคงที่

ดังนั้นอัตราเร็วของการละลาย $dF/dt = b + 2ct$ (4.2)

อัตราเร็วของการละลายเริ่มต้น (V) ที่เวลา t = 0 จะมีค่าเท่ากับ b

ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จากข้อมูลดังกล่าวนำมาพล็อตระหว่าง log V กับ 1/T และลากเส้นกราฟเป็นเส้นตรงปรากฏผลดังรูปที่ 4.5 ความชันของเส้นคือ $-E_a/2.303R$ เมื่อ E_a คือค่าพลังงานกระตุ้น R คือค่าคงที่ของก๊าซ จากการคำนวณจะได้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 3.88 กิโลจูลต่อโมล (0.924 กิโลแคลอรีต่อโมล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

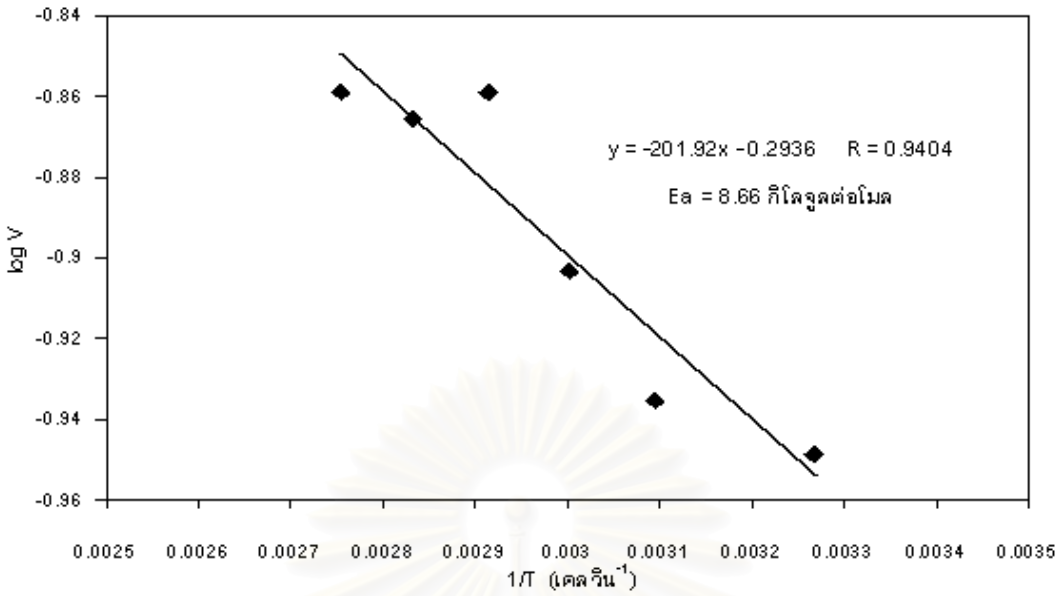


รูปที่ 4.4 สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ สภาวะซึ่งได้แก่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.2 อัตราเร็วของการละลายเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

อุณหภูมิ		1/T	อัตราเร็วของการละลาย	log V
เซลเซียส	เคลวิน		เริ่มต้น V (นาที$^{-1}$)	
33	306	0.003268	0.1127	-0.9481
50	323	0.003096	0.1161	-0.9352
60	333	0.003003	0.1250	-0.9031
70	343	0.002915	0.1383	-0.8592
80	353	0.002833	0.1363	-0.8655
90	363	0.002755	0.1385	-0.8586

หมายเหตุ T คือ อุณหภูมิเป็นเคลวิน



รูปที่ 4.5 อาร์รีเนียสพล็อตสำหรับปฏิกิริยาการละลายแมงกานีส ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 ผลของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์

ในการศึกษาผลของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ต่อการละลายแมงกานีสจากแร่ได้ใช้ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ตั้งแต่ 0.25 จนถึง 1.25 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี ได้ผลตามรูปที่ 4.6 เห็นได้ชัดว่าเมื่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์เพิ่มขึ้นปริมาณการละลายจะสูงขึ้น จนกระทั่งเมื่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์เกิน 1 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี ความเร็วในการละลายจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ภายในเวลา 20 นาทีการใช้ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 0.25 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรีได้เปอร์เซ็นต์การละลายของแมงกานีสประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์เพิ่มขึ้นเป็น 0.50 และ 0.75 เท่าของปริมาณสตอยชีโอ เมตรี เปอร์เซ็นต์การละลายเพิ่มขึ้นเป็น 55 เปอร์เซ็นต์ และ 79 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี จะได้เปอร์เซ็นต์การละลายเป็น 95 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 96 เปอร์เซ็นต์เมื่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์สูงถึง 1.25 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี ปริมาณการละลายแมงกานีสค่อนข้างคงที่ที่เวลาตั้งแต่ 20 นาทีขึ้นไป

อันดับของปฏิกิริยาเนื่องจากอิทธิพลของความเข้มข้นเฟอร์รัสคลอไรด์ต่ออัตราเร็วของการละลายแมงกานีส สามารถหาได้โดยใช้อัตราเร็วของการละลายแมงกานีสเริ่มต้นที่ได้จากผลการทดลองละลายแร่แมงกานีสต่อเวลาที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ต่างๆกัน โดยใช้สมการโพลีโนเมียลในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.2.2 ซึ่งได้ความชันของเส้น (ค่า V ในตาราง) ตามตารางที่ 4.3

จากความสัมพันธ์ $V = kC^n$ (4.3)

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็ว

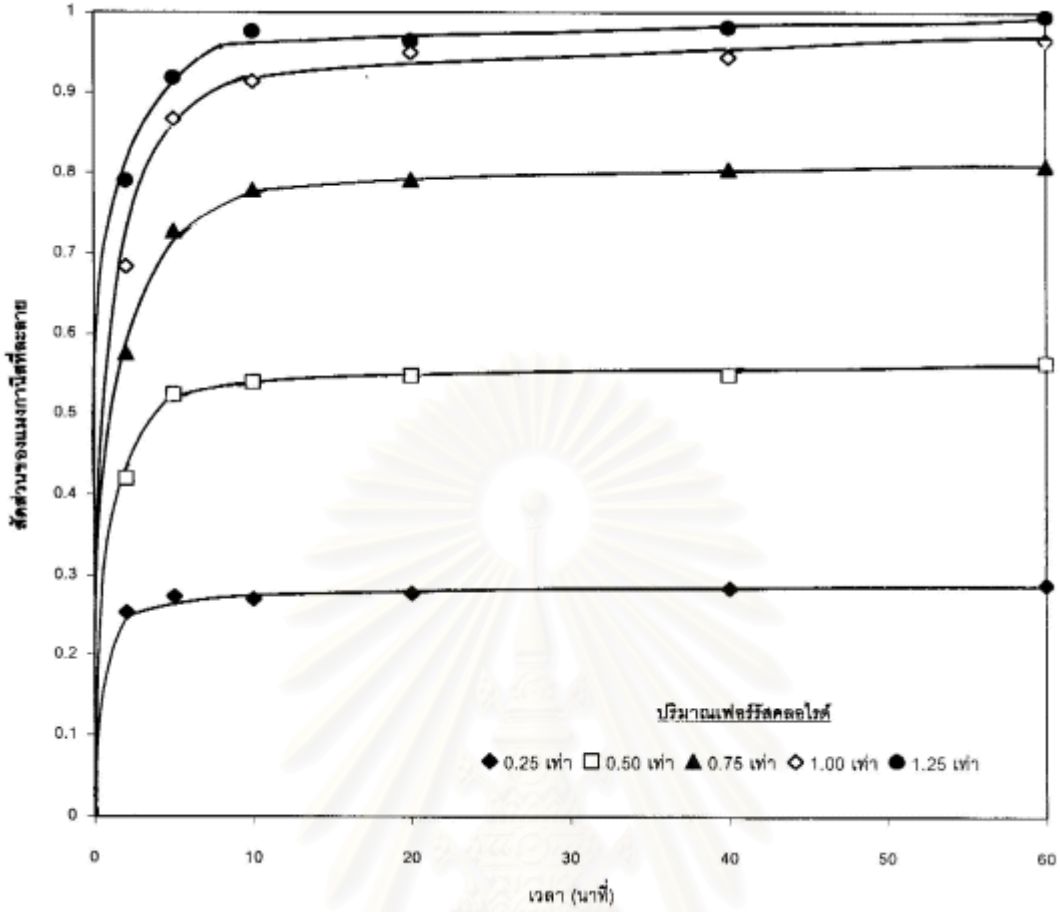
C คือ ความเข้มข้นของเฟอร์รัสคลอไรด์

และ n คือ อันดับของปฏิกิริยา

หรือ

$$\log V = \log k + n \log C \quad (4.4)$$

เมื่อพล็อตระหว่างล็อกกาลิทึมของอัตราเร็วต่อล็อกการิทึมของความเข้มข้นเฟอร์รัสคลอไรด์จะได้กราฟเส้นตรงตามรูปที่ 4.7 และความชันของเส้นตรง คืออันดับของปฏิกิริยาในแง่ของความเข้มข้นของเฟอร์รัสคลอไรด์มีค่าเท่ากับ 0.83

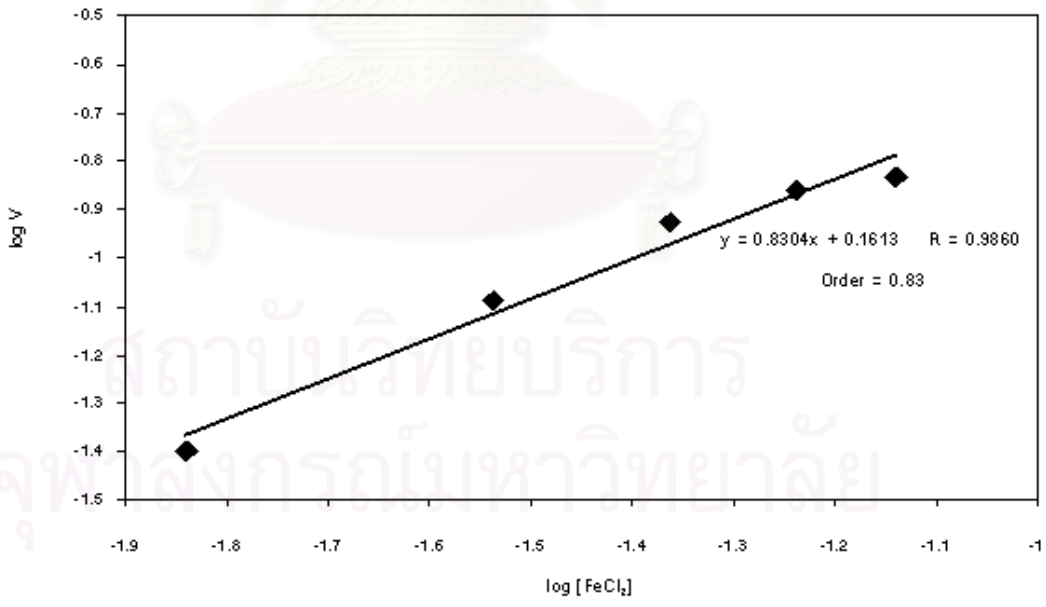


รูปที่ 4.6 สัดส่วนการละลายแมงกานีสเป็นฟังก์ชั่นของเวลาที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ต่างๆ ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 อัตราเร็วการละลายเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเฟอร์รัสคลอไรด์ต่างๆ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ (เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี)	ความเข้มข้นของเฟอร์รัสคลอไรด์ (โมลต่อลิตร)	อัตราเร็วของการละลายเริ่มต้น V (นาที$^{-1}$)	log V
0.25	0.0145	0.0400	-1.3979
0.50	0.0290	0.0823	-1.0846
0.75	0.0435	0.1180	-0.9281
1.00	0.0580	0.1383	-0.8592
1.25	0.0725	0.1469	-0.8330



รูปที่ 4.7 แสดงอันดับปฏิกิริยาในแง่ความเข้มข้นเฟอร์รัสคลอไรด์

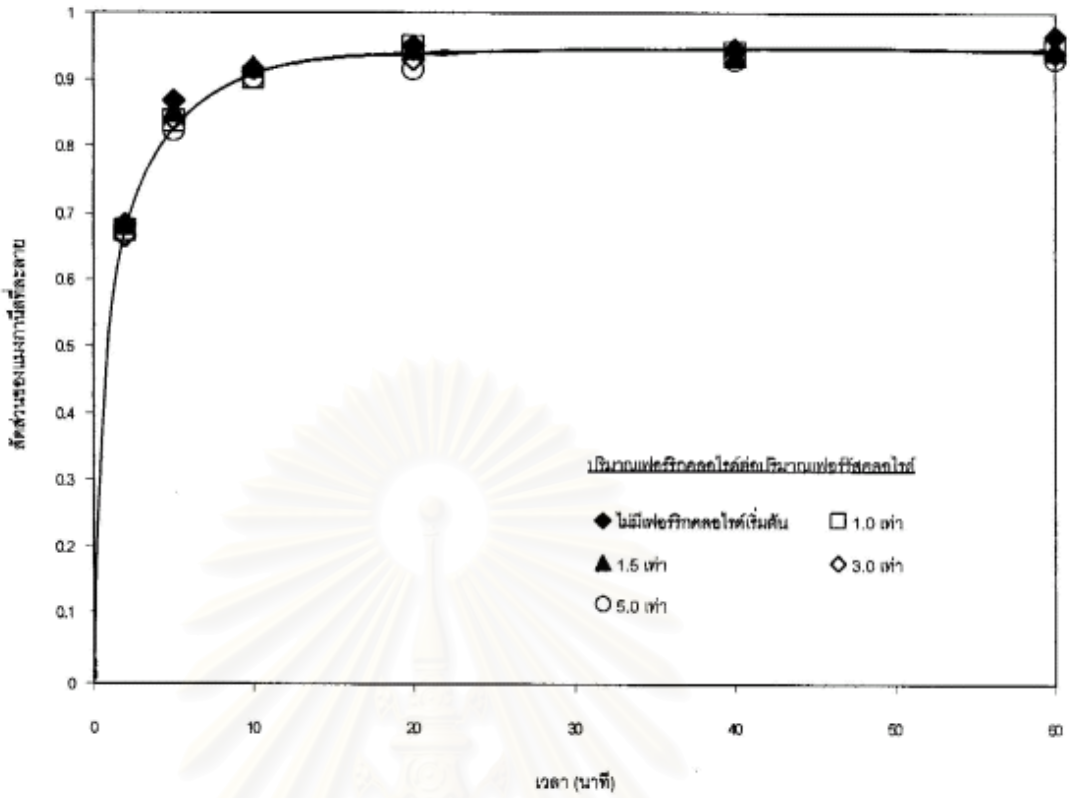
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์

เนื่องจากเฟอร์ริกคลอไรด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาละลายแร่อาจสะสมตัวอยู่ในสารละลายเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ หากมีการหมุนเวียนสารละลายที่ใช้สกัดแร่แมงกานีส ดังนั้นจึงได้ศึกษาผลของเฟอร์รัสคลอไรด์ต่ออัตราเร็วในการละลายแร่โดยใช้สภาวะดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์ โดยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ในสารละลายทั้งนี้ได้ใช้อัตราส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 1.0, 1.5, 3.0 และ 5.0 รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณแมงกานีสที่ละลายเป็นฟังก์ชันของเวลาที่อัตราส่วนปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์เริ่มต้นต่างๆ เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ในสารละลายที่ใช้สกัดแร่ พบว่าการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ไม่มีผลต่อปริมาณการละลายของแมงกานีสอย่างมีนัยสำคัญ ชี้ให้เห็นว่าปฏิกิริยาย้อนกลับ (back reaction) ในกรณีนี้ (สมการที่ (4.5)) สามารถละเลยได้ (neglegible) ซึ่งสอดคล้องกับการคาดหมายว่า free energy change ของสมการ (4.5) มีค่าต่ำกว่า –10T แคลอรี[12] (ดูการคำนวณในภาคผนวก)

$$MnO_2 + 2Fe^{2+} + 4H^{+} = Mn^{2+} + 2Fe^{3+} + 2H_2O \qquad (4.5)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

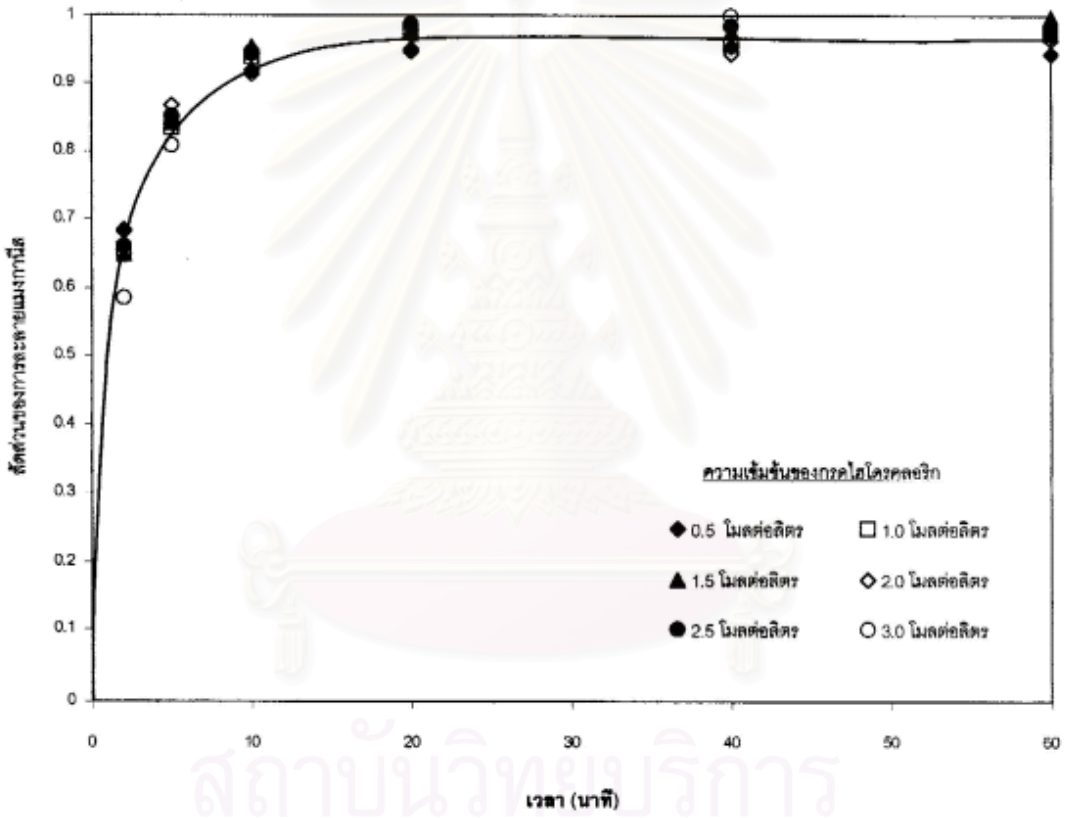


รูปที่ 4.8 สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายเป็นฟังก์ชันของเวลาที่อัตราส่วนของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ต่างๆ ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

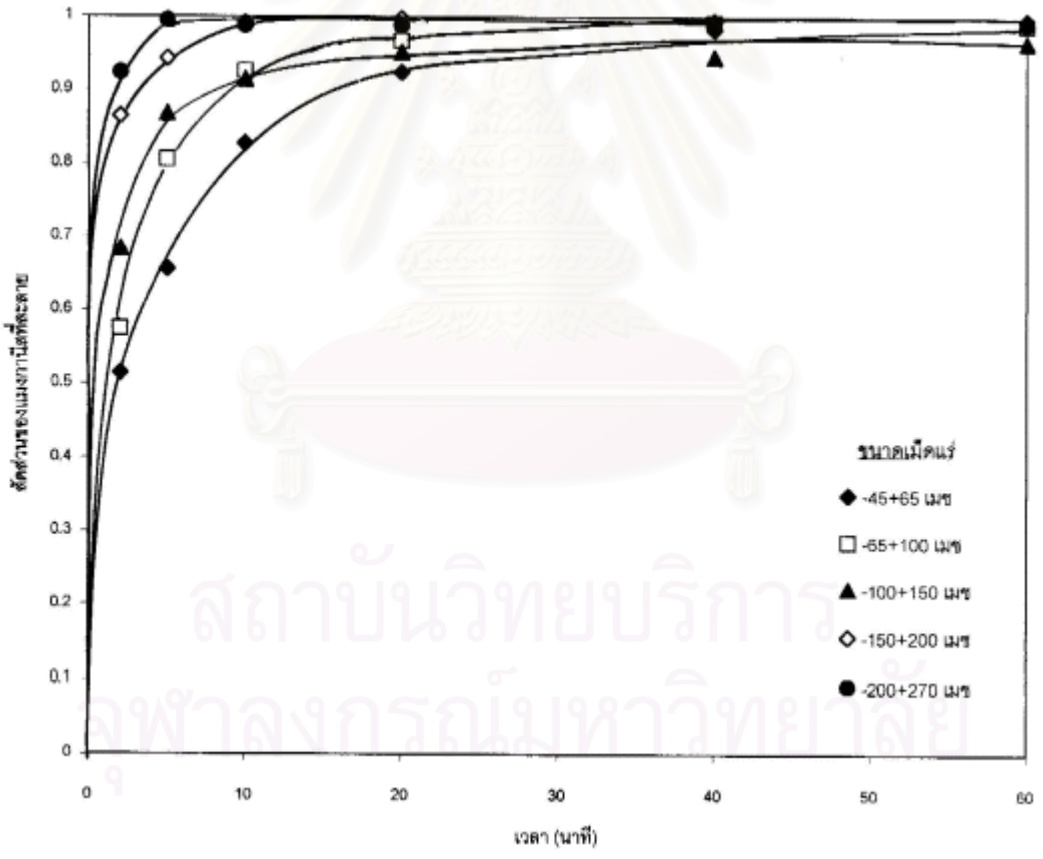
รูปที่ 4.9 แสดงผลการพล็อตระหว่างสัดส่วนของการละลายแมงกานีสต่อเวลาที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกตั้งต้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.9 ชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ทดลอง กล่าวคือตั้งแต่ 0.5 โมลต่อลิตรขึ้นไป ไม่มีผลต่อความเร็วของการละลายแมงกานีสอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.9 สัดส่วนการละลายของแมงกานีสเป็นฟังก์ชันของเวลาที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่างๆ สภาวะอันได้แก่ เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

4.2.6 ผลของขนาดเม็ดแร่

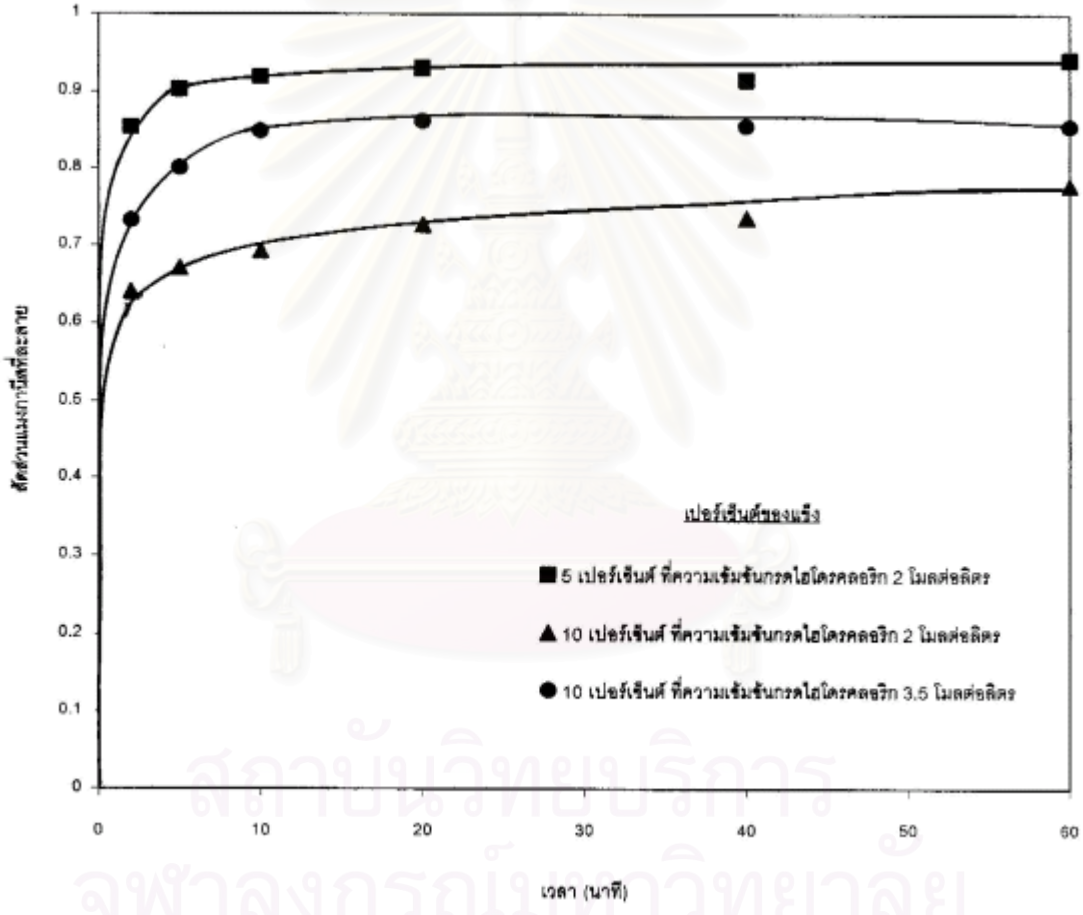
ในการศึกษาผลของขนาดเม็ดแร่ต่อการละลายได้ใช้เม็ดแร่ขนาดตั้งแต่ –45 จนถึง +270 เมช ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.10 แสดงสัดส่วนการละลายแมงกานีสต่อเวลาที่ได้ เม็ดแร่ที่มีขนาดเล็กจะละลายได้เร็วกว่า เม็ดแร่ละเอียดขนาด –200+270 เมช สามารถละลายได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 5 นาที ในขณะที่ขนาด –150+200 เมช จะใช้เวลา 10 นาที สำหรับเม็ดแร่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นปริมาณการละลายของแมงกานีสจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาละลายนานขึ้น และสามารถละลายได้เกือบหมดเช่นกันเมื่อให้เวลาในการละลายนานพอ เช่นที่ –45+65 เมช แมงกานีสละลายได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 40 นาที



รูปที่ 4.10 สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายเป็นฟังก์ชันของเวลา ที่สภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

4.2.7 ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็ง

ในที่นี้ได้กำหนดให้เปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ น้ำหนักของแร่(กรัม) x 100 / ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร) ทดลองที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที นอกจากนี้ยังได้ทดลองที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรคลอริก 3.5 โมลต่อลิตรอีกหนึ่งตัวอย่างสำหรับเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วย ผลการทดลองปรากฏตามรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัดส่วนของแมงกานีสที่ละลายเป็นฟังก์ชันของเวลาที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และปริมาณกรดไฮโดรคลอริกต่างๆ ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที

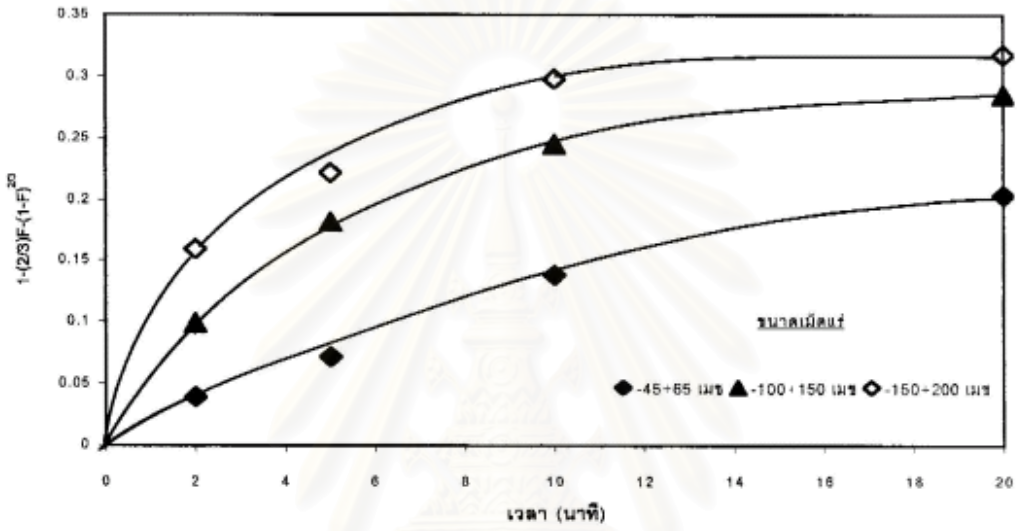
ในการละลายของแมงกานีสที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถละลายแมงกานีสได้สูงสุด 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์สามารถละลายแมงกานีสที่ความ

เข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเริ่มต้น 2.0 โมลต่อลิตร ได้สูงสุด 78 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกถูกใช้ไปในระหว่างการทำปฏิกิริยา ทำให้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหลืออยู่ในสารละลายลดลงและไม่เพียงพอที่จะช่วยในการละลายแมงกานีสจากแร่ให้ได้มากขึ้น เห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเริ่มต้นในสารละลายเป็น 3.5 โมลต่อลิตรที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ทำให้แร่ถูกละลายได้มากขึ้นจาก 78 เปอร์เซ็นต์ เป็น 86 เปอร์เซ็นต์ ในระหว่างการทดลองพบว่าเมื่อใส่แร่ลงไปในสารละลาย อุณหภูมิของสารละลายจะเพิ่มขึ้นจาก 70 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียส ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 5 เปอร์เซ็นต์ และจาก 70 องศาเซลเซียส เป็น 80 องศาเซลเซียส ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (ดูภาคผนวก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยา

จากค่าพลังงานกระตุ้นที่วัดได้เท่ากับ 3.88 กิโลจูลต่อโมล ชี้ว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาน่าจะควบคุมโดยการแพร่ (diffusion control)[12] แต่ผลการพล็อตระหว่างฟังก์ชัน $1-(2/3)F-(1-F)^{2/3}$ กับเวลาไม่ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงตามรูปที่ 4.12 แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่ได้ควบคุมด้วยการแพร่



รูปที่ 4.12 กราฟระหว่าง $1-(2/3)F-(1-F)^{2/3}$ กับเวลา สำหรับขนาดเม็ดแร่ต่างๆ ที่สภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

4.2.8.1 การเกิดนิวเคลียสและการโตขึ้นของเกรน (Nucleation And Grain Growth)[12]

โดยทั่วไปจลนพลศาสตร์ของแบบการเกิดนิวเคลียสและการโตขึ้นของเกรน สามารถอธิบายโดยใช้สมการเอ็มไพริคัล (empirical equation) ในรูปแบบตามสมการที่ 4.6

$$dF/dt = k^m t^{m-1}(1-F) \qquad (4.6)$$

เมื่อ F คือ degree of transformation หรือสัดส่วนแมงกานีสที่ละลายได้ในกรณีนี้ t คือ เวลา k คือ ค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับค่า F และ m คือ เลขชี้กำลังซึ่งแปรไปตามกลไกของปฏิกิริยา

จากสมการที่ (4.6) จะเห็นว่าพจน์ t^{m-1} มีส่วนในการเพิ่มของอัตราเร็วในขั้นตอนแรก (initial stage) ขณะที่พจน์ (1-F) ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาค่อยๆ ลดลง เมื่อปฏิกิริยาดำเนิน

ไปจนเลยขั้นตอนที่อัตราเร็วมีค่าสูงสุด อัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นสันนิษฐานว่ามาจากการเกิดนิวเคลียส (nucleation) กล่าวคือ การก่อตัวของบริเวณ (domain) ใหม่ของผลผลิต (product) และระหว่างขั้นตอนภายหลังอัตราการโตของบริเวณใหม่ลดลงเนื่องจากการรบกวนซึ่งกันและกันของบริเวณใกล้เคียงกันไม่ว่าจะโดยการกระทบโดยตรง หรือการชิงอะตอมตัวทำละลายกันจากระยะไกล

จากสมการที่ 4.6 เมื่อทำการบูรณาการจะได้สมการที่ 4.7

$$\ln (1/(1-F)) = k^m t^m/m = (k't)^m \qquad (4.7)$$

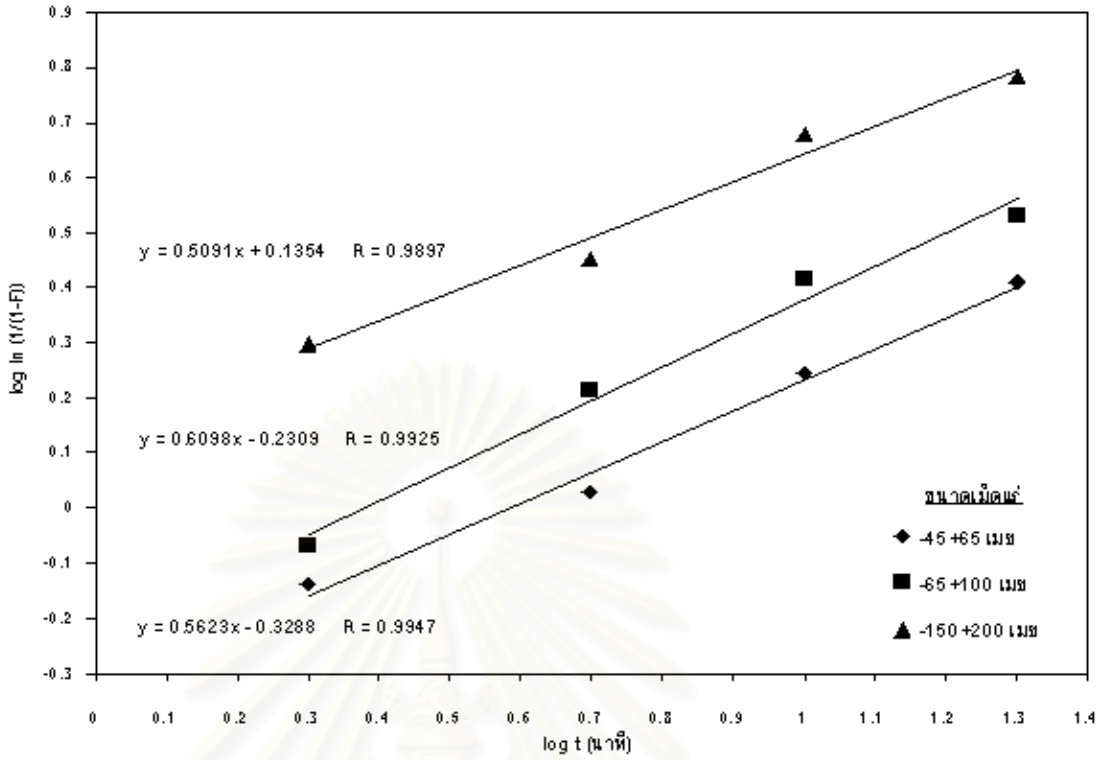
เมื่อ k’ คือ k^m/m

หรือ

$$\log \ln (1/(1-F)) = m \log k' + m \log t \qquad (4.8)$$

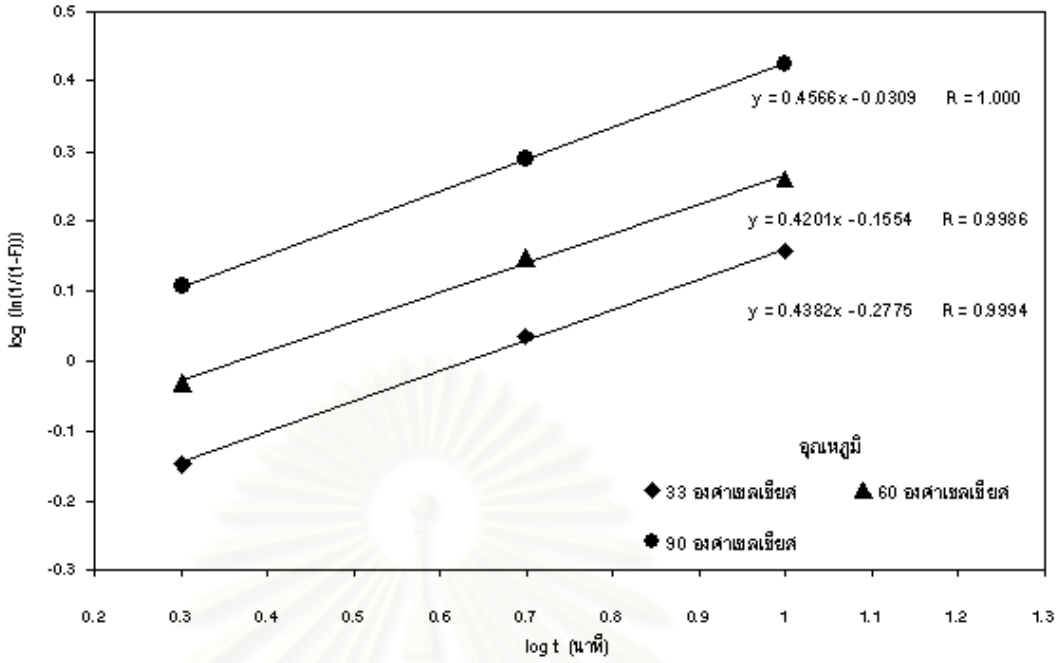
เมื่อพล็อตระหว่าง log ln (1/(1-F)) กับ log t จะได้เส้นตรงความชันของเส้นคือ m และจะหาค่า k’ ได้จากจุดตัดแกน (intercept) รูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นการพล็อตระหว่าง log ln (1/(1-F)) กับ log t ที่ขนาดเม็ดแร่ และอุณหภูมิต่างๆ ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ชี้ให้เห็นว่ากลไกการละลายแร่แมงกานีสด้วยกรรมวิธีนี้ถูกควบคุมโดยแบบการเกิดนิวเคลียสและการโตขึ้นของเกรนซึ่งสอดคล้องกับผลงานของ Das และคณะ[10] ที่ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในการละลายแร่แมงกานีสเกรดต่ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 กราฟระหว่าง log (ln (1/(1-F))) กับ log (t) สำหรับขนาดเม็ดแร่ต่างๆ ที่สภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

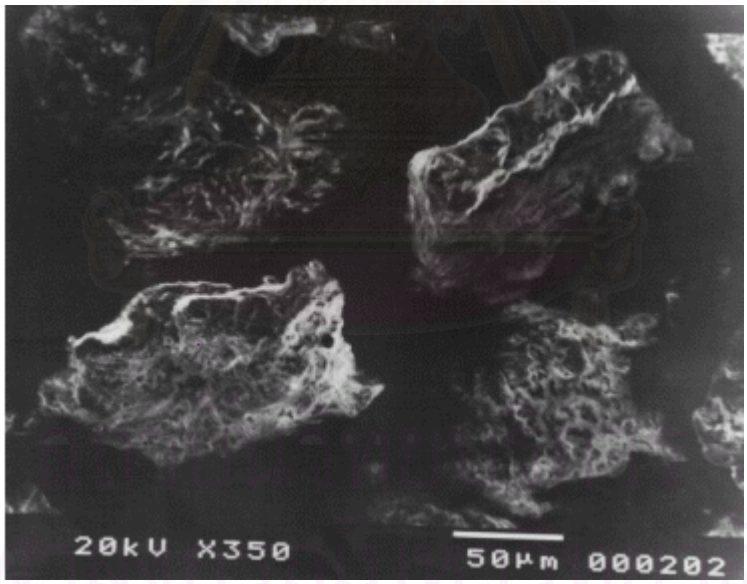


รูปที่ 4.14 กราฟระหว่าง log (ln (1/(1-F))) กับ log (t) สำหรับอุณหภูมิต่างๆ ที่สภาวะสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์

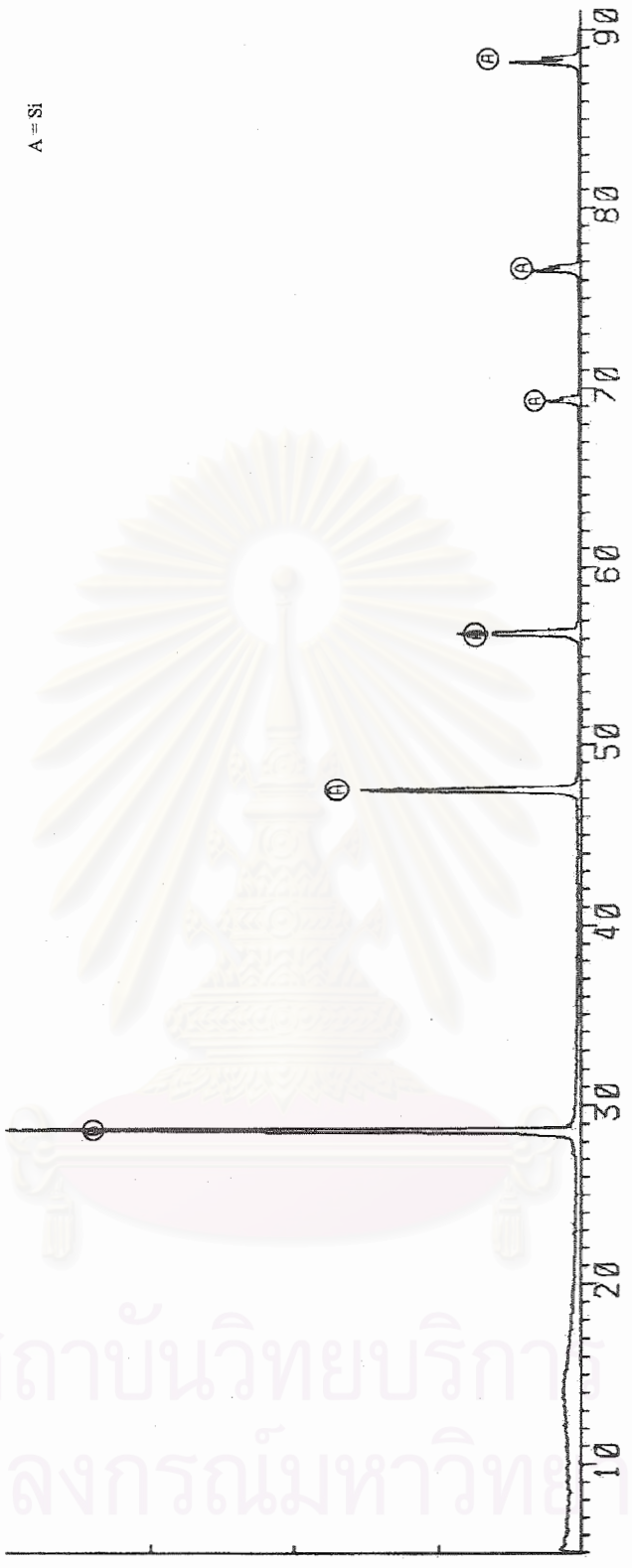
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ผลการตรวจวิเคราะห์แร่ที่ใช้ภายหลังทำการทดลอง

รูปที่ 4.15 เป็นกากแร่ที่เหลือจากการละลายแร่แมงกานีสที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการตรวจสอบกากแร่ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ตามรูปที่ 4.16 พบซิลิกอนเหลืออยู่ปริมาณมากกว่าสารประกอบอื่นๆ และไม่พบแมงกานีสไดออกไซด์เหลืออยู่



รูปที่ 4.15 กากแร่ที่เหลือจากการละลายแร่แมงกานีสที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 350 เท่า



รูปที่ 4.16 ผลเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันของกากแร่ที่เหลือจากการละลายแร่แมงกานีสที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.0 โมลต่อลิตร เฟอร์รัสคลอไรด์เท่ากับปริมาณสตอยซีโอเมตรี ขนาดเม็ดแร่ –100+150 เมช เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยเฟอร์รัสคลอไรด์ ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ไพโรลูไซต์ที่ได้จากเหมืองหนองสองห้อง จังหวัดเชียงราย ซึ่งมีแมงกานีสอยู่ 44.78 เปอร์เซ็นต์ และอยู่ในรูปแมงกานีสไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ซึ่งสามารถสกัดแมงกานีสได้โดยใช้สารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์และกรดไฮโดรคลอริก

2.อัตราเร็วในการละลายแมงกานีสเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการกวนเพิ่มขึ้น และไม่มีผลกระทบเมื่อใช้อัตราเร็วการกวนตั้งแต่ 500 รอบต่อนาทีขึ้นไป

3. อัตราเร็วในการละลายแมงกานีสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 33 ถึง 90 องศาเซลเซียส พลังงานกระตุ้นที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 3.88 กิโลจูลต่อโมล

4. ปริมาณแมงกานีสที่ละลายเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์เพิ่มขึ้นในช่วง 0.25 ถึง 1.25 เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ที่ใช้ต้องเท่ากับปริมาณสตอยชีโอเมตรีหรือมากกว่า อันดับของปฏิกิริยาหาได้โดยใช้อัตราเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 0.83 ในแง่ความเข้มข้นของเฟอร์รัสคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

5. การเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์เริ่มต้นในสารละลายที่ใช้สกัดแร่ในช่วง 1.0 ถึง 5.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ที่ใช้ ไม่มีผลต่ออัตราเร็วในการละลาย กล่าวคือ ปฏิกิริยาย้อนกลับไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

6. การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแข็งให้สูงขึ้นมีผลให้ปริมาณแมงกานีสที่ละลายได้สูงสุดต่ำลง เนื่องจากปริมาณกรดไฮโดรคลอริกไม่เพียงพอ การเพิ่มปริมาณกรดไฮโดรคลอริกให้มากขึ้นจะได้ปริมาณแมงกานีสที่ละลายได้สูงสุดมากขึ้น

7. อัตราเร็วการละลายแมงกานีสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเม็ดแร่เล็กลง ที่ขนาดเม็ดแร่เล็กว่า 45 เมช และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.4 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีสละลายได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 40 นาที ในขณะที่เม็ดแร่ขนาดเล็กกว่า 100 เมชใช้เวลาเพียง 10 นาที

8. กลไกที่ควบคุมปฏิกิริยาเป็นไปตามแบบการเกิดนิวเคลียสและการโตขึ้นของเกรน

บทที่ 6
ข้อเสนอแนะ

สำหรับการทดลองที่น่าสนใจในการพัฒนากระบวนการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยเฟอร์รัสคลอไรด์มีดังนี้

1. ศึกษาการสกัดแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้ pickling solution ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรม

2. ศึกษาการแยกแมงกานีสออกจากสารละลายที่ได้จากการสกัดแร่แมงกานีสให้อยู่ในรูปแมงกานีสคลอไรด์บริสุทธิ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Kemmitt,R. D. W. and R. D. Peacock. The chemistry of manganese, technetium and rhenium. Chapters 37, 38 and 39 of comprehensive inorganic chemistry. Great Britain: Wheaton & Co Exeter, 1975.
2. Newton, Joseph. Extractive metallurgy. New York: John Wiley & Son,1959.
3. Liddell, Donald M. Handbook of nonferrous metallurgy recovery of the metals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book, 1945.
4. พวงสิน สุวรรณรัฐ. แมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ (Synthetic manganese dioxide). การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณีครั้งที่ 2, หน้า 1-13. 12-13 กันยายน 2526 ณ สำนักงานเลขานุการกรมทรัพยากรธรณี จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
5. วิชิต วิชิตอมรพันธ์ และ สมบูรณ์ รอดเกิด. การผลิตแมงกานีสไดออกไซด์สังเคราะห์ด้วยวิธีการปรับสภาพผิวแร่ Activated manganese dioxide (A.M.D.). กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายแต่งแร่และใช้ประโยชน์แร่ กองการเหมืองแร่, 2537. (อัดสำเนา)
6. วิชาการและวางแผน, กอง. เอกสารข้อมูลแร่แมงกานีส. กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายสถิติ กองวิชาการและวางแผน กรมทรัพยากรธรณี, 2542. (อัดสำเนา)
7. ภาณุมาศ ขาวสุวรรณศรี. Manganese recovery from pyrolusite by ferrous sulfate leaching. ปริญญานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลง-กรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
8. Pehlke, Robert D. Unit processes of extractive metallurgy. New York: Elsevier, 1982.
9. ธีรพันธ์ พิมพ์ทอง. คีเนติกส์ของการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอก-ไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรม-ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
10. Das, S. E., Sahoo P. K. and P. K. Rao. Extraction of manganese from low-grade manganese ores by $FeSO_4$ leaching. Hydrometallurgy. Vol. 8, Amsterdam: Elsevier Scientific, 1981, pp.35-47.
11. Scaife, P. H., Swinkels, D. A. J., Ward, R. K. C. and J. E. Lewis. A new process for the production of synthetic battery grade manganese dioxide, National Chemical Engineering Conference 1974: Process Industries in Australia – Impact and Growth, pp. 1-9. Surfers Paradise, 1974.

12. Ray, Hem Shanker. Kinetics of metallurgical reactions. (n.p.): International Science, 1992.

13. Shon, Hong Yong and Milton E. Wadsworth. Rate processes of extractive metallurgy. New York: Plenum, 1979.

14. Zhuqian, Zhong and Mei Guanggui. Application of diagrams of chemical potential in hydrometallurgy and purification of waste water. (n.p.), 1986.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-1

วิธีการคำนวณหาปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการคำนวณหาปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ไพโรลูไซต์ที่ใช้ในการทดลอง	A	กรัม
จากการวิเคราะห์มีปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์อยู่ในแร่	B	เปอร์เซ็นต์
ดังนั้นมีปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์ในแร่	= A x B / 100	กรัม
แมงกานีสไดออกไซด์มีมวลโมเลกุลเท่ากับ	86.94	
ปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์ในแร่คิดเป็น	= A x B / 86.94 x 100	โมล
หรือให้	= C	โมล

จากสมการเคมี

$$MnO_2 + 2FeCl_2 + 4HCl = MnCl_2 + 2FeCl_3 + 2H_2O$$

แสดงว่าแมงกานีสไดออกไซด์ 1 โมล ทำปฏิกิริยาพอดีกับเฟอร์รัสคลอไรด์ 2 โมล
ดังนั้นแมงกานีสไดออกไซด์ C โมล จะทำปฏิกิริยาพอดีกับเฟอร์รัสคลอไรด์ 2 x C โมล
เฟอร์รัสคลอไรด์มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 126.75
นั่นคือแร่แมงกานีส A กรัมต้องใช้เฟอร์รัสคลอไรด์ทำปฏิกิริยาพอดี

= 2 x C x 126.75 กรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-2

วิธีการคำนวณหาปริมาณธาตุแมงกานีสที่ถูกละลายจากค่าที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องอะตอมิกแอบซอฟชั่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการคำนวณหาปริมาณธาตุแมงกานีสที่ถูกละลายจากค่าที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องอะตอมิกแอบซอฟชั่น

ไพโรลูไซต์ที่ใช้ในการทดลอง	A	มิลลิกรัม
จากการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสที่มีอยู่ในแร่	B	เปอร์เซ็นต์
มีแมงกานีสอยู่ในแร่ทั้งหมด	= (A x B) / 100	มิลลิกรัม
ปริมาณสารละลายที่ใช้ในการละลาย	500	มิลลิลิตร

ดังนั้นสารละลาย 500 มิลลิลิตรมีปริมาณแมงกานีสทั้งหมด

	= (A x B) / 100	มิลลิกรัม
หรือให้	= C	มิลลิกรัมต่อ 500 มิลลิลิตร

เมื่อชักตัวอย่างสารละลาย 2 มิลลิลิตร ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นใน Volumetric Flask ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมิกแอบซอฟชั่น

นั่นคือในสารละลาย 250 มิลลิลิตรที่ได้จะมีแมงกานีสอยู่ทั้งหมด

	= (C x 2) / 500	มิลลิกรัม
หรือ	= (C x 2 x 4) / 500	มิลลิกรัมต่อลิตร
	= C / 62.5	มิลลิกรัมต่อลิตร

ถ้าผลวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมิกแอบซอฟชั่นมีปริมาณแมงกานีสที่ถูกละลาย

	= D	มิลลิกรัมต่อลิตร

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่ละลายออกมาจากแร่

= (D x 100) / (C / 62.5)	เปอร์เซ็นต์
= (D x 62.5) / (A x B)	เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-3

วิธีการคำนวณ ΔG ของปฏิกิริยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการคำนวณ ΔG ของปฏิกิริยา

การคำนวณ ΔG ของสมการที่ (4.5)

$$MnO_2 + 2Fe^{2+} + 4H^+ = Mn^{2+} + 2Fe^{3+} + 2H_2O \qquad (4.5)$$

พิจารณาที่ T เท่ากับ 298 องศาเซลเซียส
จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln (([Mn^{2+}] [Fe^{3+}]^2) / ([Fe^{2+}]^2 [H^+]^4)) \qquad (4.9)$$

เมื่อ ΔG° คือ standard Gibbs free energy change

[ ] คือ ความเข้มข้นของอิออนเป็นโมลาร์

จาก $a = \gamma m$ ให้ $\gamma = 1$ จะได้ $a = m$
สมมติสัดส่วนการละลายของแมงกานีสเท่ากับ 0.80 จะได้
$[Mn^{2+}] = m_{Mn2+} = 0.0122$ โมลาร์
$[Fe^{3+}] = m_{Fe3+} = 0.0232$ โมลาร์
$[Fe^{2+}] = m_{Fe2+} = 0.0058$ โมลาร์
$[H^+] = m_{H+} = 2$ โมลาร์
แทนค่าข้อมูล[14]

$\Delta G^\circ = \Delta G^\circ_{Mn2+} + 2\Delta G^\circ_{Fe3+} + 2\Delta G^\circ_{H2O} - \Delta G^\circ_{MnO2} - 2\Delta G^\circ_{Fe2+} - 4\Delta G^\circ_{H+}$

$\Delta G^\circ = -54.54 + 2(-2.53) + 2(-56.69) - (-111.1) - 2(-20.30) - 4(0) = -21.28$ กิโลแคลอรี

$RT \ln (([Mn^{2+}] [Fe^{3+}]^2) / ([Fe^{2+}]^2 [H^+]^4)) = 1.987 \times 298 \ln (0.0122 \times 0.0232^2)/(0.0058^2 \times 2^4)$
$= -2.607$ กิโลแคลอรี

ดังนั้น $\Delta G = -21.28 + (-2.607) = -23.887$ กิโลแคลอรี ซึ่งต่ำกว่า –2.980 แคลอรี (-10T)

ภาคผนวก ก-4

วิธีการคำนวณ Heat of reaction ของปฏิกิริยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการคำนวณ Heat of reaction ของปฏิกิริยา

Heat of reaction ของปฏิกิริยา

$$MnO_2 + 2Fe^{2+} + 4H^{+} = Mn^{2+} + 2Fe^{3+} + 2H_2O \qquad (4.5)$$

พิจารณาที่ T เท่ากับ 298 องศาเซลเซียส จากสมการ (4.5) จะได้

$$\Delta H^{\circ}_{298} = \Delta H^{\circ}_{MnO2} + 2\Delta H^{\circ}_{Fe2+} + 4\Delta H^{\circ}_{H+} + \Delta H^{\circ}_{Mn2+} + 2\Delta H^{\circ}_{Fe3+} + \Delta H^{\circ}_{H2O} \qquad (4.10)$$

เมื่อ ΔH° คือ standard enthalpy change ในสมการปฏิกิริยาเคมี

แทนค่าข้อมูล[14] จะได้

$$\Delta H^{\circ}_{298} = -12.42 + 2(-21) + 4(0) + (-53.3) + 2(-11.4) + 2(-68.317)$$

$$= -46.534 \text{ กิโลแคลอรีต่อโมล } MnO_2$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เครื่องอะตอมิกแอบซอฟชั่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-1

ผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์เมื่อปรับอัตราการกวน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-1-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 100 รอบต่อนาที

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	100	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
1-1	2	18.32	0.1832
1-2	5	21.83	0.2183
1-3	10	25.34	0.2534
1-4	20	33.54	0.3354
1-5	40	42.26	0.4226
1-6	60	49.56	0.4956

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-1-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 300 รอบต่อนาที

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	ท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	300	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
2-1	2	29.30	0.2930
2-2	5	43.02	0.4302
2-3	10	54.61	0.5461
2-4	20	68.02	0.6802
2-5	40	77.89	0.7789
2-6	60	85.44	0.8544

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-1-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	500	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
3-1	2	69.53	0.6953
3-2	5	84.93	0.8493
3-3	10	91.94	0.9194
3-4	20	92.36	0.9236
3-5	40	92.63	0.9263
3-6	60	94.28	0.9428

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-1-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 750 รอบต่อนาที

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	750	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
4-1	2	70.14	0.7014
4-2	5	84.62	0.8462
4-3	10	92.00	0.9200
4-4	20	94.10	0.9410
4-5	40	93.31	0.9331
4-6	60	94.70	0.9470

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-1-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
5-1	2	68.41	0.6841
5-2	5	86.72	0.8672
5-3	10	91.40	0.9140
5-4	20	95.06	0.9506
5-5	40	94.49	0.9449
5-6	60	96.56	0.9656

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-1-6 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อัตราการกวน 1000 รอบต่อนาที

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	1000	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
6-1	2	71.49	0.7149
6-2	5	85.90	0.8590
6-3	10	90.58	0.9058
6-4	20	91.37	0.9137
6-5	40	93.86	0.9386
6-6	60	93.47	0.9347

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-2

ผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์เมื่อปรับอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-2-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	33	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
7-1	2	50.89	0.5089
7-2	5	66.13	0.6613
7-3	10	76.24	0.7624
7-4	20	81.12	0.8112
7-5	40	83.35	0.8335
7-6	60	83.95	0.8395

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-2-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณ
สตอยชีโอเมตรี		
อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
8-1	2	56.38	0.5638
8-2	5	70.28	0.7028
8-3	10	77.76	0.7776
8-4	20	80.45	0.8045
8-5	40	82.67	0.8267
8-6	60	84.08	0.8408

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-2-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	60	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
9-1	2	60.45	0.6045
9-2	5	75.42	0.7542
9-3	10	83.78	0.8378
9-4	20	86.62	0.8662
9-5	40	86.72	0.8672
9-6	60	88.24	0.8824

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-2-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
5-1	2	68.41	0.6841
5-2	5	86.72	0.8672
5-3	10	91.40	0.9140
5-4	20	95.06	0.9506
5-5	40	94.49	0.9449
5-6	60	96.56	0.9656

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-2-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	80	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
10-1	2	72.26	0.7226
10-2	5	85.32	0.8532
10-3	10	91.20	0.9120
10-4	20	92.76	0.9276
10-5	40	92.35	0.9235
10-6	60	95.18	0.9518

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-2-6 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	90	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
11-1	2	72.12	0.7212
11-2	5	85.82	0.8582
11-3	10	93.02	0.9302
11-4	20	95.41	0.9541
11-5	40	97.08	0.9708
11-6	60	97.86	0.9786

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-3

ผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์เมื่อปรับปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-3-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 0.25 เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00 กรัม	
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	0.25	เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
12-1	2	25.34	0.2534
12-2	5	27.37	0.2737
12-3	10	27.01	0.2701
12-4	20	27.80	0.2780
12-5	40	28.42	0.2842
12-6	60	28.89	0.2889

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-3-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 0.50 เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	0.50	เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
13-1	2	42.02	0.4202
13-2	5	52.37	0.5237
13-3	10	53.89	0.5389
13-4	20	54.76	0.5476
13-5	40	54.85	0.5485
13-6	60	56.37	0.5637

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-3-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 0.75 เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	0.75	เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
14-1	2	57.54	0.5754
14-2	5	72.72	0.7272
14-3	10	77.82	0.7782
14-4	20	79.11	0.7911
14-5	40	80.47	0.8047
14-6	60	80.89	0.8089

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-3-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 1.00 เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
5-1	2	68.41	0.6841
5-2	5	86.72	0.8672
5-3	10	91.40	0.9140
5-4	20	95.06	0.9506
5-5	40	94.49	0.9449
5-6	60	96.56	0.9656

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-3-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์ 1.25 เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.25	เท่าของปริมาณสตอยซีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
15-1	2	79.02	0.7902
15-2	5	91.88	0.9188
15-3	10	97.67	0.9767
15-4	20	96.43	0.9643
15-5	40	98.12	0.9812
15-6	60	99.50	0.9950

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-4

ผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์เมื่อปรับปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-4-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 0.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	มลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์	0.0	เท่าเฟอร์รัสคลอไรด์
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
5-1	2	68.41	0.6841
5-2	5	86.72	0.8672
5-3	10	91.40	0.9140
5-4	20	95.06	0.9506
5-5	40	94.49	0.9449
5-6	60	96.56	0.9656

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-4-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 1.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์	1.0	เท่าเฟอร์รัสคลอไรด์
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
16-1	2	67.50	0.6750
16-2	5	83.65	0.8365
16-3	10	90.13	0.9013
16-4	20	95.06	0.9506
16-5	40	94.10	0.9410
16-6	60	94.50	0.9450

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-4-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 1.5 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์	1.5	เท่าเฟอร์รัสคลอไรด์
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
17-1	2	68.33	0.6833
17-2	5	85.11	0.8511
17-3	10	91.64	0.9164
17-4	20	94.40	0.9440
17-5	40	93.57	0.9357
17-6	60	94.45	0.9445

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-4-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 3.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.0	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์	3.0	เท่าเฟอร์รัสคลอไรด์
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
18-1	2	66.54	0.6654
18-2	5	83.99	0.8399
18-3	10	91.59	0.9159
18-4	20	92.98	0.9298
18-5	40	94.19	0.9419
18-6	60	93.97	0.9397

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-4-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งต้น 5.0 เท่าของปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์	5.0	เท่าเฟอร์รัสคลอไรด์
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
19-1	2	67.07	0.6707
19-2	5	82.26	0.8226
19-3	10	90.04	0.9004
19-4	20	91.54	0.9154
19-5	40	92.85	0.9285
19-6	60	93.03	0.9303

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-5

ผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์เมื่อปรับความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-5-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลต่อลิตร

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	0.5	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
20-1	2	70.94	0.7094
20-2	5	88.45	0.8845
20-3	10	95.64	0.9564
20-4	20	98.47	0.9847
20-5	40	99.28	0.9928
20-6	60	98.18	0.9818

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-5-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.0 โมลต่อลิตร

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	1.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
21-1	2	70.57	0.7057
21-2	5	86.17	0.8617
21-3	10	94.04	0.9404
21-4	20	96.50	0.9650
21-5	40	96.56	0.9656
21-6	60	97.14	0.9714

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-5-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.5 โมลต่อลิตร

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	1.5	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
22-1	2	69.54	0.6954
22-2	5	86.69	0.8669
22-3	10	95.37	0.9537
22-4	20	97.41	0.9741
22-5	40	98.86	0.9886
22-6	60	99.09	0.9909

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-5-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.0 โมลต่อลิตร

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
5-1	2	68.41	0.6841
5-2	5	86.72	0.8672
5-3	10	91.40	0.9140
5-4	20	95.06	0.9506
5-5	40	94.49	0.9449
5-6	60	96.56	0.9656

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-5-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลต่อลิตร

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.5	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
23-1	2	67.42	0.6742
23-2	5	83.60	0.8360
23-3	10	92.39	0.9239
23-4	20	94.72	0.9472
23-5	40	96.38	0.9638
23-6	60	96.16	0.9616

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-5-6 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3.0 โมลต่อลิตร

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	3.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
24-1	2	69.30	0.6930
24-2	5	86.33	0.8633
24-3	10	93.19	0.9319
24-4	20	96.37	0.9637
24-5	40	96.24	0.9624
24-6	60	96.55	0.9655

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-6

ผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์เมื่อปรับขนาดของเม็ดแร่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-6-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –45+65 เมช

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –45+65 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
25-1	2	51.47	0.5147
25-2	5	65.58	0.6558
25-3	10	82.71	0.8271
25-4	20	92.34	0.9234
25-5	40	98.26	0.9826
25-6	60	99.08	0.9908

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-6-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –65+100 เมช

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –65+100 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
26-1	2	57.39	0.5739
26-2	5	80.54	0.8054
26-3	10	92.53	0.9253
26-4	20	96.64	0.9664
26-5	40	99.20	0.9920
26-6	60	98.95	0.9895

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-6-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –100+150 เมช

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
5-1	2	73.96	0.7396
5-2	5	89.62	0.8962
5-3	10	96.22	0.9622
5-4	20	98.66	0.9866
5-5	40	99.46	0.9946
5-6	60	97.89	0.9789

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-6-4 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –150+200 เมช

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –150+200 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
27-1	2	68.41	0.6841
27-2	5	86.72	0.8672
27-3	10	91.40	0.9140
27-4	20	95.06	0.9506
27-5	40	94.49	0.9449
27-6	60	96.56	0.9656

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-6-5 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์โดยใช้เม็ดแร่ขนาด –200+270 เมช

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –200+270 เมช	2.00	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.4	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
28-1	2	92.30	0.9230
28-2	5	99.41	0.9941
28-3	10	98.74	0.9874
28-4	20	98.77	0.9877
28-5	40	98.76	0.9876
28-6	60	99.19	0.9919

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-7

ผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์เมื่อปรับเปอร์เซ็นต์ของแข็ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-7-1 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 5 เปอร์เซ็นต์

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	25.000	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	5	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
29-1	2	85.42	0.8542
29-2	5	90.24	0.9024
29-3	10	91.87	0.9187
29-4	20	92.98	0.9298
29-5	40	91.49	0.9149
29-6	60	94.14	0.9414

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-7-2 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	50.000	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	2.0	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	10	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
30-1	2	63.97	0.6397
30-2	5	67.09	0.6709
30-3	10	69.32	0.6932
30-4	20	72.75	0.7275
30-5	40	73.70	0.7370
30-6	60	77.99	0.7799

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-7-3 ตารางแสดงผลการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 3.5 โมลต่อลิตร

สภาวะการทดลอง

ปริมาณไพโรลูไซต์ขนาด –100+150 เมช	50.000	กรัม
สารละลายกรดไฮโดรคลอริเข้มข้น	3.5	โมลต่อลิตร
ปริมาตรสารละลาย	500	มิลลิลิตร
ปริมาณเฟอร์รัสคลอไรด์	1.00	เท่าของปริมาณสตอยชีโอเมตรี
อุณหภูมิ	70	องศาเซลเซียส
อัตราการกวน	850	รอบต่อนาที
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	10	เปอร์เซ็นต์

หมายเลขการทดลอง	เวลา (นาที)	ปริมาณการละลาย (เปอร์เซ็นต์)	สัดส่วนการละลาย
31-1	2	73.24	0.7324
31-2	5	80.12	0.8012
31-3	10	84.94	0.8494
31-4	20	86.28	0.8628
31-5	40	85.64	0.8564
31-6	60	85.66	0.8566

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบดีพล รุ่งเรืองธรรม เกิดวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2519 จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตจากภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2541 จากนั้นได้เข้ารับการศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2541 เป็นต้นมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย