183

การทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซต์โดยการทำให้เป็นก้อน

นาย รักษพล ชูชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-632-889-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16545817

STABILIZATION BY SOLIDIFICATION OF JAROSITE RESIDUES

Mr. Ruksapone Chuchat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Environmental Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-632-889-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซต์โดยการทำให้เป็นก้อน
โดย นาย รักษพล ชูชาติ
ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

รักษพล ชูชาติ : การทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซต์โดยการทำให้เป็นก้อน
(STABILIZATION BY SOLIDIFICATION OF JAROSITE RESIDUES)
อ.ที่ปรึกษา : รศ.วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.บุญยง
โล่ห์วงศ์วัฒน, 162 หน้า. ISBN 974-632-889-1

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดในการทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซต์โดยการทำให้เป็นก้อน กากตะกอนจาโรไซต์เป็นกากตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนผลึกเหล็กด้วยกระบวนการจาโรไซต์ในระหว่างกระบวนการสกัดสังกะสีออกไซด์ กากตะกอนที่เกิดขึ้นมี 2 ประเภทได้แก่ กากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาและกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมปูนขาว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากแร่สังกะสีซิลิเกต โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1. การทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 2. การทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด 3. การทดสอบการชะละลายในระยะยาว วิธีที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด

ผลการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ผลการทดลองดีที่สุด โดยอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 14 สำหรับกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา และอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 สำหรับกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ สามารถทำให้สมบัติของก้อนตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการทดสอบสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด พบว่าอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ร้อยละ 11 และร้อยละ 15 สำหรับกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาและกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ตามลำดับ สามารถทำให้สมบัติของก้อนตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการทดสอบกากชะละลายในระยะยาวเป็นการทดสอบในคอมลัมน์โดยใช้น้ำประปาที่มีพีเอชอยู่ระหว่าง 5.8 และ 6.3 เป็นน้ำชะละลาย เมื่อกำหนดอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 10 พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดช่วงระยะเวลาชะละลาย 90 วัน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

##C517597 : MAJOR SANITARY ENGINEERING
KEY WORD: SOLIDIFICATION/STABILIZATION/HEAVY METAL SLUDGE
RUKSAPONE CHUCHAT : STABILIZATION BY SOLIDIFICATION OF JAROSITE RESIDUES. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. WONGPUN LIMPASENI, THESIS CO-ADVISOR : MR. BOONYONG LOHWONGWATANA, 162 pp. ISBN 974-632-889-1

This research investigated the optimum binder for stabilization of jarosite residues by solidification. Jarosite residues were generated from precipitation of ferric solution by jarosite process in the process of extraction of zine oxide. There were two types of jarosite residues which were conventional jarosite and sillico jarosite residues.

The binders used in the study were portland cement, lime, a mixture of portland cement and lime, and a mixture of portland cement and zinc sillicate waste. The experiments were divided into three stages consisting of trial test, optimization test and long-term leching test. The methods employed to assess the effectiveness of the solidification were compressive strenght and concentration of heavy metals in extractant.

The result of trial test unveiled that portland cement was the best binder. The best mix proportions of portland cement were found to be 14 percent and 20 percent for conventional jarosite and silico jarosite, respectively. Both mix proportions yielded the properties of solidified residues meeting the solidifies standard promulgated by the Ministry of Industry.

In the optimization test, it was found that the optimum mix proportions of portland cement were 11 percent and 15 percent for conventional jarosite and silico jarosite, respectively. Both mix proportions resulted the properties of solidified residues meeting the solidified standard promulgated by the Ministry of Industry.

The consequence of long-term leaching test using tap water, pH 5.8-6.3,as leaching solution in column test for mix proportion of 10 percent portland cement revealed that the concentration of heavy metals in the leachate throughout the 90 - day period of leaching were lower than the industrial effluent standards issued by the Ministry of Industry.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ และอาจารย์ บุญยง โลห์วงศ์วัฒน ที่กรุณาช่วยเหลือและให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีอนุภาคไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และแผนกปฏิพีวิทยา กองปฏิพีวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท ผาแดงอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย คุณสุวิทย์ เอื้อวณิชกุล ที่ให้คำแนะนำและจัดเตรียมกากตะกอน

ขอขอบคุณพี่ชาย และเพื่อนๆ ที่มีน้ำใจและความห่วงใยแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฐ
สารบัญรูป ..... ด
บทที่
1 บทนำ 1
2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย 2
3 การทบทวนเอกสาร 4
ของเสียที่เป็นอันตราย 4
โลหะหนัก 4
กระบวนการจาโรไซต์ 5
1. การตกตะกอนผลึกเหล็กในรูปกากตะกอนจาโรไซต์ 5
2. การสกัดแร่โดยใช้กรดร้อน 6
การบำบัดและกำจัดของเสียที่เป็นอันตราย 9
การทำเสถียรของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน 12
1. คำจำกัดความและที่มาของการทำให้เป็นก้อน 12
2. การทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ 13
3. กลไกการยึดจับโลหะหนัก 18
ปูนซีเมนต์ 20
ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ 22
ปูนขาว 23
วิธีการสกัดสารและการทดสอบการชะละลาย 23

หน้า

การประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน 25
เกณฑ์มาตรฐานในการระบุของเสียที่เป็นอันตราย 27
การศึกษาที่ผ่านมา 29
4 การดำเนินการวิจัย 37
วัสดุที่ใช้ในการศึกษา 37
1. กากตะกอนจาโรไซต์ 37
2. วัสดุประสาน 38
เครื่องมือและอุปกรณ์ 38
1. การทดลองผสมกากตะกอนกับวัสดุประสานและการทดสอบกำลังรับแรงอัด 38
2. การทดสอบการสกัดสาร 39
3. การทดสอบความให้ซึมได้ 39
4. การวิเคราะห์โครงสร้างภายใน 40
วิธีการศึกษา 40
1. การทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 40
2. การทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด 42
3. การทดสอบการชะละลายในระยะยาว 43
การศึกษาสมบัติของกากตะกอนจาโรไซต์ 43
1. สมบัติทางด้านกายภาพ 43
2. สมบัติทางด้านเคมี 44
การทดสอบสมบัติของกากตะกอนจาโรไซต์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสาน 44
1. การทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้นและการทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด 45
2. การทดสอบการชะละลายในระยะยาว 47
3. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน 48
5 ผลการทดลองและวิจารณ์ 52

หน้า

ลักษณะสมบัติของกากตะกอนจาโรไซต์ 52
1. สมบัติทางด้านกายภาพ 52
2. สมบัติทางด้านเคมี 56
ผลการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 58
1. กำลังรับแรงอัด 58
2. ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด 62
3. สรุปผลการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 64
ผลการทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด 67
1. สมบัติทางกายภาพของกากตะกอนจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อน
ด้วยปูนซีเมนต์ 67
2. ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด 71
3. สรุปผลการทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด 78
ผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาว 78
1. สมบัติทางกายภาพของกากตะกอนจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อน
ด้วยปูนซีเมนต์ 81
2. ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด 86
3. ลักษณะสมบัติของน้ำชะละลายในคอลัมน์ 93
4. ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายใน 103
5. สรุปผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาว 114
การประมาณค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนจาโรไซต์ 114
1. ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อน 114
2. ค่าขนส่งไปยังหลุมฝังกลบ 116
3. ค่าฝังกลบ 116
4. ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนจาโรไซต์ต่อหน่วยการผลิต 118
6 สรุปผลการวิจัย 119
7 ข้อเสนอแนะในการวิจัย 121

หน้า

รายการอ้างอิง 122
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง 125
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ในขั้นตอนการทดสอบการชะละลายในระยะยาว 144
ภาคผนวก ค ภาพถ่ายก้อนตัวอย่าง 147
ภาคผนวก ง วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ 150
ประวัติผู้เขียน 162

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนในแต่ละวิธีการ 14

ตารางที่ 3.2 ประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสมในการทำเสถียร
และทำให้เป็นก้อน 17

ตารางที่ 3.3 ออกไซด์ของธาตุต่างๆ และสารประกอบที่สำคัญของ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 21

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบวิธีการสกัดสาร 24

ตารางที่ 3.5 ลักษณะสมบัติที่ต้องการของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วย
วิธี Sealosafe 26

ตารางที่ 3.6 ค่ามาตรฐานของสารมลพิษต่างๆ จากการทดสอบด้วยวิธี TCLP 28

ตารางที่ 3.7 แสดงช่วงของของเสียที่เป็นอันตรายและของเสียเฉื่อย 30

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทำกากตะกอนจาโรไซต์
ให้เป็นก้อน 41

ตารางที่ 5.1 ผลวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพของกากตะกอนจาโรไซต์ 53

ตารางที่ 5.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของธาตุในกากตะกอนจาโรไซต์และ
กากแร่สังกะสีซิลิเกต 56

ตารางที่ 5.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนจาโรไซต์
ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด 57

ตารางที่ 5.4 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกอนจาโรไซต์ดิบ 58

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา
ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆจากการ
ทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 59

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์
ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆจากการ
ทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 60

หน้า

ตารางที่ 5.7 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ 65
ตารางที่ 5.8 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ 66
ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง 68
ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและประเภทห้า 69
ตารางที่ 5.11 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ในขั้นตอนทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด 72
ตารางที่ 5.12 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ในขั้นตอนทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด 72
ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ 81
ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ 82
ตารางที่ 5.15 ผลการทดสอบความให้ซึมได้ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ 84
ตารางที่ 5.16 ผลการทดสอบความให้ซึมได้ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ 84
ตารางที่ 5.17 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 11ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ 86
ตารางที่ 5.18 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ 86

หน้า

ตารางที่ 5.19	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบการชะละลายในคอลัมน์	93
ตารางที่ 5.20	ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ10	94
ตารางที่ 5.21	ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10	94
ตารางที่ 5.22	ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำชะละลายในคอลัมน์ควบคุม	95
ตารางที่ 5.23	ผลคำนวณสัดส่วนสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ในช่วงระยะเวลาชะละลาย 90 วัน	95
ตารางที่ 5 24	ผลคำนวณสัดส่วนสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ในช่วงระยะเวลาชะละลาย 90 วัน	96
ตารางที่ 5.25	ค่าปัจจัยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกากตะกอนจาโรไซต์ทั้ง 2 ประเภท	116
ตารางที่ 5.26	ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนจาโรไซต์	118

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1 แผนภูมิกระบวนการจาโรไซต์ 7
รูปที่ 3.2 แผนภูมิกระบวนการถลุงสังกะสีของโรงงานผาแดงอินดัสตรี ปี พ.ศ. 2535 10
รูปที่ 3.3 แผนภูมิกระบวนการถลุงสังกะสีของโรงงานผาแดงอินดัสตรี ปี พ.ศ. 2538 11
รูปที่ 3.4 การแบ่งกระบวนการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน 13
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงพีเอชและความเป็นด่างสะสมจากการสกัด 15 ครั้ง 19
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลาย ความเป็นด่างถูกชะละลาย และซิลิคอนถูกชะละลาย จากการสกัด 15 ครั้ง 19
รูปที่ 3.7 แผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว 20
รูปที่ 4.1 แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5x5x5 ซม. 46
รูปที่ 4.2 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัด 46
รูปที่ 4.3 เครื่องเขย่า 200 รอบ/นาที 49
รูปที่ 4.4 เครื่องมือทดสอบความให้ซึมได้ 49
รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในระยะยาว 50
รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก 51
รูปที่ 5.1 กราฟการกระจายขนาดคละของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา 54
รูปที่ 5.2 กราฟการกระจายขนาดคละของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ 55
รูปที่ 5.3 กราฟแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆจากการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 61
รูปที่ 5.4 กราฟแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆจากการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 61
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา ที่ทำให้เป็นก้อนกับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง 68

หน้า

รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์
ที่ทำให้เป็นก้อนกับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง 70
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์
ที่ทำให้เป็นก้อนกับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า 70
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชในน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์
ต่อกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา 74
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชในน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์
ต่อกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ 74
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอาร์เซนิคในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา 75
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอาร์เซนิคในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ 75
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา 76
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ 76
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา 79
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ 79
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา 80
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ 80
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มของอัตราส่วนผสม
ปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาร้อยละ 11 83

หน้า

รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มของ
อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ร้อยละ 15 83
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความให้ซึมได้ของกากตะกอนจาโรไซต์
แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 11 กับระยะเวลาบ่ม 85
รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความให้ซึมได้ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์
ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 กับระยะเวลาบ่ม 85
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของน้ำสกัดจากกากตะกอนจาโรไซต์
แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 11 กับระยะเวลาบ่ม 88
รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของน้ำสกัดจากกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์
ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 กับระยะเวลาบ่ม 88
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอาร์เซนิคในน้ำสกัดจากกากตะกอน
จาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 11
กับระยะเวลาบ่ม 89
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดจากกากตะกอน
จาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์กับระยะเวลาบ่ม 89
รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดจากกากตะกอน
ซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15
กับระยะเวลาบ่ม 91
รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดจากกากตะกอน
จาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 11
กับระยะเวลาบ่ม 91
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดจากกากตะกอน
จาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 11
กับระยะเวลาบ่ม 92
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดจากกากตะกอน
ซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15
กับระยะเวลาบ่ม 92

หน้า

รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 97
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นด่างในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 97
รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอาร์เซนิคในน้ำชะละลายและสัดส่วนสะสมที่อาร์เซนิคถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 99
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอาร์เซนิคในน้ำชะละลายและสัดส่วนสะสมที่อาร์เซนิคถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 99
รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะละลายและสัดส่วนสะสมที่โครเมียมถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 101
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะละลายและสัดส่วนสะสมที่โครเมียมถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 101
รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะละลายและสัดส่วนสะสมที่ตะกั่วถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 102
รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 102

หน้า

รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำชะละลายและสัดส่วน
สะสมที่สังกะสีถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนจาโรไซต์
แบบธรรมดาที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10
กับระยะเวลาชะละลาย 104
รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำชะละลายและสัดส่วน
สะสมที่สังกะสีถูกชะละลายในคอลัมน์ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์
ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาชะละลาย 104
รูปที่ 5.40 X-ray diffraction ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา 106
รูปที่ 5.41 X-ray diffraction ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา ที่อัตราส่วนผสม
ปูนซีเมนต์ร้อยละ 11 ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน 107
รูปที่ 5.42 X-ray diffraction ของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา ที่อัตราส่วนผสม
ปูนซีเมนต์ร้อยละ 11 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน 108
รูปที่ 5.43 X-ray diffraction ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ 109
รูปที่ 5.44 X-ray diffraction ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ ที่อัตราส่วนผสม
ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน 110
รูปที่ 5.45 X-ray diffraction ของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ ที่อัตราส่วนผสม
ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน 111
รูปที่ 5.46 ภายถ่ายจุลทรรศน์อิเลคตรอนของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา
ที่ขนาดกำลังขยาย 9,000 เท่า 112
รูปที่ 5.47 ภายถ่ายจุลทรรศน์อิเลคตรอนของของกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา
ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 11 ที่ขนาดกำลังขยาย 10,000 เท่า 112
รูปที่ 5.48 ภายถ่ายจุลทรรศน์อิเลคตรอนของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์
ที่ขนาดกำลังขยาย 9,000 เท่า 113
รูปที่ 5.49 ภายถ่ายจุลทรรศน์อิเลคตรอนของของกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์
ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ที่ขนาดกำลังขยาย 9,000 เท่า 113