การทำเสถียรภากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ/หรือปูนขาว

นายประกฤต ฉัตรแสงอุทัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-313-4

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

15 มี.ค. 2546

I18956ADX

STABILIZATION OF ARC FURNACE SLAG USING PORTLAND CEMENT AND/OR LIME

Mr. Prakit Chatsanguthai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 1999

ISBN 974-333-313-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำเสถียรกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ/หรือปูนขาว
โดย	นายประกฤต ฉัตรแสงอุทัย
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเธียร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธัชชัย สุมิตร)

คณะกรรมการวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเธียร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประกฤต ฉัตรแสงอุทัย : การทำเสถียรกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ/หรือปูนขาว (STABILIZATION OF ARC FURNACE SLAG USING PORTLAND CEMENT AND/OR LIME) อ.ที่ปรึกษา : รศ. สุรี ขาวเธียร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน , 193 หน้า. ISBN 974-333-313-4

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำเสถียรกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กด้วยไฟฟ้าโดยใช้วัสดุประสานชนิดต่างๆ เพื่อพิจารณาเลือกใช้ชนิดและสัดส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดในการทำกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กให้เป็นก้อนแข็ง และมีคุณสมบัติเป็นไปตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) กากตะกรันที่ใช้ทดลองเป็นกากตะกรันที่เกิดจากเตาหลอมเหล็กในกระบวนการผลิตเหล็กเส้น ซึ่งคาดว่าประเทศไทย จะมีกากตะกรันประเภทนี้ เกิดขึ้นประมาณ 45,300 ตันต่อปี กากตะกรันที่เกิดขึ้นมี 2 ประเภท ได้แก่ กากตะกรันดำ คือ กากตะกรันที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการกำจัดสารมลทินในน้ำเหล็ก และ กากตะกรันขาว คือ กากตะกรันที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปรับแต่งคุณภาพของน้ำเหล็ก กากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้านี้ถูกจัดให้เป็นของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดจำเพาะประเภทหรือจำเพาะชนิด ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ผลการศึกษาพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิดให้เป็นก้อนแข็ง โดยประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุดและมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประสานชนิดอื่น คือ ปูนซีเมนต์ผสมปูนขาว ปูนซีเมนต์ผสมโซเดียมซิลิเกต และ ปูนซีเมนต์ผสมปูนขาวผสมโซเดียมซิลิเกต ที่อัตราส่วนผสมที่เท่ากัน และพบว่าอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 15 เทียบกับน้ำหนักของกากตะกรันทั้ง 2 ประเภท และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.7 เป็นสัดส่วนที่ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานของประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) ความหนาแน่น และปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด ผ่านมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

สำหรับค่าใช้จ่ายซึ่งประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อน ค่าขนส่งไปยังหลุมฝังกลบ และ ค่าฝังกลบที่ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม จังหวัดราชบุรี ในการกำจัดกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด รวมกัน เท่ากับ 1,230 บาท ต่อตันกากตะกรัน หรือเท่ากับ 73.80 บาท ต่อการผลิตเหล็กเส้น 1 ตัน หรือ คิดเป็นร้อยละ 0.75 ของราคาเหล็กเส้น

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

3970948121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORD : STABILIZATION / SOLIDIFICATION / HEAVY METAL SLAG
PRAKIT CHATSANGUTHAI : STABILIZATION OF ARC FURNACE SLAG USING PORTLAND CEMENT AND/OR LIME. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUREE KHAODHIAN, THESIS CO-ADVISOR : MR. BOONYONG LOHWONGWATANA, 193 pp. ISBN 974-333-313-4

This research investigated type and mixing ratio of binders for the stabilization /solidification of electric arc furnace slags and meeting the solidified standards promulgated by the Ministry of Industry No.1/B.E. 2531 and No.6/B.E. 2540. An estimate of 45,300 ton /year of slags were generated from electric arc furnaces producing steel rod. There were two types of electric arc furnace slags which were black and white slag. The black slag was generated from the purifying process and the white slag was generated from the refining process. According to the notification of the Ministry of Industry No.6 (B.E. 2540), electric arc furnace slag had been classified as specific sources hazardous wastes.

The results of the solidification unveiled that portland cement was the most appropriate binder in terms of economical and the compressive strength compared to other binders, which were a mixture of portland cement and lime, a mixture of portland cement and sodium silicate, and a mixture of portland cement and lime and sodium silicate, of equal mixing ratios. It was also found thet the optimum mixing ratios for the portland cement were 15 percent and the water/cement ratio were 0.7 for both black slag and white slag. The density and concentration of heavy metals in extractant also met the solidified standard promulgated by the Ministry of Industry.

The estimated cost for the stebilization /solidification of the slags, included the solidification cost, the transportation cost and the cost for disposal in the secured landfill at Rajburi of the Ministry of Industry, were about 1,230 baht per ton of slags or equal to 73.80 baht per ton of steel rod or 0.75 percent of the price of steel rod.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต ประกิจ
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน และ รศ. สุรี ขาวเธียร ที่กรุณาช่วยเหลือและให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ อาจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพานิช ที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ คุณชัชศรัณย์ เชิดชูตระกูลชัย และพี่ๆเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกๆ คนในครอบครัว ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฏ
บทที่
1 บทนำ 1
2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย 3
3 ทบทวนเอกสาร 4
3.1 ของเสียอันตราย 4
3.2 โลหะหนัก 5
3.3 การผลิตเหล็กเส้น 6
3.3.1 ประเภทของการผลิต 6
3.3.2 วัตถุดิบ 6
3.3.3 กรรมวิธีการผลิตเหล็กเส้นโดยใช้เตาหลอมไฟฟ้า 8
3.3.4 การเกิดกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็ก 10
3.3.5 ส่วนประกอบทางเคมีของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็ก 12
3.3.6 ปัญหาและแนวทางการจัดการกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็ก ... 13
3.4 การบำบัดและกำจัดของเสียอันตราย 14
3.5 การทำเสถียรของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน 15
3.5.1 คำจำกัดความและที่มาของการทำให้เป็นก้อน 15
3.5.2 การทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ 20
3.5.3 กลไกการยึดจับโลหะหนัก 22
3.6 ปูนซีเมนต์ 25
3.7 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ 25

หน้า

3.8 ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ 26
3.9 ปูนขาว 28
3.10 โซเดียมซิลิเกต 28
3.11 การทดสอบการชะละลาย 29
3.12 การประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน 30
3.13 เกณฑ์มาตราฐานในการระบุของเสียอันตราย 32
3.14 การศึกษาที่ผ่านมา 36
4 การดำเนินการทดลอง 45
4.1 แผนการวิจัย 45
4.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา 45
4.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 46
4.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 46
4.1.3.1 การทดลองผสมกากตะกรันกับวัสดุประสานและ
การทดสอบกำลังรับแรงอัด 46
4.1.3.2 การทดสอบการสกัดสาร 46
4.2 วิธีการศึกษา 47
4.2.1 การศึกษาหาชนิดของวัสดุประสานที่เหมาะสม 47
4.2.2 การศึกษาอัตราส่วนผสมวัสดุประสานที่เหมาะสม 51
4.2.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 51
4.3 การศึกษาสมบัติของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า 52
4.3.1 สมบัติทางด้านกายภาพ 52
4.3.2 สมบัติทางด้านเคมีของกากตะกรัน 53
4.4 การทดสอบสมบัติของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กที่ผ่าน
การทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสาน 54
4.4.1 กำลังรับแรงอัด 54
4.4.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด 55
5 ผลการทดลองและวิจารณ์ 59
5.1 ลักษณะสมบัติของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า 59
5.2 ผลการทดสอบสัดส่วนผสมของวัสดุประสานเบื้องต้น 66

หน้า

5.3 ผลการทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด 84
5.4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 96
5.5 ผลการศึกษาการใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน 108
5.6 ประสิทธิภาพในการทำให้โลหะหนักคงตัว 118
5.7 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดจากวิธีทดสอบตาม ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (2531) กับ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (2540) 120
5.8 การประมาณค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า 122
6 สรุปผลการศึกษา 125
7 ข้อเสนอแนะในการวิจัย 128
รายการอ้างอิง 129
ภาคผนวก 132
ภาคผนวก ก ภาพถ่ายก้อนตัวอย่าง 133
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง 135
ภาคผนวก ค รายการการคำนวณประสิทธิภาพในการทำให้โลหะหนักคงตัว 175
ภาคผนวก ง การประมาณค่าใช้จ่ายในการทำเสถียรกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าด้วยปูนขาว 182
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) 184
ประวัติผู้เขียน 193

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็ก 12
ตารางที่ 3.2 กระบวนการกำจัดของเสียอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน 17
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนในแต่ละวิธีการ 18
ตารางที่ 3.4 ประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสมในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน 21
ตารางที่ 3.5 ค่าออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 25
ตารางที่ 3.6 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 26
ตารางที่ 3.7 ลักษณะสมบัติที่ต้องการของของเสียอันตรายที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ด้วยวิธี Sealosafe 31
ตารางที่ 3.8 ค่ามาตรฐานของสารพิษต่างๆจากการทดสอบด้วยวิธี TCLP 33
ตารางที่ 3.9 แสดงช่วงของของเสียอันตรายและของเสียเฉื่อย 35
ตารางที่ 4.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานชนิดต่างๆที่ใช้ในการทำกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าให้เป็นก้อนแข็ง 48
ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของธาตุในกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า 63
ตารางที่ 5.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น ตามวิธีมาตรฐานของ U.S. EPA 64
ตารางที่ 5.3 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีสกัดตามวิธีของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 64
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกรันดำที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ จากการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 68
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกรันขาวที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ จากการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 69
ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันดำที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ ในขั้นตอนทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 79

หน้า

ตารางที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันขาวที่ทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ ในขั้นตอนทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 80
ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 85
ตารางที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันดำที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ 89
ตารางที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันขาวที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ 90
ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์สัดส่วนผสมร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่างๆ 97
ตารางที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันดำที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่างๆ 101
ตารางที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันขาวที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์อัตราส่วนผสมน้ำต่างๆ 102
ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน 109
ตารางที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ 113
ตารางที่ 5.16 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 – 89 และ ASTM D 1633 – 84 121
ตารางที่ 5.17 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าต่อน้ำหนักกากตะกรัน 123

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงกรรมวิธีการผลิตเหล็กเส้น 11
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเกิดกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า 11
รูปที่ 3.3 การแบ่งกระบวนการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน 15
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงพีเอชและความเป็นด่างสะสมจากการสกัด 15 ครั้ง 22
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลาย ความเป็นด่างถูกชะละลาย และซิลิกอนถูกชะละลาย จากการสกัด 15 ครั้ง 23
รูปที่ 3.6 แผนภาพ pC – pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว 24
รูปที่ 4.1 กากตะกรันดำ 56
รูปที่ 4.2 กากตะกรันขาว 56
รูปที่ 4.3 แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 × 5 × 5 เซนติเมตร 57
รูปที่ 4.4 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัด Autograph วัดแรงอัดได้สูงสุด 1 ตัน 57
รูปที่ 4.5 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัด ชนิดวัดแรงอัดได้สูงสุด 9 ตัน 58
รูปที่ 4.6 เครื่องกวนเขย่าหมุน (Rotary agitator) 58
รูปที่ 5.1 กราฟการกระจายขนาดคละของกากตะกรัน 60
รูปที่ 5.2 กราฟการกระจายขนาดคละของกากตะกรันขาว 61
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนผสมวัสดุประสานชนิดต่างๆ ในการทำกากตะกรันดำให้เป็นก้อนแข็ง 73
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนผสมวัสดุประสานชนิดต่างๆ ในการทำกากตะกรันขาวให้เป็นก้อนแข็ง 74
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนผสมวัสดุประสานชนิดต่างๆ ในการทำกากตะกรันดำให้เป็นก้อนแข็ง 76
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนผสมวัสดุประสานชนิดต่างๆ ในการทำกากตะกรันขาวให้เป็นก้อนแข็ง 77
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 85

หน้า

รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 88
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชในน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 91
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 93
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กในน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 94
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 97
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 99
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของน้ำสกัดและอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 103
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดและอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 105
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กในน้ำสกัดและอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 106
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนผสมปูนขาว ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 110
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนผสมปูนขาว ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 111
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชในน้ำสกัดและอัตราส่วนผสมปูนขาว ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 113
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดและอัตราส่วนผสมปูนขาว ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 115

หน้า

รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กในน้ำส่กัดและอัตราส่วนผสมปูนขาว
ในการทำกากตะกรันทั้ง 2 ชนิด ให้เป็นก้อนแข็ง 115
รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM
C 109 – 86 และ ASTM D 1633 – 84 121

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย