การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนของตะกรัน จากการถลุงแร่เซรัสไซต์

นางสาว ประพิศลา เทพสิทธา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-613-9

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 19083610

STABILIZATION AND SOLIDIFICATION OF THE SLAG FROM CE-RUSITE SMELTING

Miss Prapisala Thepsithar

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 974-334-613-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนของตะกรันจากการถลุงแร่เซรัสไซต์
โดย	นางสาว ประพิศลา เทพสิทธา
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเธียร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเธียร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

ประพิศลา เทพสิทธา : การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนของตะกรันจากการถลุงแร่เซรัสไซต์ (STABILIZATION AND SOLIDIFICATION OF THE SLAG FROM CE-RUSITE SMELTING) อ.ที่ปรึกษา รศ. สุรี ขาวเธียร, อ.ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน, 181 หน้า, ISBN 974-334-6 13-9

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดกากตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่เซรัสไซต์เพื่อผลิตตะกั่วแท่งบริสุทธิ์ กากตะกรันนี้เป็นของแข็งปนเปื้อนโลหะหนักซึ่งถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับบที่ 6 พ.ศ.2540 วิธีการบำบัดของแข็งปนเปื้อนโลหะหนักที่เหมาะสมคือ การทำเสถียรและ/หรือการทำให้เป็นก้อน ขั้นตอนในการศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ การศึกษาลักษณะสมบัติของกากตะกรัน การศึกษาการทำเสถียรกากตะกรันด้วยปูนขาว และการศึกษาการทำให้เป็นก้อนแข็งของกากตะกรัน โดยการศึกษาการทำให้เป็นก้อนจะพิจารณาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนด้วย ได้แก่ ชนิดของวัสดุประสาน ขนาดอนุภาคของกากตะกรัน ปริมาณวัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน นอกจากนี้ยังศึกษาผลของระยะเวลาบ่มด้วย เกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมต่างๆ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัด นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัด และปริมาตรสุดท้ายของของเสียที่เกิดขึ้นด้วย

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของกากตะกรันพบว่ากากตะกรันนี้มีปริมาณตะกั่วประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดมีค่าประมาณ 9 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานของเสียอันตรายของกระทรวงอุตสาหกรรม ผลการทดลองทำเสถียรกากตะกรัน พบว่า กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำมากและไม่สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานของทางราชการได้ ในขณะที่มีเพียงการใช้ปริมาณปูนขาวร้อยละ 100 เทียบกับน้ำหนักกากตะกรันเท่านั้น ที่สามารถทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ ซึ่งที่อัตราส่วนนี้จะทำให้ของเสียมีปริมาตรสุดท้ายเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของปริมาตรเดิม นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น จาก 7, 14 และ 28 วันก็ไม่สามารถทำให้คุณสมบัติต่างๆของก้อนตัวอย่างดีขึ้นได้จนได้ตามข้อกำหนดของทางราชการ

ผลการศึกษาการทำให้เป็นก้อนของกากตะกรันพบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 12 เทียบกับน้ำหนักของกากตะกรันเป็นวัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.8 สามารถทำให้คุณสมบัติต่างๆของของเสียผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคของกากตะกรันมีผลต่อการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ โดยเมื่อใช้วัสดุประสานน้อย กากตะกรันที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีคุณสมบัติต่างๆผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามกฎหมายได้ ในขณะที่กากตะกรันที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าไม่สามารถอยู่เป็นก้อนได้

เมื่อเปรียบเทียบการบำบัดทั้งสองวิธีข้างต้น การบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 12 เทียบกับน้ำหนักกากตะกรัน มีความเหมาะสมกว่าการผสมด้วยปูนขาว โดยประสิทธิภาพในการทำให้ตะกั่วคงตัวมีค่าร้อยละ 50 และอยู่ในค่าเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม สำหรับค่าใช้จ่ายในการบำบัดจะตกประมาณ 364 บาทต่อตันของกากตะกรัน ทั้งนี้ไม่รวมค่าสถานที่ฝังกลบ

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

3970962921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : STABILIZATION / SOLIDIFICATION / HEAVY METAL / SLAG / LEAD

PRAPISALA THEPSITHAR : STABILIZATION AND SOLIDIFICATION OF THE SLAG FROM CE-RUSITE SMELTING. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SUREE KHAODHAIN, THESIS ADVISOR : MR. BOONYONG LOHWONGWATANA, 181 pp. ISBN 974-334-613-9

This research is to investigate the treatment of slag generating from Ce-rusite smelter producing pure lead ingot. The slag, containing heavy metals, has been categorized as hazardous waste according to the Notification of the Ministry of Industry No.6 (B.E.2540). The appropriate methods for treatment of heavy metal slag are stabilization and/or solidification. This study was divided into three tasks as follows: the characteristics of slag, the stabilization of slag with lime, and the solidification of slag. Factor affecting the solidification of slag such as type and amount of binder, size of slag, and water/binder ratio as well as curing time had been taken into consideration. The criterion for proper treatment were compressive strength, density, concentration of lead in extractant, preliminary solidification cost and final volume of the end product.

The result of the investigation had shown that the Ce-rusite smelting's slag contained approximately 8 percent of lead by weigth. The concentration of lead in extractant was approximately 9 mg/l which exceeded the hazardous waste standard set by the Ministry of Industry. The stabilization of slag with lime had shown very low compressive strength and could not meet the government standard. Only the mixing ratio of 100 percent of lime to slag could produce lead concentration in the extractant meeting the official standard, but increased the final volume of waste by 2 times. Besides, if the curing time was increased from 7 to 28 days, it did not improve the characteristics of the specimen to meet the official standard.

The solidification of slag had shown that the use of 12 percent portland cement by weight as a binder and a water/binder ratio of 0.8 could improve and meet the criteria set by the Notification No.6/2540 of Ministry of Industry. Besides, if using low amount of portland cement as a binder, the solidification of smaller the size of slag could meet the official standard but the bigger the slag size could not .

When compare the two methods of slag treatment, the solidification by 12 percent portland cement by weight was prefer to the stabilization using lime. The stabilization efficiency of lead was 50 percent and meeting the Ministry of Industry's standard. The treatment cost was about 364 bath per ton of slag excluding landfill cost.

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. สุรี ขาวเธียร และอาจารย์บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน ที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือ และผลักดันจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อความสมบูณย์ยิ่งขึ้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณคณาจารย์ทุกๆท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิ ชิน โสภณพานิช ที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณไพศาล ดาวเรือง และคุณสรยุทธ ห้าวหาญ บริษัทโลหะตะกั่วไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องการชมโรงงานการผลิตตะกั่ว และการเก็บตัวอย่างกากตะกรัน

ขอขอบคุณ พี่วรรธณา ห้องปฏิบัติการเครื่องมือ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม พี่ศิโรจน์ ห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และ พี่อุทิศ ห้องปฏิบัติการเหมืองแร่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ สุรพันธ์ โปวอนุสรณ์, ปริญญา บุญสงแท้, ศักรินทร์ ภักดี, วรญา ประทุมแก้ว, ปฏิภาณ ปานทอง และเพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจรวมทั้งคอยผลักดัน ซึ่งมีส่วนอย่างมากที่ทำให้ให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ได้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ๆทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ ให้โอกาสที่ดีต่างๆ และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จนผู้วิจัยสามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญรูป..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย..... 3

2.1 วัตถุประสงค์..... 3

2.2 ขอบเขตการวิจัย..... 3

บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร..... 5

3.1 ตะกั่ว..... 5

3.1.1 คุณสมบัติของตะกั่ว..... 5

3.1.2 การใช้ประโยชน์..... 5

3.1.3 ความเป็นพิษ..... 8

3.1.4 เหตุการณ์พิษตะกั่วในประเทศไทย..... 9

3.2 การถลุงแร่ตะกั่ว..... 9

3.2.1 การถลุง..... 11

3.2.2 การทำให้บริสุทธิ์..... 12

3.3 ของเสียอันตราย..... 15

3.4 การบำบัดของเสียอันตราย..... 16

3.5 การบำบัดของเสียอันตรายโดยวิธีการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน..... 17

3.5.1 คำจำกัดความ..... 17

3.5.2 เทคนิคการทำให้เป็นก้อน..... 17

3.5.3 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์..... 19

3.5.4 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาว..... 20

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5.5 วัสดุประสาน..... 21
3.5.6 สารเติมแต่ง..... 25
3.5.7 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง..... 25
3.5.8 กลไกการจับยึดโลหะหนัก..... 27
3.5.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อน..... 29
3.5.10 การทดสอบคุณสมบัติและเกณฑ์มาตรฐาน..... 39
3.6 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา..... 45
บทที่ 4 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย..... 62
4.1 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 62
4.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... 62
4.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 63
4.2 แผนการดำเนินงานวิจัย..... 64
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล..... 73
5.1 ลักษณะสมบัติของกากตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่เซรัสไซต์..... 73
5.1.1 สมบัติทางกายภาพ..... 73
5.1.2 องค์ประกอบทางเคมี..... 75
5.1.3 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด..... 77
5.2 การทำเสถียรกากตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่เซรัสไซต์โดยใช้ปูนขาว..... 78
5.2.1 สมบัติทางกายภาพ..... 78
5.2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด..... 80
5.2.3 สรุปผลการศึกษา..... 84
5.3 ผลการศึกษาชนิดของวัสดุประสานที่เหมาะสมต่อการทำให้เป็นก้อนของกาก
ตะกรัน..... 86
5.3.1 สมบัติทางกายภาพ..... 86
5.3.2 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด..... 88
5.3.3 สรุปผลการศึกษา..... 92

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4 ผลการศึกษาขนาดอนุภาคของกากตะกรันที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อน..... 93
5.4.1 สมบัติทางกายภาพ..... 95
5.4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด..... 100
5.4.3 สรุปผลการศึกษา..... 102
5.5 ผลการศึกษาปริมาณวัสดุประสานที่เหมาะสมต่อการทำให้เป็นก้อนของกากตะกรัน..... 103
5.5.1 สมบัติทางกายภาพ..... 103
5.5.2 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด..... 104
5.5.3 สรุปผลการศึกษา..... 107
5.6 ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมต่อการทำให้เป็นก้อนของกากตะกรัน..... 107
5.6.1 สมบัติทางกายภาพ..... 107
5.6.2 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด..... 110
5.6.3 สรุปผลการศึกษา..... 110
5.7 ผลการศึกษาระยะเวลาบ่มที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนของกากตะกรัน..... 111
5.7.1 สมบัติทางกายภาพ..... 111
5.7.2 ลักษณะสมบัติของน้ำสกัด..... 112
5.7.3 สรุปผลการศึกษา..... 114
5.8 ประสิทธิภาพในการทำให้โลหะหนักคงตัว..... 114
5.9 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดตามวิธีทดสอบของประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรมฉบับที่ 1 พ.ศ.2531 และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540..... 115
5.10 การประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่เซรัสไซต์ 117
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา..... 119
6.1 สรุปผลการศึกษา..... 119
6.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยเพิ่มเติม..... 121

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง..... 122

ภาคผนวก..... 126

ภาคผนวก ก ลักษณะก้อนตัวอย่างจากการทดลอง..... 127

ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง..... 134

ภาคผนวก ค รายการคำนวณประสิทธิภาพในการทำให้โลหะหนักคงตัว..... 169

ภาคผนวก ง เครื่องเขย่าแบบหมุนตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540..... 174

ภาคผนวก จ วิธีการทดลอง..... 176

ประวัติผู้เขียน..... 181

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของโลหะตะกั่ว..... 6

ตารางที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบโดยประมาณของผงแร่เซรัสไซต์..... 10

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณของวัตถุดิบในการถลุงตะกั่ว..... 11

ตารางที่ 3.4 แสดงความเข้ากันได้ของกากของเสียอนินทรีย์ชนิดต่างๆ กับกระบวนการทำให้เป็นก้อน..... 18

ตารางที่ 3.5 แสดงประเภท ส่วนประกอบ และคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 24

ตารางที่ 3.6 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน..... 33

ตารางที่ 3.7 แสดงข้อดีและข้อเสียของการสกัดแบบแบชต์และแบบคอลัมน์..... 40

ตารางที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการสกัดของประเทศต่างๆ..... 41

ตารางที่ 3.9 แสดงเกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักและวัตถุมีพิษในน้ำสกัด..... 44

ตารางที่ 4.1 แสดงการทดลองการทำเสถียรกากตะกรันด้วยปูนขาว..... 67

ตารางที่ 4.2 แสดงการทดลองเพื่อหาวัสดุประสานชนิดที่เหมาะสม..... 69

ตารางที่ 5.1 แสดงลักษณะสมบัติทางกายภาพของกากตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่เซรัสไซต์..... 74

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่เซรัสไซต์..... 75

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่เซรัสไซต์..... 76

ตารางที่ 5.4 แสดงลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากกากตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่เซรัสไซต์..... 77

ตารางที่ 5.5 แสดงผลของปริมาณปูนขาวที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 81

ตารางที่ 5.6 แสดงผลของชนิดของวัสดุประสานที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 89

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของกากตะกรันที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง..... 95

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.8 แสดงผลของขนาดอนุภาคของกากตะกรันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง..... 97
ตารางที่ 5.9 แสดงผลของขนาดอนุภาคของกากตะกรันที่มีต่อลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 97
ตารางที่ 5.10 แสดงผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 105
ตารางที่ 5.11 แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง.. 108
ตารางที่ 5.12 แสดงผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 114
ตารางที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดโดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109-86 และ ASTM D 1633-84..... 116

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการถลุงตะกั่ว..... 13
รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำตะกั่วให้บริสุทธิ์..... 14
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของโพรงในซีเมนต์..... 26
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของน้ำสกัดกับความเป็นด่างสะสมของซีเมนต์ที่ถูกชะออกมา..... 28
รูปที่ 3.5 แสดงค่าความเป็นด่าง ความเข้มข้นของโลหะหนัก และความเข้มข้นของซิลิกอนเมื่อผ่านการชะละลายแบบ multiple batch..... 28
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ก่อนผ่านการชะละลาย..... 30
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์หลังผ่านการชะละลาย..... 30
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยตะกั่วก่อนผ่านการชะละลาย..... 31
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยตะกั่วหลังผ่านการชะละลาย..... 31
รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยสังกะสีก่อนผ่านการชะละลาย..... 32
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยสังกะสีหลังผ่านการชะละลาย..... 32
รูปที่ 3.12 แสดงผลของปริมาณของเสียที่มีต่อความเข้มข้นของของเสียในน้ำสกัด..... 35
รูปที่ 3.13 แสดงผลของปริมาณของเสียที่มีต่อกำลังรับแรงอัด..... 35
รูปที่ 3.14 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย..... 36
รูปที่ 3.15 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด..... 36
รูปที่ 3.16 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่มีต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย..... 37
รูปที่ 3.17 แสดงค่าพีเอชของสารสกัดที่มีต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย..... 37

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.18 แสดงผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย..... 38
รูปที่ 3.19 แสดงผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัด..... 38
รูปที่ 3.20 แสดงวิธีการสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540..... 43
รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการศึกษาลักษณะสมบัติของกากตะกรัน..... 65
รูปที่ 4.2 แสดงการศึกษาการทำเสถียรกากตะกรันโดยใช้ปูนขาว..... 65
รูปที่ 4.3 แสดงการศึกษาการทำให้เป็นก้อนของกากตะกรัน..... 66
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการกระจายขนาดคละของกากตะกรันที่ใช้ในการทดลอง..... 74
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลของปริมาณปูนขาวที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 82
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลของชนิดของวัสดุประสานที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 90
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงลักษณะสมบัติของกากตะกรันที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ..... 94
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคของกากตะกรันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 98
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 106
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 109
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างและลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่าง..... 113