

การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นตัวประสาน



นาย อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

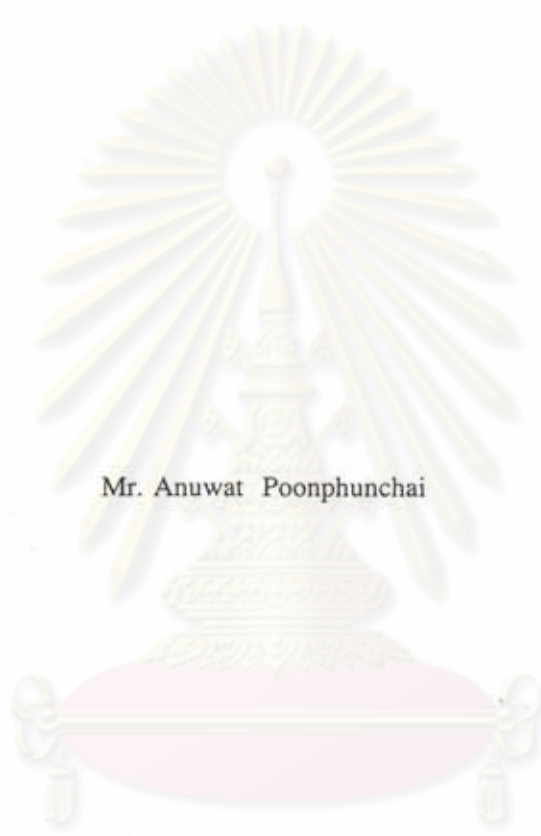
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-724-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOLIDIFICATION OF HEAVY-METAL SULFIDE SLUDGE USING CEMENT AND
LIGNITE FLY ASH AS BINDERS



Mr. Anuwat Poonphunchai

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

Department of Environmental Engineering

Graduate School


Chulalongkorn University

Academic Year 1996


ISBN 974-635-724-7

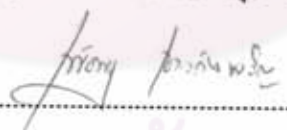
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และ
เส้นลวดเหล็กไนต์เป็นตัวประสาน
โดย นาย อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย
ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาดามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

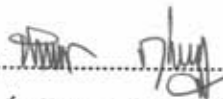

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุกวัฒน์ ชุตินวษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเชียร)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ชัยพร กู้ประเสริฐ)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย : การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และถ่านลิกไนต์เป็นตัวประสาน (SOLIDIFICATION OF HEAVY-METAL SULFIDE SLUDGE USING CEMENT AND LIGNITE FLY ASH AS BINDERS.) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 182 หน้า. ISBN 974-635-724-7.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีโดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปในตะกอนก่อนนำไปทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และถ่านลิกไนต์ ในการทดลองนี้แสดงถึงผลกระทบต่างๆที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนและแสดงสมบัติทางกายภาพของตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนเช่น กำลังรับแรงอัด, ความหนาแน่น, และความชื้นได้ของน้ำ นอกจากนี้มีการทดสอบการชะละลายเพื่อหาความเข้มข้นของโครเมียม, โปรท, และเหล็กด้วย รวมทั้งหาประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์และประมาณค่าใช้จ่ายของ ตัวประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน ในงานวิจัยนี้มีการทดลองที่สุด คือ ในการทดลองที่หนึ่งเป็นการหาปริมาณการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ซึ่งมีการแปรค่าปริมาณการเติมโซเดียมซัลไฟด์ตั้งแต่ 0 ถึง 4.50 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีของความเข้มข้นของโครเมียม, โปรท, และเหล็กที่มีอยู่ในตะกอน การทดลองที่สองเป็นการหาอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานซึ่งมีการแปรค่าตั้งแต่ 0.25, 0.35, 0.50, 0.60, และ 0.70 ในการทดลองที่สามเป็นการแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างที่ 3, 7, 14, และ 28 วัน การทดลองที่สี่เป็นการนำสัดส่วนที่เหมาะสมในการทดลองที่หนึ่งและสองมาใช้กับตะกอนโลหะหนักที่ได้จากศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ

จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของโครเมียมและเหล็กในน้ำสกัดมีค่าต่ำมากถึงแม้ว่าไม่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์ ประสิทธิภาพในการทำเสถียรของโครเมียมและโปรทมีค่าเท่ากับ 60.01 และ 91.40 % ที่สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าตามลำดับและเท่ากับ 94.00 และ 99.49% ที่สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ 3.00 เท่าตามลำดับที่อัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสานเท่ากับ 0.25 ซึ่งในทั้งสองสัดส่วนการเติมนี้ทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมและโปรทต่ำกว่ามาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ประมาณ 5,000 บาทต่อตันของตะกอนสำหรับสัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่า และ 5,790 บาทต่อตันของตะกอนสำหรับสัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ 3.00 เท่า ในขณะที่ไม่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 3,900 บาทต่อตันของตะกอนแต่ทำให้ความเข้มข้นของโปรทในน้ำสกัดสูงกว่ามาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (> 0.2 มก./ล.)

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C717803: MAJOR
KEY WORD:

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

STABILIZATION/SOLIDIFICATION / HEAVY METAL SLUDGE /
LIGNITE FLY ASH / SODIUM SULFIDE / COD WASTEWATER /
HAZARDOUS WASTE

ANUWAT POONPHUNCHAI : SOLIDIFICATION OF HEAVY-METAL
SULFIDE SLUDGE USING CEMENT AND LIGNITE FLY ASH.
THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON,
Ph.D. 182pp. ISBN 974-635-724-7.

This research investigates the stabilization of heavy metal sludge from COD wastewater treatment by adding sodium sulfide to heavy metal sludge before solidifying it with ordinary portland cement and lignite fly ash. 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 chromium, mercury and iron were carried out. The efficiency on leachability reduction and cost estimation for proper binders were also considered. There were four experiments in this research. The first experiment was carried out by varying the amount of sodium sulfide from 0 to 4.50 times stoichiometric of the concentration of chromium, mercury and iron in the sludge. The second experiment was performed by using the waste/cementitious binders ratios of 0.25, 0.35, 0.50, 0.60 and 0.70. The third experiment indicated the effects of varying curing time of the solidified specimens at 3, 7, 14 and 28 days. And the fourth experiment used the optimum conditions from the first and the second experiments to solidify heavy metals from the Samare-dum Industrial Waste Treatment Center.

The results indicated that the concentration of chromium and iron in the extracted solution was very low even if sodium sulfide was not added to the sludge. The stabilization efficiency of chromium and mercury, at a sludge/binders ratio of 0.25, was 60.01 and 91.40% for 1.75 times stoichiometric, respectively, while those of 3.00 times stoichiometric was 94.00 and 99.49%, respectively. The concentrations of both metals at these two sodium sulfide quantities were lower than the toxic substances standard promulgated by the Ministry of Industry, Thailand. Cost estimation of the treatment was about 5,000 baht per ton of sludge for 1.75 times and 5,790 baht per ton of sludge for 3.00 times while that of no sodium sulfide adding was about 3,900 baht per ton of sludge, but the concentration of mercury in the extracted solution was higher than the toxic substances standard (> 0.20 mg/l).

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต..... *อนุวัฒน์ ปูนพูนชัย*

สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *เพ็ชพร ชววกิฑริณ*

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ ที่กรุณาช่วยเหลือและให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความเมตตาอนุเคราะห์คัดลอกจนถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการต่างๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณชยุตม์ ลิ้มประเสริฐและคุณพิเชษฐ เกตุอุไรจากแผนกปฐพีวิทยา กองธรณีวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ช่วยกรุณาแนะนำการใช้เครื่องมือวัดค่าความซึมได้ของน้ำ กองควบคุมมลพิษ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริษัท ไทย-อาซาฮี เคมีภัณฑ์ จำกัดที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณมานพ เล่าศิริจากฝ่ายโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยถ่ายรูปเพื่อใช้ในประกอบในการนำเสนอวิทยานิพนธ์ และคุณพลภัทร อรัณยกานนท์ ที่ช่วยถ่ายภาพเพื่อประกอบในเล่มทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ครู อาจารย์ ที่ได้อบรมสั่งสอนให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
	บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
	กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
	สารบัญ.....	ช
	สารบัญตาราง.....	ญ
	สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1	บทนำ.....	1
บทที่ 2	วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	2
บทที่ 3	ทบทวนเอกสาร.....	3
	โลหะหนัก.....	3
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	3
	เถ้าลอยลิกไนต์.....	5
	ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น.....	10
	ของเสียเสี่ยงอันตราย.....	13
	การกำจัดของเสียเสี่ยงอันตราย โดยการทำให้เป็นก้อน.....	14
	การทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์.....	21
	กลไกการยึดจับ โลหะหนักในวัสดุซีเมนต์.....	22
	ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อน.....	32
	ความสามารถในการถูกชะละลาย.....	38
	การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์.....	38
	การทดสอบการชะละลาย.....	41
	เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อน.....	44
	การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	50
บทที่ 4	แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	63
	การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย.....	63

สารบัญ

	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	65
	การดำเนินการวิจัย.....	70
	1.การทดลองชุดที่ 1 ศึกษาปริมาณการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อการบำบัดตะกอนโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อน.....	70
	2.การทดลองชุดที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนผสมของกากตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อน.....	71
	3.การทดลองชุดที่ 3 ศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มตัวต่อการทำให้เป็นก้อน.....	72
	4.การทดลองชุดที่ 4 ศึกษาผลการนำค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และ 2 มาใช้กับตะกอนโลหะหนักชนิดอื่นๆ.....	72
บทที่ 5	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	74
	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียซีโอดีและตะกอนโลหะหนักที่ได้จากน้ำเสียซีโอดี.....	74
	1.ลักษณะสมบัติของน้ำเสียซีโอดี.....	74
	2.ลักษณะสมบัติของตะกอนโลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดี.....	74
	3.ลักษณะสมบัติของตะกอนโลหะหนักจากศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมเสมาคำ.....	76
	4.ลักษณะสมบัติของตะกอนโลหะหนักจากโรงงานเคลือบพิมพ์.....	78
	การศึกษ้อัตราส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ต่อการบำบัดตะกอนโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อน.....	80
	1.สมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....	80
	2.การทดสอบการชะละลาย.....	83
	3.การพิจารณาเลือกสัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสม..	90
	การศึกษ้อัตราส่วนผสมของกากตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อน.....	92
	1.สมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....	92

สารบัญ

	2.การทดสอบการชะละลาย.....	94
	3.ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของตะกอน โลหะหนัก.....	102
	4.การประมาณค่าใช้จ่ายของตัวประสานและสาร โซเดียมซัลไฟด์ที่ ใช้ในการทำให้เป็นก้อน.....	106
	5.การพิจารณาเลือกอัตราส่วนผสมของตะกอน โลหะหนักต่อตัว ประสานที่เหมาะสม.....	108
	การศึกษาผลของระยะเวลาในการบ่มตัวต่อการทำให้เป็นก้อน.....	109
	1.สมบัติทางกายภาพของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็น ก้อน.....	109
	2.การทดสอบการชะละลาย.....	112
	การศึกษาผลของการนำค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และ 2 มาใช้กับ ตะกอน โลหะหนักชนิดอื่นๆ.....	119
	1.สมบัติทางกายภาพของตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็น ก้อน.....	119
	2.การทดสอบการชะละลาย.....	122
บทที่ 6	สรุปผลการทดลอง.....	130
บทที่ 7	ข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม.....	132
รายการอ้างอิง	133
ภาคผนวก ก.	การเตรียมตะกอน โลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดี.....	137
ภาคผนวก ข	ส่วนผสมโดยน้ำหนักของตัวประสานและตะกอน โลหะหนักที่ใช้ในการทำให้เป็น ก้อน.....	140
ภาคผนวก ค.	การคำนวณหาปริมาณสาร โซเดียมซัลไฟด์.....	142
ภาคผนวก ง.	การคำนวณหาประสิทธิภาพในการถูกชะละลายและประสิทธิภาพการทำละลายฤทธิ์ ตะกอน โลหะหนัก.....	145
ภาคผนวก จ.	ข้อมูลผลการทดลอง.....	148
ประวัติผู้เขียน	182

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงข้อสารประกอบสูตรทางเคมีและชื่อย่อของสารประกอบในปูนซีเมนต์.....	4
3.2	แสดงผลวิเคราะห์แก๊สของเหล็กไนต์โดยวิธี X-ray Photoelectron Spectroscopy (ตัวอย่างเก็บเดือนเมษายน 2533 : Ratanasthien and others, 1990).....	6
3.3	แสดงผลวิเคราะห์โดย X-ray Fluorescence ของแก๊สของถ่านหินเหล็กไนต์จากแม่เมาะ (ตัวอย่างเก็บเดือนเมษายน 2533 : Ratanasthien and others, 1990).....	7
3.4	ผลวิเคราะห์ออกไซด์หลักของแก๊สของถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 3, 6 และ 9 (สุ่มตัวอย่างเก็บเดือนกุมภาพันธ์ 2534 : Hart and others, 1993).....	8
3.5	แสดงคุณสมบัติทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ของแก๊สของเหล็กไนต์.....	9
3.6	แสดงมาตรฐาน ASTM C 618-85 ซึ่งเกี่ยวกับสารวัสดุซีเมนต์ธรรมดา.....	10
3.7	แสดงกระบวนการกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน.....	16
3.8	แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี.....	17
3.9	แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้ของกระบวนการต่างๆที่ใช้กับของเสียที่แตกต่างกัน.....	20
3.10	แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทดสอบแบบ batch tests.....	41
3.11	แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทดสอบแบบ column tests.....	42
3.12	แสดงการเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย (Extraction Test Procedures).....	43
3.13	แสดงลักษณะสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี Sealosafe.....	47
3.14	แสดงมาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด (Extraction Solution) สำหรับของเสียเสี่ยงอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว.....	48
3.15	วิธีการทำลายฤทธิ์ของของเสียประเภทต่างๆ.....	49
3.16	แสดงผลการตรวจสอบปริมาณของแคลเซียม.....	55
5.1	แสดงลักษณะสมบัติของน้ำเสียซีโอไลท์ที่ตรวจพบในการศึกษานี้และเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา.....	75

สารบัญตาราง

5.2	แสดงชนิดของโลหะหนักในตะกอนโลหะหนักที่ตรวจพบในการศึกษานี้และเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา.....	76
5.3	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย	77
5.4	แสดงชนิดของโลหะหนักที่พบในตะกอนไฮดรอกไซด์, กากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และตะกอนโลหะหนักจากโรงงานเคลือบแผ่น.....	77
5.5	แสดงลักษณะสมบัติของน้ำสกัดตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์, กากหลอดฟลูออเรสเซนต์และตะกอนโลหะหนักจากโรงงานเคลือบแผ่น.....	79
5.6	แสดงผลการทดสอบทางกายภาพของก้อนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนในการทดลองที่ 1.....	81
5.7	แสดงผลการวิเคราะห์น้ำสกัดที่ได้จากการทดสอบการชะละลาย.....	84
5.8	แสดงผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายของสัคส่วนการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานต่างๆ.....	96
5.9	แสดงผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายของสัคส่วนการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3.00 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานต่างๆ.....	96
5.10	แสดงความสามารถในการถูกชะละลายและประสิทธิภาพในการทำลาชฤทธิ์โครเมียมที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานต่างๆ.....	104
5.11	แสดงความสามารถในการถูกชะละลายและประสิทธิภาพในการทำลาชฤทธิ์ปรอทที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานต่างๆ.....	105
5.12	แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายสำหรับตัวประสานและโซเดียมซัลไฟด์ที่ 1.75 เท่าที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนและเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา.....	107
5.13	แสดงผลการทดสอบทางกายภาพของตัวอย่างที่มีสัคส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีที่ระยะเวลาในการบ่มต่างๆ.....	110
5.14	แสดงผลการทดสอบทางกายภาพของตัวอย่างที่มีสัคส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3.00 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีที่ระยะเวลาในการบ่มต่างๆ.....	110

สารบัญตาราง

5.15	แสดงผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายของสัคส่วนการ เติมสารโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีที่ระยะเวลาใน การบ่มต่างๆ.....	113
5.16	แสดงผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายของสัคส่วนการ เติมสารโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3.00 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีที่ระยะเวลาใน การบ่มต่างๆ.....	113
5.17	แสดงผลการทดสอบทางกายภาพของตะกอน โลหะหนักชนิดต่างๆที่ผ่าน การทำให้เป็นก้อน.....	120
5.18	แสดงผลการทดสอบน้ำสกัดที่ผ่านการทดสอบการชะละลายของตะกอน โลหะ หนักชนิดต่างๆที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....	123

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	แสดงผลของปฏิกิริยาไฮดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	12
3.2	กราฟแสดงค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย.....	23
3.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่างและซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย.....	25
3.4	กราฟแสดง pC-pH diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม, โครเมียม และตะกั่ว.....	25
3.5	ภาพ Micrograph ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ธรรมดา แสดงให้เห็นว่ามีผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขนาดใหญ่และมีกลุ่มเส้นใยของแคลเซียม-ซิลิเกตไฮดรตซึ่งแทงทะลุออกมาจากผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	27
3.6	ภาพ Micrograph ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิเกต แสดงให้เห็นว่ามี Hadley grain และเจลของแคลเซียมซิลิเกต.....	28
3.7	ภาพ Micrograph ของโครงสร้างซีเมนต์ผสมซิลิเกตที่มีสังกะสีผสมอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่ามีผลึกของ Ettringite ใหญ่และยาวขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีรูพรุนล้อมรอบอยู่มากมาย.....	28
3.8	กราฟแสดงการกระจายขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง โดยที่รูป A คือซีเมนต์ธรรมดา, รูป B คือ Chemfix, รูป C คือ Chemifix+Zn และรูป D คือ Chemfix+Hg.....	29
3.9	กราฟแสดงปริมาตรสะสมของรูพรุนในแต่ละตัวอย่าง.....	30
3.10	ภาพแสดงลักษณะร่องรอยของสารต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD.....	30
3.11	ภาพ Micrograph ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิเกตที่มีปรอทผสมอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่ามี Hadley grain และ hydrated core ซึ่งมี unhydrated grain ล้อมรอบอยู่.....	31
3.12	ภาพ Micrograph ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิเกตที่มีปรอทผสมอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่ามีเจลของแคลเซียมซิลิเกตเช่นเดียวกับที่พบในตัวอย่างที่เป็น Chemfix ดังแสดงในรูปที่ 3.6.....	31
3.13	กราฟแสดงปริมาณของของเสียชนิดต่างๆใน leachate.....	33

สารบัญรูป

3.14	กราฟแสดงผลของของเสียชนิดต่างๆต่อความสามารถในการถูกชะละลาย.....	33
3.15	กราฟแสดงผลของของเสียต่อค่ากำลังรับแรงอัด.....	34
3.16	กราฟแสดงผลของอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด.....	35
3.17	กราฟแสดงผลของค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้สกัดต่อความสามารถในการถูกชะละลาย.....	36
3.18	กราฟแสดงผลของ surface area/volume ratio ต่อความสามารถในการถูกชะละลาย.....	37
3.19	กราฟแสดงผลของระยะเวลาการบ่มก้อนซีเมนต์ต่อความสามารถในการถูกชะละลาย.....	38
3.20	กราฟแสดงผลความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนักไฮดรอกไซด์และโลหะหนักซัลไฟด์.....	40
3.21	กราฟแสดงผลของ leaching test ของ 0.15 โมลาร์ ของ buffered HAC leachate.....	52
3.22	กราฟแสดงผลของ leaching test ของ 0.30 โมลาร์ ของ buffered HAC leachate.....	53
3.23	กราฟแสดงผลของ leaching test ของ 0.50 โมลาร์ ของ buffered HAC leachate.....	54
4.1	ภาพตัวประสานที่ใช้ในการทดลอง.....	64
4.2	ภาพตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง.....	66
4.3	ภาพตะกอนโลหะหนักที่ได้จากศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมคำที่ใช้ในการทดลอง.....	67
4.4	ภาพแบบหล่อซีเมนต์ขนาด 5x5x5 ซม.	68
4.5	ภาพเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัด (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).....	68
4.6	ภาพเครื่องมือทดสอบความซึมได้ของน้ำ (แผนกปฐพีวิทยา กองธรณีวิทยาการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย).....	69
5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์.....	82

สารบัญรูป

5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์.....	82
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับปริมาณการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์.....	86
5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับปริมาณการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์.....	86
5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นด่างของน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับปริมาณการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์.....	88
5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดหลังผ่านการชะละลายกับปริมาณการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์.....	88
5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับปริมาณการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์.....	89
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับปริมาณการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์.....	89
5.9	ภาพแสดงตัวอย่างตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานเท่ากับ 0.35 - 0.70 ที่สัดส่วนการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 และ 3.00 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี..	93
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสาน.....	97
5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสาน.....	97
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นด่างของน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสาน.....	99
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสาน.....	99
5.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบการชะละลายกับอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสาน.....	101

สารบัญรูป

5.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดหลังผ่าน การทดสอบการชะละลายกับอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสาน.....	101
5.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับระยะเวลาในการบ่ม.....	111
5.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาในการบ่ม.....	111
5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบ การชะละลายกับระยะเวลาในการบ่ม.....	114
5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัดหลังผ่าน การทดสอบการชะละลายกับระยะเวลาในการบ่ม.....	114
5.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นด่างของน้ำสกัดหลังผ่าน การทดสอบการชะละลายกับระยะเวลาในการบ่ม.....	116
5.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดหลัง ผ่านการทดสอบการชะละลายกับระยะเวลาในการบ่ม.....	116
5.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลัง ผ่านการทดสอบการชะละลายกับระยะเวลาในการบ่ม.....	118
5.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดหลังผ่าน การทดสอบการชะละลายกับระยะเวลาในการบ่ม.....	118
5.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับชนิดของตะกอน โลหะหนัก.....	121
5.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับชนิดของตะกอน โลหะหนัก.....	121
5.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสกัดหลังผ่านการทดสอบ การชะละลายกับชนิดของตะกอนโลหะหนัก.....	125
5.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัดหลังผ่านการ ทดสอบการชะละลายกับชนิดของตะกอนโลหะหนัก.....	125
5.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นด่างของน้ำสกัดหลังผ่าน การทดสอบการชะละลายกับชนิดของตะกอนโลหะหนัก.....	127
5.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดหลัง ผ่านการทดสอบการชะละลายกับชนิดของตะกอนโลหะหนัก.....	127

สารบัญรูป

5.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลัง ผ่านการทดสอบการชะละลายกับชนิดของตะกอน โลหะหนัก.....	129
5.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดหลังผ่าน การทดสอบการชะละลายกับชนิดของตะกอนโลหะหนัก.....	129



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย