

การนำอิทธิกา-อะตุนาที่ใช้แล้ว และปรอหซัด ไฟด์มาทำให้  
เป็นก้อนด้วยปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์



นายประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-949-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**SOLIDIFICATION OF SPENT SILICA-ALUMINA AND  
MERCURY SULFIDE WASTES BY PORTLAND CEMENT**

**Mr.Prasert Ngarnertprasert**

สถาบันวิทยบริการ

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

**Department of Environment Engineering**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1998**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การนำวิธีการอะลูมินาที่ใช้แล้ว และปรอทซัดไฟด์มาทำให้เป็นก้อนด้วย  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

โดย

นายประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ

ภาควิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโท

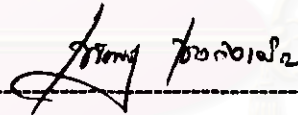


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย พรหมสวัสดิ์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)



.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)



.....กรรมการ  
(อาจารย์ บุญอง โถ้ววงศ์วัฒน์)

ประเสริฐ งานเลิศประเสริฐ : การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว และปรอทซัลไฟด์มาทำให้เป็น  
ก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (SOLIDIFICATION OF SPENT SILICA-ALUMINA AND  
MERCURY SULFIDE WASTES BY PORTLAND CEMENT) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. เพ็ชรพร  
เชาวภิขเจริญ, 297 หน้า. ISBN 974-639-949-7.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ และกากหลอมค-  
ฟลูออเรสเซนต์โดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปก่อนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และซิลิกา-อะลูมินาที่  
ใช้แล้ว ในการทดลองนี้แสดงถึงการผลกระทบบางๆ ที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อน และแสดงสมบัติทางกายภาพ  
ของตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนเช่น กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความชื้นได้ของน้ำ นอกจากนี้มีการ  
ทดสอบการระคายเคืองต่อหาคความเข้มข้นของปรอท โครเมียม และเหล็ก ในการวิจัยนี้มีการทดลองศึกษา  
การทดลองคือ ในการทดลองที่หนึ่งเป็นการหาอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานซึ่งแปรค่า  
ตั้งแต่ 0.25 0.50 และ 0.75 ในการทดลองที่สองเป็นการหาอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสานซึ่งแปรค่า  
ตั้งแต่ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 ในการทดลองที่สามเป็นการแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มของ  
ตัวอย่างที่ 1 3 7 14 และ 28 วัน ในการทดลองที่สี่เป็นการหาประสิทธิภาพในการทำให้โลหะหนักคงตัว และ  
เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อน.

ผลการทดลองการทำตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกา-  
อะลูมินาที่ใช้แล้ว พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50  
อัตราส่วนผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ (ปูนซีเมนต์ : ซิลิกา = 1: 0.6)  
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ใช้ระยะ  
เวลาบ่ม 7 วัน ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอท และโครเมียมคงตัวเท่ากับ 88.39 และ 82.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ  
ประสิทธิภาพในการลดการระคายเคืองของสารแอนทราควินโนนเท่ากับ 61.97 เปอร์เซ็นต์ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้  
ประมาณ 5,110 บาทต่อตันของตะกอนแห้ง.

ผลการทดลองการทำกากหลอมคฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้  
แล้ว พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 อัตราส่วน  
ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (ปูนซีเมนต์ : ซิลิกา = 1:1) อัตราส่วนน้ำ  
ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ใช้ระยะเวลาบ่ม 3 วัน  
ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัวเท่ากับ 82.17 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพในการลดการระคายเคืองของสาร  
แอนทราควินโนนเท่ากับ 60.56 เปอร์เซ็นต์ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ ประมาณ 5,620 บาทต่อตันของตะกอนแห้ง.

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....  
ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อผู้ผลิต.....ประเสริฐ งานเลิศประเสริฐ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....เพ็ชรพร เชาวภิขเจริญ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาอีกราย.....

# # 3970991021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD:

STABILIZATION / SOLIDIFICATION / HEAVY METAL SLUDGE / SPENT SILICA-ALUMINA / MERCURY SULFIDE WASTE

PRASERT NGAMLERTPRASERT: SOLIDIFICATION OF SPENT SILICA-ALUMINA AND MERCURY SULFIDE WASTES BY PORTLAND CEMENT. THESIS ADVISOR:

ASSOC.PROF. FETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D. 297 pp. ISBN 974-639-949-7

This research investigated the stabilization of heavy metal sludge from COD wastewater treatment and broken fluorescent lamp residue by adding sodium sulfide before solidification with portland cement and spent silica-alumina. The experiments were performed to determine not only the factors affecting the solidification process but also the physical properties of the solidified specimens, such as the compressive strength, density and permeability. In addition, the extraction tests on mercury, chromium and iron were carried out. There were four experiments in this research. The first experiment was performed by using the heavy metal sludge waste/cementitious binders ratios of 0.25 0.50 and 0.7. The second experiment indicated the effect of water/cementitious binders ratio of 0.3 0.4 0.5 0.6 and 0.7. The third experiment indicated the effect of varying curing time of the solidified specimens at 1 3 7 14 and 28 days. The fourth experiment considers the stabilization efficiencies of heavy metal and considers cost estimation of the proper binder for solidification by portland cement.

The results for solidification of heavy metal sludge from COD wastewater treatment using cement mixed with spent silica-alumina indicated that the optimum condition were waste/binder ratio of 0.50, 60% spent silica-alumina/cement ratio (cement : silica = 1:0.6), water/binder ratio of 0.50, sodium sulfide 1.75 time the stoichiometric amount and curing time of 7 days. The stabilization efficiencies of mercury and chromium were 88.39 and 82.77 % respectively. The extractive reduction efficiency of anthraquinone was 61.97 %. The estimation of treatment cost were about 5,110 baht per ton of dry heavy metal sludge.

The result for solidification of broken fluorescent lamp residue using cement mixed with spent silica-alumina indicated that the optimum condition were waste/binder ratio of 0.75, 100% spent silica-alumina/cement ratio (cement : silica = 1:1), water/binder ratio of 0.50, sodium sulfide 1.75 time the stoichiometric amount and curing time of 3 days. The stabilization efficiencies of mercury was 82.17 %. The extractive reduction efficiency of anthraquinone was 60.56 %. The estimation of treatment cost were about 5,620 baht per ton of dry heavy metal sludge.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิสิต ปรศพร นงมลเลิศ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา พรศพร นงมลเลิศ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เพชรพร เขาวงกตเจริญ ที่กรุณาแนะนำให้คำปรึกษาในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรม-  
เครื่องกลที่ให้ความเมตตาอนุเคราะห์ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการต่างๆ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัย-  
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง-  
ประเทศไทย ฝ่ายสำรวจของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิชิน ไสยกษานิชที่ให้ทุน  
อุดหนุนในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณบิดามารดา ครู อาจารย์ที่ได้อบรมสั่งสอนให้การสนับสนุนและ  
ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฐ
สารบัญรูป .....	ด
บทที่ 1 บทนำ .....	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์ และขอบเขตการวิจัย .....	2
บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร	
3.1 โลหะหนัก .....	3
3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	3
3.3 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	5
3.4 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้น .....	7
3.5 ของเสียอันตราย .....	8
3.6 การกำจัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อน .....	9
3.7 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ .....	10
3.8 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์ .....	14
3.9 ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน .....	22
3.10 ความสามารถในการถูกชะละลาย .....	26
3.11 การคกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ .....	26
3.12 การทดสอบการชะละลาย .....	27
3.13 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน .....	27
3.14 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย .....	34
บทที่ 4 แผนการทดลอง และการดำเนินการวิจัย	
4.1 แผนการทดลอง .....	40
4.2 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย .....	40

## สารบัญ

หน้า

4.3	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	40
4.4	ของเสียที่มีปรอทปนเปื้อน .....	41
4.5	เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	45
4.6	การดำเนินการวิจัย	
	การทดลองที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์ .....	49
	การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการระงับฤทธิ์ตะกอนปรอทซัลไฟด์ .....	52
	การทดลองที่ 3/1 ศึกษาผลของระยะเวลาปมที่ใช้ในการหล่อก้อนซีเมนต์ .....	53
	การทดลองที่ 3/2 ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์เพิ่มเติม .....	54
	การทดลองที่ 3/3 เปรียบเทียบวิธีการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (2540) กับประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (2531) .....	56
	การทดลองที่ 3/4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการดูดชะละลายของสารแอนทราควินโนน .....	57
	การทดลองที่ 4/1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการดูดชะละลายของปรอท .....	58
	การทดลองที่ 4/2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการดูดชะละลายของปรอทเพิ่มเติม .....	59
	เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำตะกอนปรอทซัลไฟด์ให้เป็นก้อน .....	60
บทที่ 5	ผลการทดลอง และวิจารณ์ผล	
5.1	ลักษณะสมบัติของตะกอนโลหะหนัก .....	63
	ก. ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ .....	63
	1. ลักษณะสมบัติของน้ำเสียซีโอไลต์ .....	63
	2. องค์ประกอบของตะกอนโลหะหนัก .....	63
	3. ทดสอบการชะละลายตะกอนโลหะหนัก .....	64
	ข. ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ .....	65
	1. องค์ประกอบของตะกอนโลหะหนัก.....	65
	2. ทดสอบการชะละลายตะกอนโลหะหนัก .....	66
	ค. ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	66
	1. องค์ประกอบของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	66
	2. ทดสอบการชะละลายซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	67



## สารบัญ

หน้า

การทดลองที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์ .....	68
ก. ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอติ .....	69
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	70
2. ทดสอบการระเหยของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	74
ข. ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนต์ .....	83
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	83
2. ทดสอบการระเหยของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	89
3. การพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในขั้นต้น .....	95
3.1 การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอติให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	96
3.2 การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนต์ ให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	96
 การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์	
ก. ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอติ .....	97
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	97
2. ทดสอบการระเหยของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	99
ข. ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนต์ .....	106
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	106
2. ทดสอบการระเหยของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	108
3. การพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในขั้นต้น .....	114
3.1 การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอติให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	115
3.2 การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนต์ ให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	115

สารบัญ

หน้า

การทดลองที่ 3/1 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มที่ใช้ในการหล่อก้อนซีเมนต์ .....	116
ก. ตะกอน โลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี .....	116
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	116
2. ทดสอบการระเหยของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	118
ข. ตะกอน โลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ .....	125
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	125
2. ทดสอบการระเหยของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	127
3. การพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในชั้นดิน .....	133
3.1 การทำตะกอน โลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิติกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	134
3.2 การทำตะกอน โลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิติกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	134
การทดลองที่ 3/2 ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์เพิ่มเติม	
ก. ตะกอน โลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี .....	135
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	135
2. ทดสอบการระเหยของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	137
3. ความชื้นได้ของน้ำ .....	143
ข. ตะกอน โลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ .....	144
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	144
2. ทดสอบการระเหยของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	147
3. ความชื้นได้ของน้ำ .....	151
4. เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำระเหยของตัวอย่างซีเมนต์ ที่อัตราส่วนซิติกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่างๆ .....	152
5. การพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม .....	156
5.1 การทำตะกอน โลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิติกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	156

## สารบัญ

หน้า

5.2 การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิติกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	156
การทดลองที่ 3/3 เปรียบเทียบวิธีการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (2540) กับ ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (2531) .....	157
ก. ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี .....	157
ข. ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ .....	161
การทดลองที่ 3/4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของสารแอนทราควิน โนน	164
ก. ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี .....	164
ข. ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ .....	165
การทดลองที่ 4/1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท .....	166
ก. ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี .....	167
1.ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัว .....	167
2.ประสิทธิภาพในการทำให้โครเมียมคงตัว .....	168
ข. ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ .....	168
1.ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัว .....	168
การทดลองที่ 4/2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอทเพิ่มเติม	
ก. ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี .....	169
1.ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัว .....	169
2.ประสิทธิภาพในการทำให้โครเมียมคงตัว .....	170
ข. ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ .....	170
1.ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัว .....	170

## สารบัญ

	หน้า
เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการตะกอนปรอทซัลไฟด์ให้เป็นก้อน .....	171
ก. ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี .....	171
ข. ตะกอนโลหะหนักจากการระดมกากหลอมฟลูออเรสเซนต์ .....	172
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง .....	175
บทที่ 7 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม .....	177
รายการอ้างอิง .....	178
บรรณานุกรม .....	181
ภาคผนวก ก. การเตรียมตะกอนโลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดี และผลการวิเคราะห์ โลหะหนักในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีและกากหลอมฟลูออเรสเซนต์ .....	182
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาปริมาณไซเดียมซัลไฟด์ .....	187
ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการทดลองการทำตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี และกากหลอม ฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	190
ภาคผนวก ง. รายละเอียดการคำนวณประสิทธิภาพในการลดการระดมของสารแอนทราควิโนน	231
ภาคผนวก จ. รายละเอียดการคำนวณประสิทธิภาพในการทำให้โลหะหนักคงตัว .....	238
ภาคผนวก ฉ. รายละเอียดการคำนวณทางสถิติ .....	267
ประวัติผู้เขียน .....	297

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	3
3.2	แสดงสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	4
3.3	แสดงส่วนประกอบซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	6
3.4	แสดงกระบวนการกำจัดของเสียอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน .....	11
3.5	แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี .....	12
3.6	แสดงค่าขีดจำกัดของสารมีพิช .....	28
3.7	แสดงค่าความเข้มข้นของสารมีพิช .....	28
3.8	วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิภูลประเภทต่าง ๆ .....	30
3.9	เปรียบเทียบวิธีการสกัดสารและคุณสมบัติของของเสียที่ทำลายฤทธิ์แล้วตาม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2531 และ พ.ศ. 2540 .....	33
5.1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียซีโอไลท์ที่ตรวจวัด เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา .....	64
5.2	ลักษณะสมบัติของตะกอนโลหะหนักที่ตรวจวัดเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา .....	64
5.3	ลักษณะสมบัติของตะกอนโลหะหนักที่ตรวจวัดเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา .....	65
5.4	แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าการปนเปื้อนโลหะหนักของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	66
5.5	คุณสมบัติของน้ำระเหยจากตะกอนโลหะหนักและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว .....	67
5.6	แสดงความเข้มข้นของซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) ที่มีผลต่อคอนกรีต .....	69
5.7	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	72
5.8	แสดงผลการทดสอบค่าความหนาแน่นกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	74
5.9	แสดงผลการวิเคราะห์พีเอชกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	75
5.10	แสดงผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	76
5.11	แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นด่างกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	78
5.12	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	79
5.13	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	81
5.14	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	82

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
5.15	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	86
5.16	แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	88
5.17	แสดงผลการวิเคราะห์พีเอชกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	89
5.18	แสดงผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	91
5.19	แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นด่างกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	92
5.20	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	93
5.21	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .....	95
5.22	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำ .....	97
5.23	แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นกับอัตราส่วนน้ำ .....	98
5.24	แสดงผลการวิเคราะห์พีเอชกับอัตราส่วนน้ำ .....	99
5.25	แสดงผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนน้ำ .....	100
5.26	แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นด่างกับอัตราส่วนน้ำ .....	101
5.27	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับอัตราส่วนน้ำ .....	103
5.28	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมกับอัตราส่วนน้ำ .....	104
5.29	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนน้ำ .....	105
5.30	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำ .....	106
5.31	แสดงผลการทดสอบค่าความหนาแน่นกับอัตราส่วนน้ำ .....	108
5.32	แสดงผลการวิเคราะห์พีเอชกับอัตราส่วนน้ำ .....	109
5.33	แสดงผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนน้ำ .....	110
5.34	แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นด่างกับอัตราส่วนน้ำ .....	111
5.35	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับอัตราส่วนน้ำ .....	112
5.36	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนน้ำ .....	114
5.37	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่ม .....	116

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.38	แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นกับระยะเวลาบ่ม ..... 117
5.39	แสดงผลการวิเคราะห์พีเอชกับระยะเวลาบ่ม ..... 119
5.40	แสดงผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้ากับระยะเวลาบ่ม ..... 120
5.41	แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นด่างกับระยะเวลาบ่ม ..... 121
5.42	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับระยะเวลาบ่ม ..... 122
5.43	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมกับระยะเวลาบ่ม ..... 123
5.44	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กกับระยะเวลาบ่ม ..... 125
5.45	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่ม ..... 126
5.46	แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นกับระยะเวลาบ่ม ..... 127
5.47	แสดงผลการวิเคราะห์พีเอชกับระยะเวลาบ่ม ..... 128
5.48	แสดงผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้ากับระยะเวลาบ่ม ..... 129
5.49	แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นด่างกับระยะเวลาบ่ม ..... 130
5.50	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับระยะเวลาบ่ม ..... 131
5.51	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กกับระยะเวลาบ่ม ..... 133
5.52	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 135
5.53	แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 136
5.54	แสดงผลการวิเคราะห์พีเอชกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 137
5.55	แสดงผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 138
5.56	แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นด่างกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 139
5.57	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 140
5.58	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 141
5.59	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 142
5.60	แสดงผลการทดสอบความซึมได้ของน้ำกับระยะเวลาบ่ม ..... 144
5.61	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 145
5.62	แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 146

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.63	แสดงผลการวิเคราะห์ที่เอชกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 147
5.64	แสดงผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 148
5.65	แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นด่างกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 149
5.66	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 150
5.67	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 151
5.68	แสดงผลการทดสอบความชื้น ใต้ของน้ำกับระยะเวลาบ่ม ..... 152
5.69	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณปรอท ..... 157
5.70	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โครเมียม ..... 158
5.71	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเหล็ก ..... 158
5.72	แสดงการเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำระเหยตามระยะเวลาที่เปลี่ยนไป ..... 159
5.73	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณปรอท ..... 161
5.74	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเหล็ก ..... 161
5.75	แสดงการเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำระเหยตามระยะเวลาที่เปลี่ยนไป ..... 162
5.76	แสดงปริมาณที่ถูกระเหยของสารแอนทราควิน โนนในตัวอย่างชนิดต่างๆ ..... 165
5.77	แสดงความสามารถถูกระเหย และประสิทธิภาพในการลดการถูกระเหยของ สารแอนทราควิน โนน ..... 165
5.78	แสดงปริมาณที่ถูกระเหยของสารแอนทราควิน โนนในตัวอย่างชนิดต่างๆ ..... 166
5.79	แสดงความสามารถถูกระเหย และประสิทธิภาพในการลดการถูกระเหยของ สารแอนทราควิน โนน ..... 166
5.80	แสดงความสามารถถูกระเหย และประสิทธิภาพในการลดการถูกระเหยของ ปรอทในตะกอน โดหะหนักกับระยะเวลาบ่ม ..... 167
5.81	แสดงความสามารถถูกระเหย และประสิทธิภาพในการลดการถูกระเหยของ โครเมียมในตะกอน โดหะหนักกับระยะเวลาบ่ม ..... 168
5.82	แสดงความสามารถถูกระเหย และประสิทธิภาพในการลดการถูกระเหยของ ปรอทในตะกอน โดหะหนักกับระยะเวลาบ่ม ..... 169



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.83 แสดงความสามารถถูกชะละลาย และประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของ ปรอทในตะกอนโลหะหนักที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน .....	170
5.84 แสดงความสามารถถูกชะละลาย และประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของ โครเมียมในตะกอนโลหะหนักที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน .....	170
5.85 แสดงความสามารถถูกชะละลาย และประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของ ปรอทในตะกอนโลหะหนักที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน .....	171
5.86 แสดงค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมของตะกอนในการทำตะกอนที่ได้จากการบำบัด น้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อน .....	173
5.87 แสดงค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมของตะกอนในการทำตะกอนที่ได้จากชะล้าง กากหลอคฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน .....	174



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	แสดงขั้นตอนในกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ..... 6
3.2	แสดงสูตรโครงสร้างของสารแอนทราควินโนน ..... 7
3.3	แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างซีเมนต์ธรรมดา ..... 16
3.4	แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างซีเมนต์ผสมซิลิกา ..... 16
3.5	แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิกาที่มีตั้งกะถ้ำผสมอยู่ ..... 17
3.6	แสดงปริมาณตะกอนของรูพรุนในแต่ละตัวอย่าง ..... 17
3.7	แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง ..... 18
3.8	แสดงลักษณะร่องรอยของสารต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD ..... 19
3.9	แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิกาที่มีปรอทผสมอยู่ ..... 19
3.10	แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิกาที่มีปรอทผสมอยู่ ..... 20
3.11	แสดงการพัฒนาการรับแรงอัดเทียบกับอายุของคอนกรีต ..... 20
3.12	แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว ..... 21
3.13	แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก่อนคอนกรีตที่อายุต่างๆกัน ..... 21
3.14	กราฟแสดงปริมาณของเลขนิคต่าง ๆ ในน้ำชะละลาย ..... 23
3.15	กราฟแสดงปริมาณของเลขนิคต่าง ๆ ค่ความสามารถในการถูชะละลาย ..... 23
3.16	กราฟแสดงผลของปริมาณของเสียต่อค่ากำลังรับแรงอัด ..... 24
3.17	กราฟแสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด ..... 25
3.18	กราฟแสดงผลของระยะเวลาการบ่มก่อนซีเมนต์ค่ความสามารถในการถูชะละลาย ..... 25
3.19	กราฟแสดงความสามารถในการละลายของโลหะหนักไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์ ..... 29
4.1	ภาพซ้าย แสดงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ภาพขวา แสดงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 ..... 41
4.2	ภาพซ้าย แสดงซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ภาพขวา แสดงตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียซีไอที ..... 42

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
4.3	แสดงขั้นตอนการเตรียมตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี .....	42
4.4	แสดงแหล่งที่มาของตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ .....	43
4.5	ภาพเครื่องบดตะกอน .....	44
4.6	ภาพซ้าย แสดงตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ (ก่อนบด) ภาพขวา แสดงตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอคฟลูออเรสเซนซ์ (หลังบด) ..	44
4.7	ภาพเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	45
4.8	ภาพเครื่องมือทดสอบค่าความซึมได้ของน้ำ .....	46
4.9	ภาพแบบหล่อซีเมนต์ ขนาด 5*5*5 ซม. <sup>3</sup> .....	46
4.10	ภาพแสดงเครื่องเขย่าแบบหมุน 360 องศา .....	47
4.11	ภาพแสดงเครื่องเขย่าตามแนวขวาง .....	48
4.12	ภาพเครื่อง Polarogram Simulator .....	48
4.13	แสดงขั้นตอนการหล่อซีเมนต์ .....	51
4.14	แสดงการทดสอบการชะละลายของปรอท .....	51
5.1	แสดงก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิด 1 .....	69
5.2	แสดงก้อนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0-40% และตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0 .....	70
5.3	แสดงก้อนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0-40% และตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.25 .....	71
5.4	แสดงก้อนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0-40% และตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.50 .....	71
5.5	แสดงก้อนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0-40% และตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.75 .....	72
5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..	73
5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ...	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 75
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนตะกอนโลหะหนัก ..... 77
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นค่ากับอัตราส่วนตะกอนโลหะหนัก ..... 78
5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 80
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก .... 81
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 83
5.14	แสดงก่อนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0-40% และตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0 ..... 84
5.15	แสดงก่อนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0-40% และตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.25 ..... 85
5.16	แสดงก่อนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0-40% และตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.50 ..... 85
5.17	แสดงก่อนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0-40% และตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.75 ..... 86
5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 87
5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 88
5.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 90
5.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนตะกอนโลหะหนัก ..... 91
5.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นค่ากับอัตราส่วนตะกอนโลหะหนัก ..... 92
5.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 94
5.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนัก ..... 95
5.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำ ..... 98
5.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนน้ำ ..... 99
5.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับอัตราส่วนน้ำ ..... 100

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
5.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนน้ำ ..... 101
5.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นค่ากับอัตราส่วนน้ำ ..... 102
5.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับอัตราส่วนน้ำ ..... 103
5.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โครเมียมกับอัตราส่วนน้ำ ..... 104
5.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนน้ำ ..... 105
5.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำ ..... 107
5.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนน้ำ ..... 108
5.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับอัตราส่วนน้ำ ..... 109
5.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนน้ำ ..... 110
5.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นค่ากับอัตราส่วนน้ำ ..... 111
5.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับอัตราส่วนน้ำ ..... 113
5.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนน้ำ ..... 114
5.40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาปม ..... 117
5.41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับระยะเวลาปม ..... 118
5.42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับระยะเวลาปม ..... 119
5.43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับแฉะระยะเวลาปม ..... 120
5.44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นค่ากับระยะเวลาปม ..... 121
5.45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับระยะเวลาปม ..... 122
5.46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โครเมียมกับระยะเวลาปม ..... 124
5.47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกับระยะเวลาปม ..... 125
5.48	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาปม ..... 126
5.49	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับระยะเวลาปม ..... 127
5.50	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับระยะเวลาปม ..... 128
5.51	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับระยะเวลาปม ..... 129

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
5.52	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นค่ากับระยะเวลาปม ..... 130
5.53	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับระยะเวลาปม ..... 132
5.54	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับระยะเวลาปม ..... 133
5.55	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 136
5.56	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 137
5.57	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 138
5.58	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 139
5.59	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นค่ากับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 140
5.60	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 141
5.61	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ... 142
5.62	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 143
5.63	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นได้ของน้ำกับระยะเวลาปม ..... 144
5.64	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 145
5.65	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 146
5.66	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 147
5.67	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 148
5.68	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นค่ากับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 149
5.69	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 150
5.70	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ..... 151
5.71	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นได้ของน้ำกับระยะเวลาปม ..... 152
5.72	ภาพแสดง น้ำระเหยของตัวอย่างซีเมนต์ผสมตะกอนโลหะหนักจากการบำบัด- น้ำเสียซีไอดี (อัตราส่วนผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 %) ..... 153
5.73	ภาพแสดง น้ำระเหยของตัวอย่างซีเมนต์ผสมตะกอนโลหะหนักจากการบำบัด- น้ำเสียซีไอดี (อัตราส่วนผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 %) ..... 154

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
5.74 ภาพแสดง น้ำระเหยของตัวอย่างซีเมนต์ผสมกากหลอคฟลูออเรสเซนส์ (อัตราส่วนผสมซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 % ) .....	155
5.75 ภาพแสดง น้ำระเหยของตัวอย่างซีเมนต์ผสมกากหลอคฟลูออเรสเซนส์ (อัตราส่วนผสมซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 % ) .....	155
5.76 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำระเหยตามระยะเวลา .....	160
5.77 ภาพซ้าย แสดงน้ำระเหยจากเครื่องเขย่าแบบหมุน 360 องศา ภาพขวา แสดงน้ำระเหยจากเครื่องเขย่าแบบแนวขวาง .....	160
5.78 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำระเหยตามระยะเวลา .....	163
5.79 ภาพซ้าย แสดงน้ำระเหยจากเครื่องเขย่าแบบหมุน 360 องศา ภาพขวา แสดงน้ำระเหยจากเครื่องเขย่าแบบแนวขวาง .....	163