การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดี
ให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์

นาย นฤมิต คินิมาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-759-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16755534

# SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE FROM COD WASTE WATER TREATMENT BY USING CEMENT AND LIGNITE FLY ASH

MR. NARUMIT KINIMAN

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 974-631-759-8

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดี ให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ |
| โดย | นาย นฤมิต คินิมาน |
| ภาควิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ |

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

..... กรรมการและเลขานุการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประแสง มงคลศิริ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

นฤมิต คินิมาน : การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ (SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE FROM COD WASTEWATER TREATMENT BY USING CEMENT AND LIGNITE FLY ASH)
อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ,135หน้า. ISBN 974-631-759-8

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ ศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องและทดสอบคุณ-สมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความให้ซึมได้ ทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก ได้แก่ ปรอท โครเมี่ยม และ เหล็ก รวมทั้งหาประสิทธิ-ภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะหนักและประมาณค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน

จากผลการทดลองพบว่า การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 50 เป็นวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.25 อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักนั้น พบว่า ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดมีค่าสูงจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสารพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ในขณะที่โครเมี่ยมมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว และเหล็กมีค่าต่ำมาก ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะหนักได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ล้วน กล่าวคือ มีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของ ปรอท โครเมี่ยม และ เหล็ก 30.7,50,และ 90 % ตามลำดับ และค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนมีค่า 3600 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนักแห้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C617497 : MAJOR SANITARY ENGINEERING
KEY WORD: SOLIDIFICATION / HEAVY METAL SLUDGE / CEMENT / FLY ASH
NARUMIT KINIMAN : SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE FROM COD WASTEWATER TREATMENT BY USING CEMENT AND LIGNITE FLY ASH. THESIS ADVISER : ASSIST.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D. 135 pp.
ISBN 974-631-759-8

This research investigated the stabilization of heavy metal sludge from COD wastewater treatment by using cement and lignite fly ash solidification process.The experiments was done to determine not only the factors affecting solidification process,but also the physical properties of the solidified samples,included,compressive strength,density and permeability.In addition,the extraction tests on mercury chromium and iron were also investigated.The efficiency on leachability reduction and cost estimation for the proper binder were also considered.

Solidification using cement mixed with lignite fly ash of 0% and 50% at waste/binder ratio 0.25 water/binder ratio 0.5 and curing time of 28 days results the physical properties of the samples of being acceptable by the solidified waste standard promulgated by the Ministry of Industry. For the extraction tests,the concentrations of mercury in the extracted solution are exceeded the toxic substance standard while the concentrationsof chromium are lower than the standard and the concentrations of iron are insignificantly lower.Cement mixed with 50% fly ash is the proper binder which has more efficiency on leachability reduction than the cement alone. The efficiency on leachability reduction of mercury,chromium and iron are 30.7%,50% and 90% respectively.Cost estimation of the binder mention before is 3600 baht per ton of dry heavy metal sludge.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ที่กรุณาแนะนำ ให้คำปรึกษาในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความเมตตาอนุเคราะห์ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ทางด้านวิชาการต่าง ๆ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เก็บรวบรวมน้ำเสียให้และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการทำวิจัย และแผนกปฐพีวิทยา กองธรณีปฐพีวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบค่าความให้ซึมได้

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้โอกาสผู้วิจัยให้ลาเพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโท และให้ทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย เป็นระยะเวลา 24 เดือน

ขอขอบคุณ คุณ อัมพวัน พงศ์สิทธิศักดิ์ และเพื่อน ๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์และให้ความช่วยเหลือ แนะนำในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ครู อาจารย์ ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฐ
สารบัญภาพ ..... ณ
บทที่ 1 บทนำ ..... 1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย ..... 2
บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร ..... 3
โลหะหนัก ..... 3
ปูนซีเมนต์ ..... 8
เถ้าลอยลิกไนต์ ..... 10
การกำจัดของเสียอันตรายและโลหะหนัก ..... 13
การกำจัดของเสียอันตรายโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อน ..... 15
การทดสอบการชะละลายโลหะหนัก ..... 26
เกณฑ์มาตรฐานและคุณสมบัติของของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน ..... 28
การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ..... 33
บทที่ 4 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย ..... 41
การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ..... 41
เครื่องมือและอุปกรณ์ ..... 43
การดำเนินการวิจัย ..... 46


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

1 การทดลองที่ 1 ศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ 46
2. การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก 51
3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของพีเอช (pH) ของน้ำกลั่นที่ใช้ทดสอบการชะละลาย 51
4. การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มตัว (Curing Time) ที่ใช้ในการหล่อซีเมนต์ 51
5. การทดลองที่ 5 หาประสิทธิภาพในการ ลดการถูกชะละลายโลหะหนักและประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น 52

บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล 53

คุณลักษณะของน้ำเสียซีโอดี ตะกอนโลหะหนักและเถ้าลอยลิกไนต์ 53
1. คุณลักษณะของน้ำเสียซีโอดี 53
2. คุณลักษณะของตะกอนโลหะหนัก 53
3. คุณลักษณะของเถ้าลอยลิกไนต์ 55

การศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ 55
1. คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน 57
2. การทดสอบการชะละลายตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน 57
3. การพิจารณาเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม 66

การศึกษาผลของอัตราส่วนผสมน้ำต่อการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก 68
1. คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน 68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

2. การทดสอบการชะละลายของตะกอนโลหะหนัก
ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน 71
การศึกษาผลของพีเอชของน้ำกลั่นที่ใช้ในการ
ทดสอบการชะละลาย 77
การศึกษาผลของระยะเวลาบ่มตัวต่อการทำให้เป็นก้อน
และการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก 81
1. คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนัก
ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน 81
2. การทดสอบการชะละลายของตะกอนโลหะหนัก
ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน 86
3. การทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่บ่มตัวในระยะยาว 93
การหาประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนัก 97
การประมาณค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน 99
การศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วย
ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเลคตรอน 101
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง 105
บทที่ 7 ข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม 107
รายการอ้างอิง 108
ภาคผนวก ก. การเตรียมตะกอนโลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดี 111
ภาคผนวก ข. ส่วนผสมโดยน้ำหนักขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน 114
ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการทดลอง 116
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความสามารถถูกชะละลายและประสิทธิภาพ
ในการลดการถูกชะละลายโลหะหนัก 126
ภาคผนวก จ. ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเลคตรอนของวัสดุประสานและตะกอนโลหะหนัก 130
ประวัติผู้เขียน 135

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่


3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปรอทและสารประกอบของปรอท ..... 4

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโครเมี่ยมและสารประกอบของโครเมี่ยม ..... 6

3.3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเหล็กและสารประกอบของเหล็ก ..... 7

3.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ (X-Ray Fluorescence Technique ) โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ..... 11

3.5 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ..... 12

3.5.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยลิกไนต์ ..... 14

3.5.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำที่ใช้ทดลองแช่ตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์ ..... 14

3.6 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน ..... 18

3.7 เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดีข้อเสียของการกำจัดของเสีย โดยวิธีการทำให้เป็นก้อน ..... 19

3.8 เปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย ..... 27

3.9 คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดย กระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยวิธี Sealosafe ..... 28

3.10 มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดสำหรับ ของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัด ..... 30

3.11 วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิกูลประเภทต่างๆ ..... 32

5.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียซีโอดีที่ตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ ผ่านมา ..... 54

5.2 ลักษณะสมบัติของตะกอนโลหะหนักที่ตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา ..... 54

5.3 คุณสมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย ..... 56

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่


5.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ..... 59

5.5 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ..... 59

5.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย (% เถ้าลอย = 0 ) ..... 61

5.7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย (% เถ้าลอย = 25 ) ..... 61

5.8 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย (% เถ้าลอย = 50 ) ..... 62

5.9 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย (% เถ้าลอย = 75 ) ..... 62

5.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมน้ำต่างๆ ..... 69

5.11 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมน้ำต่างๆ ..... 69

5.12 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย ( %เถ้าลอย = 0 ) ..... 72

5.13 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย ( %เถ้าลอย = 50 ) ..... 72

5.14 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของของน้ำสกัดที่พีเอชของน้ำชะละลายต่างๆ ( %เถ้าลอย = 0 ) ..... 78

5.15 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของของน้ำสกัดที่พีเอชของน้ำชะละลายต่างๆ ( %เถ้าลอย = 50 ) ..... 78

5.16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ ..... 84

5.17 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ ..... 84

5.18 ผลการทดสอบค่าความให้ซึมได้ (Permeability) ของตะกอนโลหะหนัก ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ ..... 87

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

5.19 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของของน้ำสกัดของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ ( %เถ้าลอย = 0 ) ..... 88
5.20 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของของน้ำสกัดของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ ( %เถ้าลอย = 50 ) ..... 88
5.21 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของของน้ำสกัดของตัวอย่างที่บ่มตัวในระยะยาว ( %เถ้าลอย = 0 ) ..... 94
5.22 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของของน้ำสกัดของตัวอย่างที่บ่มตัวในระยะยาว ( %เถ้าลอย = 50 ) ..... 94
5.23 ความสามารถถูกชะละลายและประสิทธิภาพการลดการถูกชะละลายของปรอท ในตะกอนโลหะหนักที่ระยะเวลาบ่มตัวต่างๆ ..... 98
5.24 ความสามารถถูกชะละลายและประสิทธิภาพการลดการถูกชะละลายของโครเมี่ยม ในตะกอนโลหะหนักที่ระยะเวลาบ่มตัวต่างๆ ..... 98
5.25 ความสามารถถูกชะละลายและประสิทธิภาพการลดการถูกชะละลายของหล็ก ในตะกอนโลหะหนักที่ระยะเวลาบ่มตัวต่างๆ ..... 99
5.26 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายสำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน กับการศึกษาที่ผ่านมา ..... 100

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่


3.1 แผนภูมิกระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตราย ..... 15

3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย ..... 23

3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่างและซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย ..... 23

3.4 กราฟ pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมี่ยม โครเมี่ยม และ ตะกั่ว ..... 25

3.5 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียด้วยการทำให้เป็นก้อน ..... 35

4.1 แผนผังแสดงตัวแปรที่ศึกษาและขั้นตอนการดำเนินการทดลอง ..... 47

4.2 แสดงอัตราส่วนของวัสดุซีเมนต์และขั้นตอนการหล่อซีเมนต์ ..... 48

4.3 แผนผังแสดงการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก ..... 50

5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 60

5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 60

5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 64

5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 64

5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นด่างของน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 65

5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 65

5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมี่ยมในน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 67

5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 67

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่


5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมน้ำ ..... 70

5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนผสมน้ำ ..... 70

5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมน้ำ ..... 73

5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนผสมน้ำ ..... 73

5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นด่างของน้ำสกัดกับอัตราส่วนผสมน้ำ ..... 75

5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมน้ำ ..... 75

5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมี่ยมในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมน้ำ ..... 76

5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดกับ
อัตราส่วนผสมน้ำ ..... 76

5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสกัดกับค่าพีเอชของน้ำชะละลาย ..... 79

5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัดกับ
ค่าพีเอชของน้ำชะละลาย ..... 79

5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นด่างของน้ำสกัดกับ
ค่าพีเอชของน้ำชะละลาย ..... 80

5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดกับ
ค่าพีเอชของน้ำชะละลาย ..... 80

5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมี่ยมในน้ำสกัดกับ
ค่าพีเอชของน้ำชะละลาย ..... 82

5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดกับ
ค่าพีเอชของน้ำชะละลาย ..... 82

5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มตัว ..... 85

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่


5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับระยะเวลาบ่มตัว ..... 85

5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความให้ซึมได้กับระยะเวลาบ่มตัว ..... 87

5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสกัดกับระยะเวลาบ่มตัว ..... 89

5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับระยะเวลาบ่มตัว ..... 89

5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นด่างของระยะเวลาบ่มตัว ..... 91

5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดกับ
ระยะเวลาบ่มตัว ..... 91

5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมี่ยมในน้ำสกัดกับ
ระยะเวลาบ่มตัว ..... 92

5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดกับ
ระยะเวลาบ่มตัว ..... 92

5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดกับ
ระยะเวลาบ่มตัว ..... 95

5.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมี่ยมในน้ำสกัดกับ
ระยะเวลาบ่มตัว ..... 95

5.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดกับ
ระยะเวลาบ่มตัว ..... 96


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่


4.1 วัสดุประสานและตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง ..... 42

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตะกอนโลหะหนัก ..... 44

4.3 แบบหล่อซีเมนต์ขนาด 5x5x5 ซม$^3$ ..... 44

4.4 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัด ( ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ) ..... 45

4.5 เครื่องมือทดสอบความให้ซึมได้ ( แผนกปฐพีวิทยา กองธรณีปฐพีวิทยา
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ) ..... 45

5.1 ตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ..... 58

5.2 ตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์
ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ..... 58

5.3 ตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ..... 83

5.4 น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ..... 83

5.5 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน
โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ( ขนาดกำลังขยาย 200 เท่า ) ..... 102

5.6 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน
โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน( ขนาดกำลังขยาย 200 เท่า ) ..... 102

5.7 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน
โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ( ขนาดกำลังขยาย 2000 เท่า ) ..... 104

5.8 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน
โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน( ขนาดกำลังขยาย 2000 เท่า ) ..... 104