

การทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์
ผสมเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน



นางสาวกรทิพย์ เชี่ยวชาญ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

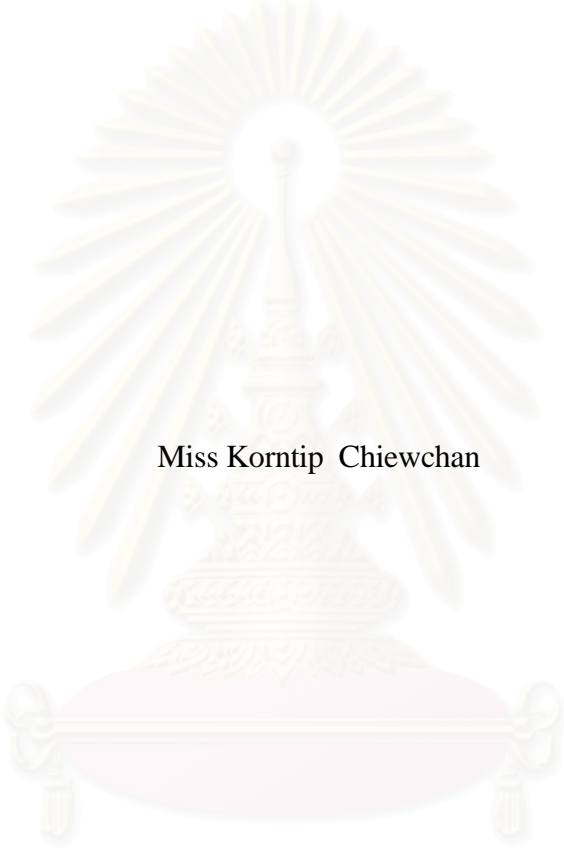
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4812-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE USING CEMENT
AND MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATOR FLY ASH



Miss Korntip Chiewchan

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 2003

ISBN 974-17-4812-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

จากเตาเผาขยะชุมชน

โดย นางสาวกรทิพย์ เชี่ยวชาญ

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โสฬหวิวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเกียรติยศ ศรีสถิตย)

กรทิพย์ เชี่ยวชาญ : การทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน. (SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE USING CEMENT AND MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATOR FLY ASH)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ ; 112 หน้า ISBN 974-17-4812-4

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนโดยปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นวัสดุประสาน ในการทดลองนี้แสดงถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีผลกับการทำให้เป็นก้อน และแสดงถึงสมบัติทางกายภาพของตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน เช่น กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการชะละลายเพื่อหาความเข้มข้นของ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี รวมทั้งหาประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ และประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอน

โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และกากตะกอนโลหะหนัก หาปริมาณน้ำในมวลที่ให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุสูงที่สุด (Optimum moisture content ; OMC) และทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้เป็นก้อน โดยพิจารณาจากค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด และประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย ซึ่งมีการแปรค่าตะกอนต่อวัสดุประสานเป็น 0.25 0.5 0.75 1.00 และ 1.25 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเป็น 0 0.25 0.5 และ 0.75 โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนน้ำตามอัตราส่วนตะกอนและวัสดุประสาน โดยพิจารณาจากค่าปริมาณน้ำในมวลที่ให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุสูงที่สุด (Optimum moisture content ; OMC) และนำสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดมาทำการแปรค่าระยะเวลาบ่มเป็น 1 3 7 14 และ 28 วัน และทำการประเมินค่าใช้จ่าย

จากผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย สรุปได้ว่าเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุพอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และปริมาณน้ำในมวลเถ้าลอยและกากตะกอนที่ให้ค่าความหนาแน่นของเถ้าลอยและกากตะกอนสูงที่สุดคือ 0.372 และ 0.40 ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนการตะกอนต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมเป็น 1.25 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์เป็น 1 : 3 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.42 และระยะเวลาบ่ม 3 วัน ได้ผลของค่ากำลังรับแรงอัดเป็น 7.06 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่น 1.58 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และประสิทธิภาพในการลดการละลายทองแดง สังกะสี และตะกั่ว เป็น 78.62% 62.16% และ 73.08% ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนเท่ากับ 4,437 บาทต่อตันกากตะกอน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ นิสิต _____
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
 ปีการศึกษา 2546

##4370206921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : SOLIDIFICATION / HEAVY METAL SLUDGE / FLY ASH / MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION RESIDUE

KORNTIP CHIEWCHAN : SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE USING CEMENT AND MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATOR FLY ASH : THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIJ , Ph.D.,112 pp.ISBN 974-17-4812-4

This research investigated the solidification of heavy metal sludge using cement and municipal solid waste incinerator fly ash as a binder. The experiment was 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 and density. In addition, extraction test on lead copper and zinc were also carried out. The efficiency of leachability reduction and cost estimation.

There were the studies of the physical and chemical characteristics of fly ash and heavy metal sludge, optimum moisture content (OMC), the appropriate ratio of fly ash – cement binder on solidification by considering leachability. The experiment were conducted by varying the sludge/binder ratios at 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 and 1.25, fly ash/cement ratios at 0, 1:3, 1:1 and 3:1, the ratio of water/binder considered by optimum moisture content (OMC). Used the optimum condition curing time of 1, 3, 7, 14 and 28 days. Finally, the estimated cost of the treatment.

The experiment results indicated that the physical and chemical characteristics of fly ash could not be classified as a pozzolanic material according to ASTM C618 requirements. The optimum moisture content (OMC) of fly ash and heavy metal sludge were 0.372 and 0.40 respectively. The results indicated that the optimum sludge/binders ratio was 1.25, the fly ash/binders ratio was 1:3, the optimum condition for water/binder ratio was 0.42 and the curing time was 3 days. The results of compressive strength was equal to 7.06 kg/cm², the density was equal to 1.58 ton/m³, the leachability efficiency of copper, zinc and lead were 78.62% 62.16% and 73.08%respectively. Cost estimation of treatment was about 4,437 baht per ton of sludge.

Department Environment Engineering Student's signature_____.

Field of study Environment Engineering Advisor's signature_____.

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ตลอดจนระยะเวลาในการตรวจทานวิทยานิพนธ์นี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำต่าง ๆ และช่วยแก้ไขให้วิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวิจัยของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมปฐพีกลศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม และของเสียอันตราย (ศูนย์เครือข่าย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) บริษัทโตชิบา เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด โรงเผามูลฝอยชุมชนจังหวัดภูเก็ต ที่ให้ความอนุเคราะห์ อุปกรณ์ เครื่องมือ สถานที่ และวัสดุในการวิจัย

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างดำเนินการวิจัย

ขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ นิสิตปริญญาโท ทุกคนที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และกำลังใจที่ดีแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอบคุณผู้บังคับบัญชาและผู้ร่วมงานที่ให้สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ บิดามารดา ญาติพี่น้องและเพื่อนๆ ที่ให้คำปรึกษา กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	3
2.1 ของเสียอันตราย.....	3
2.2 โลหะหนัก.....	4
2.3 ตะกอนโลหะหนัก.....	4
2.4 การทำลายฤทธิ์ของเสียอันตรายโดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน.....	7
2.5 การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยการใช้อัลตราซาวด์.....	14
2.6 ข้อดีของการทำลายฤทธิ์ของของเสียที่เป็นอันตราย โดยการทำให้แข็งตัวด้วยปูนซีเมนต์.....	17
2.7 กลไกการยึดจับโลหะหนัก.....	17
2.8 ปูนซีเมนต์.....	20
2.9 ถ้ำลอยขยะ.....	22
2.10 ถ้ำลอยลิกันต์.....	26
2.11 การนำซีเมนต์มาผสมในคอนกรีต.....	28
2.12 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้น.....	28
2.13 เกณฑ์มาตรฐานในการระบุของเสียอันตราย.....	30
2.14 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	31
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย.....	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 การดำเนินการทดลอง.....	39
3.3 การหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะหนัก.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	48
4.1 สมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก และแก้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน.....	48
4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนวัสดุประสานที่เหมาะสม.....	55
4.3 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม.....	65
4.4 ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย.....	72
4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอน.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก. รายละเอียดการทดลอง.....	83
ภาคผนวก ข. สมบัติของวัสดุผสม.....	90
ภาคผนวก ค. การหาค่า Optimum moisture content.....	93
ภาคผนวก ง. ผลการทดลอง.....	100
ภาคผนวก จ. เกณฑ์มาตรฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....	106
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	รายละเอียดของกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนตามวิธีต่างๆ.....10
2.2	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนในแต่ละวิธี.....11
2.3	กากของเสียที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน.....16
2.4	ออกไซด์ของธาตุต่างๆ และสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....21
2.5	สถิติปริมาณมูลฝอยที่ทำการรับและเผารวมทั้งปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยที่เกิดขึ้น.....23
2.6	ผลการวิเคราะห์สมบัติมูลฝอย.....24
2.7	ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน.....25
2.8	สมบัติทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์.....26
2.9	เปรียบเทียบร้อยละของธาตุในเถ้าลอยจากการเผาขยะชุมชน และเถ้าลอยลิกไนต์.....27
4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนด้วย เครื่อง X-ray fluorescence Spectrometry (XRF).....48
4.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตะกอน โดยวิธีการย่อยด้วยกรดเข้มข้น.....49
4.3	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน โดยวิธีการชะละลาย.....49
4.4	ผลของค่าเฉลี่ยและค่า Uniformity Coefficient ของตะกอนโลหะ.....50
4.5	ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยลิกไนต์ และเถ้าลอยขยะ.....51
4.6	เปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยลิกไนต์ และเถ้าลอยขยะ.....52
4.7	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอย โดยวิธีการย่อยด้วยกรดเข้มข้น.....52
4.8	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยขยะโดยวิธีการชะละลาย.....53
4.9	ผลของค่าเฉลี่ยและค่า Uniformity Coefficient ของเถ้าลอยขยะ.....53
4.10	ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าลอยขยะ.....54
4.11	ปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน56
4.12	ปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....57
4.13	ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....59
4.14	ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ทองแดง.....60
4.15	ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์สังกะสี.....61
4.16	ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ตะกั่ว.....62
4.17	ปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....65
4.18	ปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....66

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.19 ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....	67
4.20 ค่าพีเอชของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำก้อนแล้ว.....	68
4.21 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก.....	69
4.22 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....	70
4.23 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....	71
4.24 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก.....	72



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์.....5
2.2	ความสามารถในการชะละลายโลหะไฮดรอกไซด์.....6
2.3	ความสามารถในการชะละลายโลหะซัลไฟด์.....6
2.4	กระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน.....8
2.5	กราฟแสดงพีเอชและความเป็นด่างสะสมจากการสกัด 15 ครั้ง.....18
2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลาย ความเป็นด่างถูกชะละลาย และซิลิกอนถูกชะละลาย จากการสกัด 15 ครั้ง.....19
2.7	แผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว.....20
2.8	ระบบเตาเผามูลฝอย.....24
3.1	ภาพแสดงวัสดุผสมต่าง ๆ..... 43
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำให้เป็นก้อน..... 44
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับหาค่า Optimum moisture content.....44
3.4	ภาพแสดงอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง.....45
3.5	เครื่อง Particle size analyzer.....46
3.6	เครื่องย่อยสลายตัวอย่างโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ.....46
4.1	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน.....55
4.2	ปริมาณทองแดงในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....57
4.3	ปริมาณสังกะสีในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 58
4.4	ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....59
4.5	ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ทองแดง.....61
4.6	ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์สังกะสี.....62
4.7	ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ตะกั่ว.....63
4.8	ปริมาณทองแดงในน้ำชะละลาย.....66
4.9	ปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลาย.....67
4.10	ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลาย.....68
4.11	ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์โลหะหนัก.....69
4.12	กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....70
4.13	ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....71

สัญลักษณ์

ASTM	American Society for Testing and Materials
C ₂ S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C ₃ A	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
C ₃ S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
FA/OPC	อัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์
OMC	Optimum moisture content
OPC	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
S/B	อัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ผลจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของเศรษฐกิจ และการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรในประเทศไทย ก่อให้เกิดของเสียจำนวนมากทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ และจากบ้านเรือน ซึ่งของเสียเหล่านี้หากก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้หากไม่มีการกำจัดอย่างเหมาะสม โรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่ประกอบด้วยโลหะหนัก ซึ่งถ้าปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ จึงต้องมีการกำจัดหรือทำลายฤทธิ์ก่อน ซึ่งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้แยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย คือ การตกตะกอน สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือการกำจัดกากตะกอนโลหะหนักที่เกิดขึ้น เนื่องจากโลหะหนักในกากตะกอนเหล่านี้สามารถชะละลายออกมาปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมได้อีก วิธีการหนึ่งที่นิยมในการบำบัดกากตะกอน คือ การทำให้เสถียร (Stabilization) การทำให้เป็นก้อน (Solidification)

กระบวนการในการกำจัดขยะจากบ้านเรือนนั้น ปัจจุบันนิยมกำจัดด้วยการฝังกลบ และการเผา เนื่องจากค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก และการดำเนินการค่อนข้างง่าย และรวดเร็ว ผลจากการเผาขยะจะเกิดขี้เถ้าขึ้น ซึ่งมีปริมาณมากประมาณปีละ 2,3000 ตัน โดยขี้เถ้าจะแบ่งออกได้เป็นเถ้าหนัก (Bottom ash) และ เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเราต้องมีวิธีการกำจัดขี้เถ้าเหล่านี้ให้เหมาะสมเพื่อไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

การวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงการทำลายฤทธิ์ตะกอนที่มี ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ซึ่งได้จากการตกตะกอนน้ำเสีย ด้วยการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นตัวประสานเพื่อนำไปทิ้งในหลุมฝังกลบ ซึ่งเป็นการนำของเสียที่เหลือจากการเผาขยะชุมชนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นการจัดการกับของเสียเหล่านั้น และถือว่าการลดของเสียอีกวิธีหนึ่งด้วย (Waste Minimization) โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของตะกอนและวัสดุประสาน ปัจจุบันประกอบการพิจารณา ได้แก่ การชะละลาย ค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าลอย
2. ศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักด้วยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน
3. ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก โดยทดสอบความสามารถในการถูกชะละลายโลหะหนัก ค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น
4. ศึกษาประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย โดยการทดสอบการถูกชะละลายโลหะหนักก่อน และหลังผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน
5. ประเมินค่าใช้จ่ายในการทำเป็นก้อนต่อปริมาณโลหะหนัก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการทำให้เสถียรตะกอนที่มีโลหะทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และตะกั่ว (Pb) โดยการทำให้เป็นก้อน โดยใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยขยะจากโรงเผาขยะชุมชนจังหวัดภูเก็ต โดยใช้ตะกอนโลหะหนักจากการตกตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมบางกระดี

ขอบเขตการวิจัยมีดังนี้

1. หาปริมาณน้ำที่ทำให้วัตถุดิบมีความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) ของเถ้าลอย และกากตะกอนโลหะหนัก
2. หาอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน และอัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่คำนวณจากค่า Optimum Moisture Content ที่ได้จากการทดลองที่ 1
3. ระยะเวลาในการบ่มตัวของก้อนซีเมนต์
4. ทดสอบหาประสิทธิภาพในการทำก้อน ด้วยการทดสอบการถูกชะละลายตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 ของเสียอันตราย (Hazardous waste)

ของเสียอันตราย ตามคำจำกัดความของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ หมายถึง ของเสียหรือสิ่งเจือปนด้วยของเสียซึ่งมีความเข้มข้น หรือมีคุณสมบัติด้านกายภาพ เคมี หรืออื่นๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการตายหรือเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้ และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกัก ขนส่ง และกำจัด

โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติที่กำหนดว่าของเสียนั้นเข้าข่ายเป็นของเสียอันตราย ได้แก่ เป็นสารไวไฟ มีฤทธิ์กัดกร่อน เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย เป็นสารกัมมันตรังสี มีความเป็นพิษ และติดเชื้อได้ง่าย (Pojasek, 1979 อ้างจาก U.S. EPA. 1978)

ประเทศต่างๆ จะมีคำจำกัดความของคำว่ากากหรือของเสียอันตรายของตนเอง ที่แตกต่างกันออกไป ตามแต่ว่าจะถูกพัฒนามาจากหน่วยงานของรัฐหน่วยใด เช่น ฝรั่งเศส หมายถึง ของเสียที่เกิดจากการผลิต การนำเข้า ขนส่ง หรือการทิ้ง จนอาจเป็นอันตรายต่อ ดิน พืช สัตว์ อาจทำลายสิ่งแวดล้อม หรือไปปนเปื้อน อากาศ น้ำ ในเยอรมนี ก็เรียกว่า เป็นของเสียพิเศษ ที่เกิดจากการประกอบธุรกิจ ที่มีคุณสมบัติ ส่วนผสม ที่จะเป็อันตรายต่อสุขภาพ อากาศ น้ำ หรือเป็นสิ่งที่อาจจะระเบิดได้ ติดไฟได้ หรืออาจทำให้เกิดโรค ซึ่งจะต้องกำจัดเป็นพิเศษ แยกจากขยะชุมชน ส่วนในเนเธอร์แลนด์ เรียกว่า กากสารเคมี ซึ่งหมายถึงของเสียที่ปนเปื้อนสารเคมี กลุ่มที่รัฐประกาศระบุไว้หรือของเสียที่เกิดจากกระบวนการทางผลิตทางเคมี สำหรับในสหราชอาณาจักร ก็เรียกว่าของเสียที่เป็นพิษ หรือเป็นสารมลพิษ ซึ่งหากเกิดขึ้น จะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นอันตราย หรือในสหรัฐอเมริกา ก็หมายถึงขยะที่เป็นของแข็ง ที่มีปริมาณความเข้มข้น คุณสมบัติ หรือมีเชื้อโรค จนอาจเพิ่มอัตราการตาย หรือพิการและเป็นภัยต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อบำบัด เก็บ ขนส่ง หรือกำจัดไม่ดี สำหรับประเทศญี่ปุ่น จะเรียกว่า ของเสียที่ต้องควบคุมเป็นพิเศษ ซึ่งหมายถึง ของเสียที่อาจจะระเบิดได้ ติดไฟได้ เป็นพิษหรือมีเชื้อโรค จนอาจทำลายสุขภาพมนุษย์ หรือสิ่งแวดล้อมของสิ่งมีชีวิต

สำหรับคำจำกัดความของไทย ซึ่งตาม พรบ. ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมของ ไทย พ.ศ. 2535 นั้น จะไม่มีคำนิยาม สำหรับคำว่าของเสียอันตรายโดยตรง แต่จะใช้คำว่า “ของเสีย” ซึ่งจะหมายรวมถึงขยะชุมชน และของเสียที่มีวัตถุอันตรายปนเปื้อน หากปล่อยทิ้งอาจเป็น

อันตรายต่อสุขภาพ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับ พรบ. โรงงาน 2535 ซึ่งใช้ควบคุมปัญหามลพิษ

2.2 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท สังกะสี เป็นต้น โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ เมื่อโลหะเหล่านี้แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ และมีผลต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

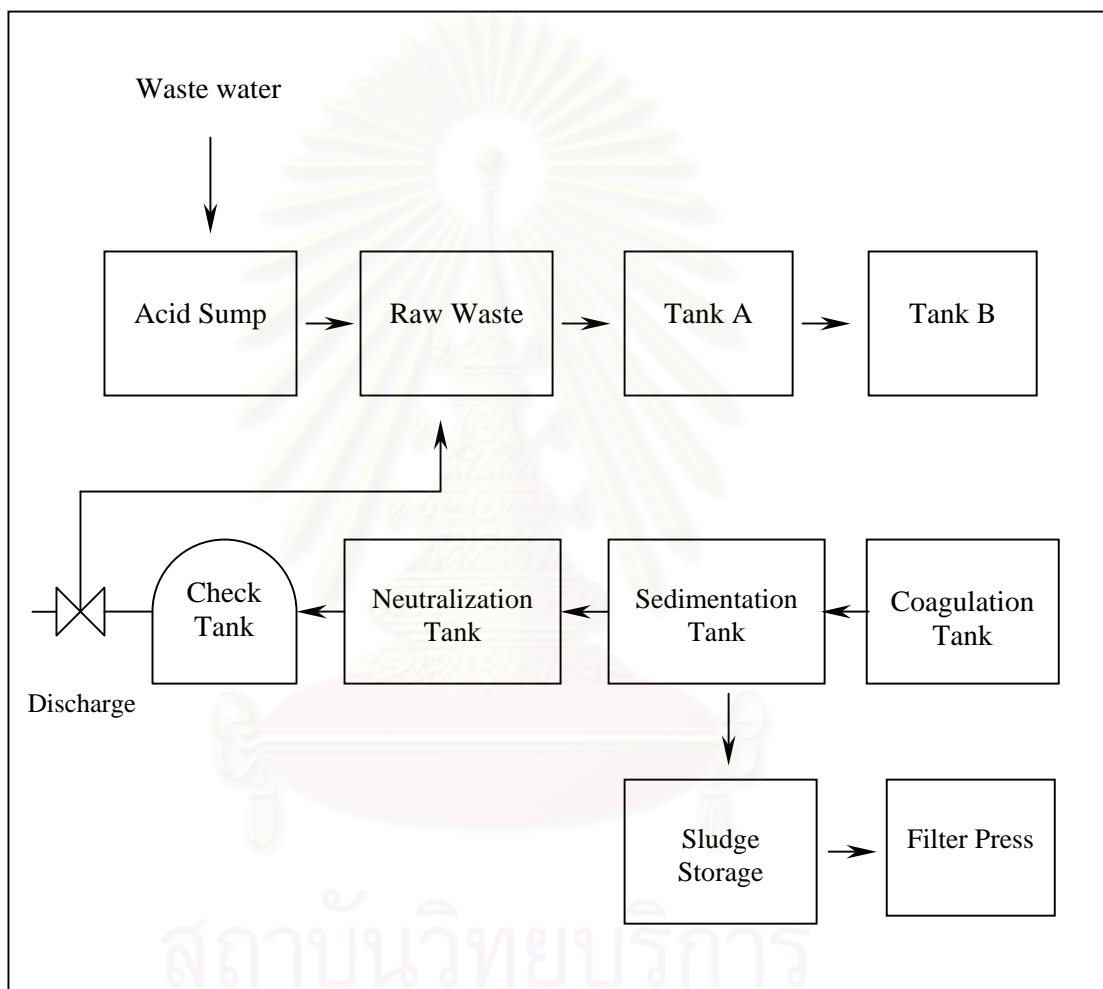
โลหะหนักหลายชนิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในกิจการอุตสาหกรรมต่างๆ และจัดเป็นโลหะที่มีพิษ ได้แก่ เบริลเลียม (Be) โครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) เงิน (Ag) อาร์เซนิก (As) แอนติโมนี (Sb) เซเลเนียม (Se) แทลเลียม (Tl) และปรอท (Hg) กากของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะเหล่านี้มักจะมีโลหะหนักเจือปนซึ่งอาจเข้าข่ายเป็นของเสียที่เป็นอันตราย

2.3 ตะกอนโลหะหนัก

ตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นตะกอนโลหะทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ซึ่งอยู่ในรูปโลหะออกไซด์ ที่ได้จากการตกตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียจากการผลิต Integrated Circuit ของโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีการบำบัดน้ำเสียดังรูปที่ 2.1

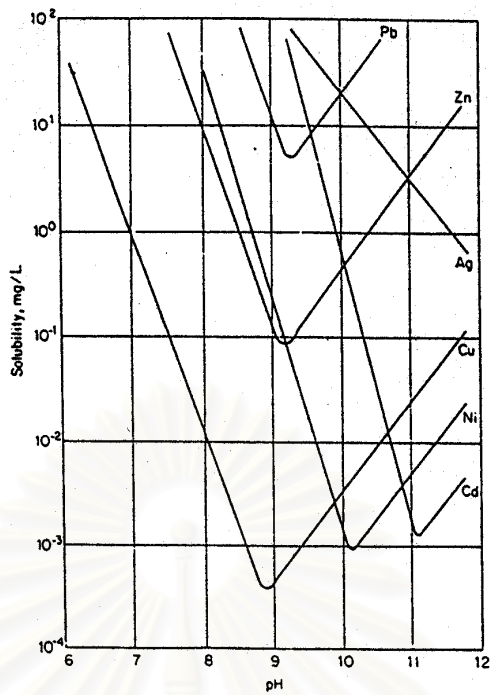
น้ำเสียจากการผลิตมีปริมาณประมาณ 40 – 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้ำเสียจะไหลไปรวมกันที่ถังพักน้ำเสีย ที่ถังพักน้ำเสียจะมีการเติมปูนขาวก่อนเข้าถัง Raw Waste โดยมีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำเสียไปยังถัง A ที่ถังนี้จะมีการเติมกรดไฮโดรคลอริก และควบคุมค่าพีเอช (pH) 8 – 9 จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งต่อไปยังถัง B เพื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และสารเคมีเพื่อปรับค่าพีเอช (pH) น้ำเสีย และทำให้เกิดปฏิกิริยาในการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก คือ ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว ให้เกิดเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะเหล่านั้น ซึ่งเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งต่อไปยังถังตกตะกอนเคมี (Coagulation tank) น้ำที่ผ่านการตกตะกอนทางเคมีแล้วจะถูกส่งต่อไปยังถังตกตะกอน (Sedimentation tank) เมื่อแยกส่วนที่เป็นตะกอนออกจากน้ำ ตะกอนจะไปยังถังเก็บตะกอน (Sludge storage) แล้วนำ

ไปรีดน้ำออกโดยใช้เครื่องรีดน้ำแบบ Belt filter press และนำไปบรรจุถุงเพื่อขนส่งไปบำบัดด้วย Genco น้ำใสที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะส่งต่อไปยังถัง Neutralizations tank และผ่านถึงตรวจสอบพีเอช (pH) ถ้าความเป็นกรดและต่างอยู่ในช่วง 5.5 ถึง 9 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) สามารถทิ้งออกทางท่อระบายน้ำทิ้ง โดยจะมีการบำบัดขั้นที่ 2 โดยสวนอุตสาหกรรมบางกระดี แต่ถ้าน้ำใสมีค่าพีเอช (pH) ไม่อยู่ในช่วงนี้ก็จะถูกส่งไปยังถัง Raw Waste เพื่อบำบัดอีกครั้งหนึ่ง

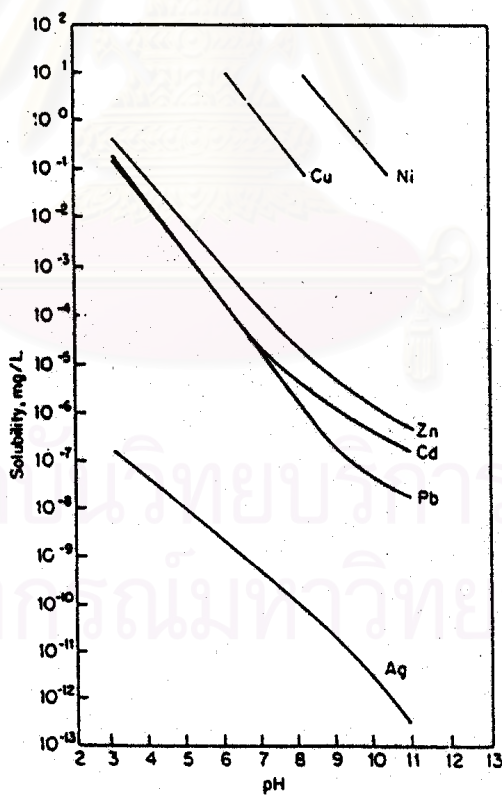


รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

การแยกโลหะหนักออกโดยการตกตะกอนนั้นจะทำให้เกิดตะกอนโลหะหนัก ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช (pH) ซึ่งจะทำให้โลหะหนักชะละลายออกมาได้ ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ เนื่องจากน้ำในของเสียและน้ำชะละลายอาจปนเปื้อนลงสู่ดินและน้ำใต้ดินได้ง่าย รูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 แสดงความสามารถในการชะละลายของโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์ตามลำดับ (Chung , 1989)



รูปที่ 2.2 ความสามารถในการชะละลายโลหะไฮดรอกไซด์



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการชะละลายโลหะซัลไฟด์

2.4 การทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน (Solidification and Stabilization of Hazardous Waste)

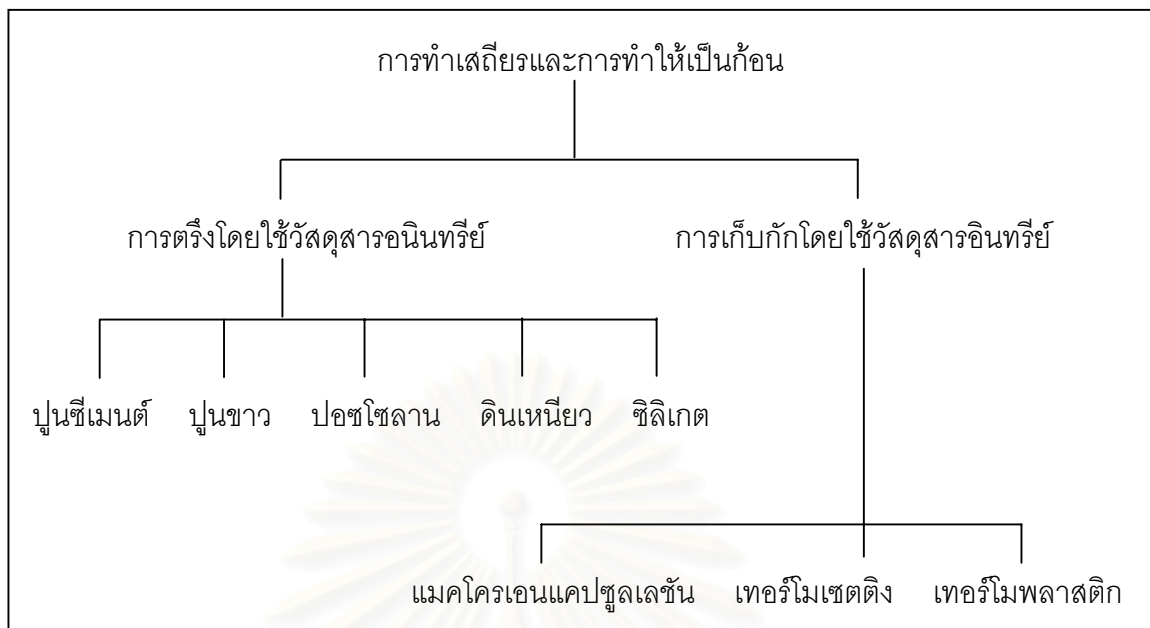
การทำให้แข็งตัวเป็นก้อน (Solidification) หมายถึง กระบวนการในการทำให้ของเสียที่เป็นของเหลวหรือตะกอน (Sludge) แข็งตัวคงรูปเป็นก้อน โดยการผสมกับวัสดุประสาน (Binder) ของเสียและวัสดุประสานจะทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน ยังผลให้ของเสียที่แข็งตัวเป็นก้อนทำให้มีความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและขนส่ง (Sollar และ Perry, 1989 อ้างถึง Wiles, 1987)

การทำให้มีเสถียรภาพ (Stabilization) หมายถึง กระบวนการในการทำลายฤทธิ์ หรือลดความเป็นพิษของของเสียที่เป็นอันตราย โดยทำให้ของเสียที่เป็นอันตรายนั้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมี เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารเฉื่อย (Inert Substance) มากขึ้น ทั้งนี้อาจอยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลาย (Insoluble Substance) ความเป็นพิษจะถูกจับไว้ในโครงสร้างผลึกที่คงตัวโดยปกติแล้วในระหว่างกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนนั้นมักจะเกิดกระบวนการทำให้มีเสถียรภาพมากขึ้นพร้อมๆ กัน ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สารพิษจะถูกเปลี่ยนรูปให้มีความคงตัวมากขึ้น และถูกกักไว้ในโครงสร้างโมเลกุลของก้อนมวลที่แข็งตัว (Sollar และ Perry, 1989 อ้างถึง Wiles, 1987)

การทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตราย โดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนนั้น เป็นวิธีการในการทำของเสียที่เป็นอันตราย มีคุณสมบัติด้านกายภาพ และเคมี เหมาะสมในการกำจัดโดยการฝังกลบ

วิธีการทำลายฤทธิ์ โดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของเสียและวัสดุที่ใช้ดังนี้

1. การยึดจับความเป็นพิษด้วยวัสดุสารอนินทรีย์ (Inorganic Fixation) มีความเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอนินทรีย์ที่มีประจุบวก (Cation)
2. การเก็บกักความเป็นพิษด้วยวัสดุสารอินทรีย์ (Organic Encapsulation) มีความเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ และของเสียอนินทรีย์ประจุลบ (Anion)



รูปที่ 2.4 กระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน

ได้มีการนำเทคนิคและวิธีการต่างๆ มาใช้ในการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน ทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของของเสียนั้นๆ ว่า มีความเหมาะสมกับวิธีการใด เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำละลายได้ดี และประหยัดค่าใช้จ่าย

Shin , Her และ Koo (1988) อ้างจาก Landreth (1980) กล่าวถึงกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน ซึ่งมีการใช้วิธีการต่างๆ ดังนี้

1. วิธีการใช้ปูนซีเมนต์ (Cement – based Techniques)
2. วิธีการใช้ปูนขาว (Lime – based Techniques)
3. วิธีเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Techniques) โดยการใช้วัสดุประเภทบิทูเมน พาราฟิน หรือ โพลีเอธิลีน
4. วิธีเทอร์โมเซตติง (Thermosetting Techniques) โดยการใช้วัสดุประเภทออร์แกนิก โพลีเมอร์
5. วิธีเอนแคปซูลเลชัน (Encapsulation Techniques)
6. วิธีการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์ (Self – cement Techniques)
7. วิธีการหลอมให้เป็นแก้ว (Glassification)

วิธีการใช้ซีเมนต์ และปูนขาว เป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย มีความเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับวิธีการที่ 3 – 7 จะมีราคาสูง มักใช้กับของเสียอันตรายที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ของเสียกัมมันตภาพรังสี หรือของเสียที่มี

สารอินทรีย์เจือปนอยู่ในปริมาณสูงๆ (Poon et al., 1983) ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนตามประเภทต่างๆ 7 วิธี การเลือกใช้วิธีการบำบัดของเสียนั้น ควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของเสียนั้นๆ ของเสียที่เป็นตะกอนโลหะหนัก สามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น Cement Based, Lime Based, Thermoplastic, Surface Encapsulation และ Glassification

Shukrow และคณะ (1982) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้สรุปข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน 7 วิธี ดังแสดงในตารางที่ 2.2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน ตามวิธีการต่าง ๆ (Shukrow และคณะ , 1982)

กระบวนการหรือวิธีการ (Process or Technique)	รายละเอียด
วิธีใช้ Self-cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน เช่น แคลเซียมซิลเฟต และแคลเซียมซิลไฟด์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมสามารถนำมาผสมกับกากของเสียอันตราย ทำให้เป็นก้อนแข็งได้ มีความสะดวกในการขนส่ง และมีอัตราการซีมน้ำต่ำ
วิธีใช้ Glassification and Production of synthetic Minerals or Ceramics	กากของเสียที่เป็นอันตรายสูง เช่น กากสารกัมมันตภาพรังสี จะนำมาทำการผสมกับทราย แล้วหลอมให้เปลี่ยนเป็นแร่ซิลิเกตสังเคราะห์ แก้วหรือผลิตภัณฑ์ของซิลิเกตจะป้องกันการชะละลายได้เป็นอย่างดี กากของเสียที่ทำให้แข็งตัวโดยวิธีนี้ จัดว่าเป็นวัสดุที่ปลอดภัยสามารถนำไปทิ้งได้โดยไม่ต้องหุ้มห่ออีกต่อไป
วิธีการใช้ซีเมนต์ (Cement-based)	ผสมซีเมนต์ลงในของเสีย และ/หรือเติมส่วนผสมอื่นๆ ทิ้งไว้ให้แข็งตัว
วิธีการใช้ปอซโซลานิก (Pozzolanic)	ทำการผสมกากของเสียกับปูนขาวและวัสดุที่เป็นปอซโซลานิก พร้อมกับเติมน้ำ ทิ้งให้แข็งตัว
วิธีใช้ความร้อน (Thermoplastic)	นำของเสียมาทำให้แห้ง และให้ความร้อนจากนั้นทำให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกร้อน เช่น บิทูเมน พาราฟิน หรือโพลีเอทิลีนทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง จะได้ก้อนแข็ง
วิธีใช้ Organic Polymer	ทำการผสมของเสียกับ Polymer ก่อน จากนั้นให้เติมสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งส่วนผสมก่อนที่จะแข็งตัว กากของเสียจะถูกกักไว้ภายในมวลอย่างหลวม ๆ คล้ายฟองน้ำ
วิธีใช้ Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น จากนั้นจะใช้วัสดุเนื้อหุ้มเคลือบผิวของก้อนของเสีย เช่น Polyethylene หรือ Organic resin

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนในแต่ละวิธี (Shukrow , et al ., 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1.Cement and Silicate Based Solidification	Chemical Fixation / Solidification	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไป เหมาะกับของเสียที่เป็นสาร อนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ราคาถูกลง - มีความยืดหยุ่นต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดีมาก - เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างดีแล้ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์ และกากของเสียที่ไม่ได้ห่อหุ้มจะสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะละลายได้ ภายใต้สภาวะที่มี pH ต่ำ - เพิ่มน้ำหนักและปริมาณของเสียทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งและฝังกลบเพิ่มขึ้น
2. Lime Based Solidification / Fixation	Chemical Fixation / Solidification	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไป เหมาะกับของเสียที่เป็นสาร อนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ราคาถูกลง - เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างดีแล้ว - การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิดโดยกระบวนการเดียวกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนในแต่ละวิธี (Shukrow , et al ., 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
3. Thermoplastic Based	Physical Fixation	แบบแห้ง (เหมาะกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี - สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความชำนาญ - ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants , Dehydrated Salts
4. Organic Polymer Process	Physical Fixation	แห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's matrix - ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียจะถูกยึดไว้ใน Polymer อย่างหลวมๆ - สารที่มี pH ต่ำจะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น - การย่อยสลายทางชีวภาพของสาร Polymer บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนในแต่ละวิธี (Shukrow , et al ., 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
5. Encapsulation	Chemical Containment	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะล้างของเสียออกมาเมื่อสารที่ห่อหุ้มอยู่ไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีการอื่นๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - การชะล้างของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่ห่อหุ้มถูกทำลาย - ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมาก
6. Self Cementing Techniques	Chemical Fixation / Solidification	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารเสริมประสิทธิภาพ (Additive) น้อย - ส่วนผสมของซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ภายใต้สภาวะที่มี pH ต่ำ
7. Glassification	Physical Fixation	แบบแห้ง	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่ถูกห่อหุ้มด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก - การบรรจุอยู่ในเกณฑ์ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่นระเหยออกมาก่อนที่จะถูกตรึง - เสียค่าใช้จ่ายสูงมาก

วัตถุประสงค์ของการทำให้แข็งเป็นก้อน

วัตถุประสงค์ของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน คือ เพื่อลดความเป็นมลพิษ หรือเก็บกักความเป็นมลพิษของของเสียที่เป็นอันตราย เป็นการป้องกันไม่ให้เป็นพิษกระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ได้มีการตั้งข้อกำหนดที่สำคัญไว้ 4 ประการดังนี้

1. ทำให้ของเสียเป็นของแข็ง
2. เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ขนส่ง
3. ลดพื้นที่ผิวของของเสีย ซึ่งจะเป็นการลดการแพร่กระจายของสารพิษ
4. ลดอัตราการละลายของสารพิษ เมื่อสัมผัสกับสารละลาย

Barnes et al.,1979 อ้างถึง ใน Rijal , 1990 ได้สรุปวัตถุประสงค์ของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนเสถียร ดังนี้

1. สารพิษทั้งหมดในของเสีย จะต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย ไม่ทำปฏิกิริยาเคมี และไม่เคลื่อนที่
2. ก้อนของเสียที่แข็งตัวเสถียรแล้วต้องไม่ซึมน้ำ มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด
3. ก้อนของเสียที่แข็งตัวเสถียรแล้วต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
 - มีขนาดคงที่
 - ทนต่อสภาพ แห้ง / เปียก หนาว / ร้อน ได้เป็นอย่างดี
 - สามารถรับแรงอัดได้ดี
 - มีค่าอัตราความซึมน้ำต่ำ
 - ในระหว่างกระบวนการต้องไม่ทำให้ปริมาณของเสียเพิ่มมากขึ้น
 - ควรเลือกใช้วิธีการที่ประหยัด หรือนำของเสียอื่นๆ มาใช้ในกระบวนการ เช่น ถ้ำลอย
 - ควรพิจารณาการนำเอาก้อนของเสียที่แข็งตัวเสถียรแล้วไปใช้ประโยชน์
 - ในการกำจัดของเสียที่แข็งตัวเสถียรแล้วนั้น ต้องไม่นำสถานที่ที่ฝังกลบไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น

2.5 การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยการใช้วัสดุซีเมนต์

(Solidification and Stabilization by Cement-based Technique)

การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยการใช้วัสดุซีเมนต์ โดยมากจะใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ธรรมดาและปูนขาว เป็นวัสดุประสาน ทั้งนี้อาจมีการใช้วัสดุปรุงแต่ง (Additive) บางประเภท เช่น ถ้ำลอย ซิลิกาเกต ซัลไฟด์ เป็นต้น เพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพในการทำให้แข็งตัวและจับยึดความเป็นพิษ ของเสียที่เป็นของเหลว หรือน้ำในตะกอนของเสียจะเป็นส่วนหนึ่งของน้ำเพื่อปฏิกิริยา

ไฮดรชันของปูนซีเมนต์ ผลจากการปฏิกิริยาไฮดรชัน จะทำให้เกิดสภาพความเป็นต่างสูงมาก ยังผลให้โลหะหนักในของเสียเปลี่ยนรูปไปเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซัลไฟด์ ซึ่งมีอัตราการละลายต่ำ และถูกจับติดอยู่ภายในรูพรุนของเนื้อซีเมนต์ โลหะบางชนิดอาจถูกกักอยู่ในโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนของซีเมนต์ (Bishop, 1988) การใช้วัสดุซีเมนต์นี้เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ในการทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตราย โดยเฉพาะตะกอนที่เกิดจากการตกผลึกของโลหะหนัก

สารมลทินที่เป็นอุปสรรคต่อการทำให้แข็งตัวของซีเมนต์

ในการทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน โดยการใช้ปูนซีเมนต์ ไม่ควรมีสารมลทินที่หน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์ เจือปนอยู่ในปริมาณที่เป็นอันตรายต่อปฏิกิริยาไฮดรชัน และการแข็งตัว สารมลทินเหล่านี้ ได้แก่

สารอินทรีย์ ดินตะกอน (Silts) และดินเหนียว จะมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัว และแข็งตัวนานขึ้น โดยอาจใช้เวลาหลายวัน ทั้งนี้ไม่ควรมีสารอินทรีย์เจือปนมากกว่าร้อยละ 10 หากมีสารอินทรีย์ในปริมาณมากๆ จะต้องทำการบำบัดเบื้องต้นก่อนการทำลายฤทธิ์ ด้วยปูนซีเมนต์ (Rijal, 1990 อ้างถึง Malone และ Jones, 1983)

สารประกอบบางชนิด เช่น เกลือของแมงกานีส ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี จะมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น และกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนไป เกลือโซเดียม เช่น อาร์ซีเนต โบเรต ฟอสเฟต ไอโอเดต และซัลไฟด์ จะมีผลหน่วงการแข็งตัวของปูนซีเมนต์

สารประกอบประเภทซัลเฟต จะมีผลหน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์ นอกจากนี้จะทำให้ปฏิกิริยากับซีเมนต์เกิดเป็นยิบซัม และสารประกอบซัลโฟลูมิเนต (Sulfoaluminate Compound) ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของวัสดุสาร ยังผลให้ก้อนวัสดุแตกสลายได้ (Thomson, Malone และ Jone, 1979)

ของเสียที่เป็นอันตรายที่มีประจุลบ เช่น โซยาไนต์ ไครเมต และอาร์ซีเนต จะต้องทำการบำบัดเบื้องต้นก่อนการทำลายฤทธิ์ โดยการใช้ปูนซีเมนต์ (Rijal, 1990 อ้างรายงานของ Barnes และคณะ, 1979)

กลไกในการทำลายฤทธิ์ของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยการใช้วัสดุซีเมนต์

การทำให้ของเสียที่เป็นอันตรายแข็งตัวเป็นก้อนนั้น จะเป็นการทำลายฤทธิ์และลดความเป็นพิษลงโดยมีกลไกในการทำลายฤทธิ์ดังนี้

1. เป็นการเจือจาง (Dilution) ความเป็นพิษลง เนื่องจากมีการเติมวัสดุประสานลงในของเสีย
2. ความแตกต่างของซีเมนต์ จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักในของเสีย เกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีอัตราการละลายต่ำ

3. เกิดเป็นปฏิกิริยาดูดติดผิว (Adsorption) ระหว่างโลหะหนักกับซีเมนต์
4. โลหะหนัก ถูกจับยึดไว้ระหว่างช่องว่างของมวลซีเมนต์
5. การทำให้เป็นก้อนเป็นการลดพื้นที่ผิวของเสีย ยังผลมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำน้อยลง ซึ่งทำให้มีการละลายน้อยลง

ตารางที่ 2.3 กากของเสียที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน

ประเภทของกากของเสีย	เหตุผลที่ไม่สมควรใช้
<p>1. กากของเสียอินทรีย์</p> <p>1.1 มีส่วนประกอบเกลือที่ละลายได้อยู่ในปริมาณสูง</p> <p>1.2 มีส่วนประกอบสารพิษประจุลบ เช่น โบเรต ในปริมาณที่สูง</p> <p>1.3 มีส่วนประกอบของสารหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ เช่น ซัลเฟต ในปริมาณที่มาก</p> <p>1.4 มีส่วนประกอบของสารหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ เช่น ซัลเฟต ในปริมาณที่มาก</p> <p>1.5 เกิดกลิ่นที่เป็นพิษ</p> <p>1.6 เกิดก๊าซพิษเมื่อสัมผัสกับน้ำ หรือ ต่าง เช่น โลหะคาร์ไบด์</p>	<p>มีผลต่อการก่อตัวของปูนซีเมนต์</p> <p>สามารถชะละลายออกมาได้ง่ายกว่าพวกประจุบวก</p> <p>มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้</p> <p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p> <p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p>
<p>2. กากของเสียอินทรีย์</p> <p>1.1 มีวัสดุที่ติดไฟ หรือเกิดระเบิดได้</p> <p>1.2 มีสารประกอบพอกยาฆ่าแมลง</p> <p>1.3 มีสารประกอบที่หน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ เช่น น้ำตาล</p>	<p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p> <p>สามารถชะละลายออกมาได้ง่าย</p> <p>มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้</p>

2.6 ข้อดีของการทำลายฤทธิ์ของของเสียที่เป็นอันตราย โดยการทำให้แข็งตัวด้วยปูนซีเมนต์

การทำลายฤทธิ์ของของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้แข็งตัวด้วยปูนซีเมนต์มีข้อดี ดังนี้

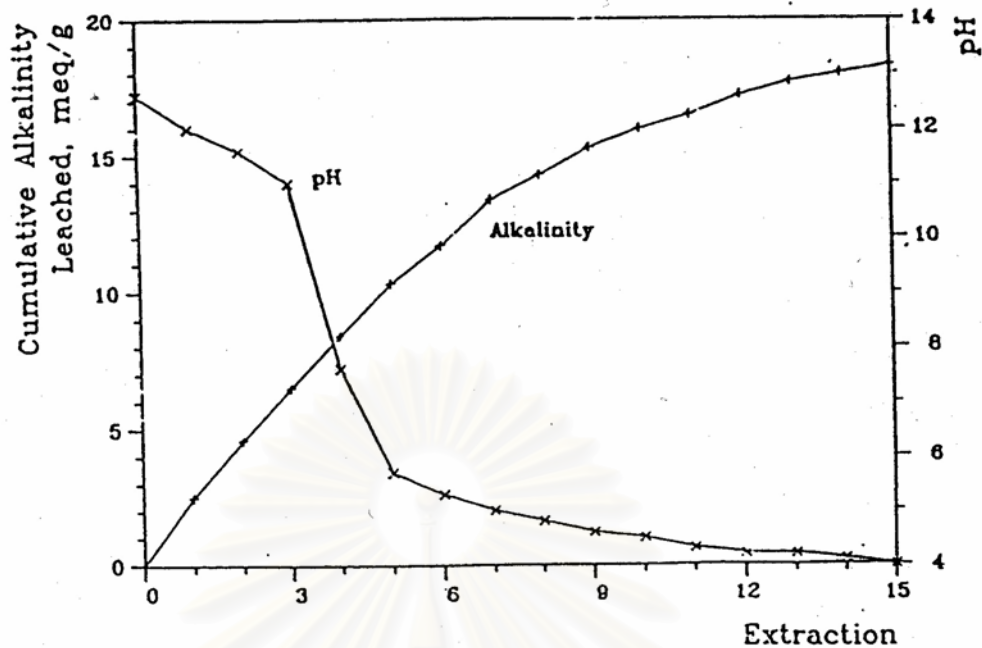
1. ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก
2. สามารถผสมให้เข้ากับของเสียได้ง่าย เทคนิคการผสมได้มีการพัฒนาเป็นอย่างดี
3. มีความยืดหยุ่น กล่าวคือ ใช้กับของเสียที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี
4. สามารถควบคุมความแข็งแรงหรือลดอัตราการซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ได้ โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

2.7 กลไกการยึดจับโลหะหนัก (Heavy Metal Binding Mechanisms)

Bishop ศึกษากลไกการยึดจับโลหะหนักจากกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ โดยใช้โลหะหนักสังเคราะห์เป็นโลหะหนักไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

2.7.1 ความจุบัฟเฟอร์ (Waste Form Buffering Capacity)

จากการทดสอบการสกัด 15 ครั้ง โดยใช้วิธีการสกัดสารของ U.S.EPA ผลการตรวจวัดพีเอชและความเป็นด่าง เขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.5 จากกราฟพบว่า ความเป็นด่างสะสมมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนครั้งของการสกัด โดยที่ความเป็นด่างในการสกัดครั้งที่ 15 มีค่าเพียงร้อยละ 1.7 ของความเป็นด่างสะสมทั้งหมดตลอดการสกัดในครั้งที่ผ่านมา ซึ่งแสดงว่า อาจจะมีความเป็นด่างเพียงเล็กน้อยที่เหลือค้างอยู่ในอนุภาค ความเป็นด่างสะสมของการสกัดทั้ง 15 ครั้ง มีค่าประมาณ 18.3 มิลลิสมมูล/กรัม ซึ่งถือว่าเป็นค่าความจุบัฟเฟอร์ของของเสียที่ทำให้เป็นก้อน ความเป็นด่างที่ถูกสกัดออกมาจากของเสียที่ถูกทำให้เป็นก้อน จะเป็นตัวควบคุมพีเอชของน้ำที่ผ่านการสกัด น้ำสกัดก่อนที่จะใช้สกัดอนุภาคของเสียมีค่าพีเอช 3.4 ในการสกัด 3 ครั้งแรก น้ำสกัดที่เป็นกรดจะถูกสะเทินให้เป็นกลาง โดยมีค่าพีเอชสูงเกิน 10 ในการสกัด 3 ครั้งต่อมา น้ำสกัดมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6 พีเอชของการสกัดอีก 9 ครั้งต่อมา ลดลงอย่างสม่ำเสมอจนมีค่าประมาณ 4 ความเป็นด่างที่ถูกสกัดออกมามีค่าลดลงในการสกัดทุกครั้ง



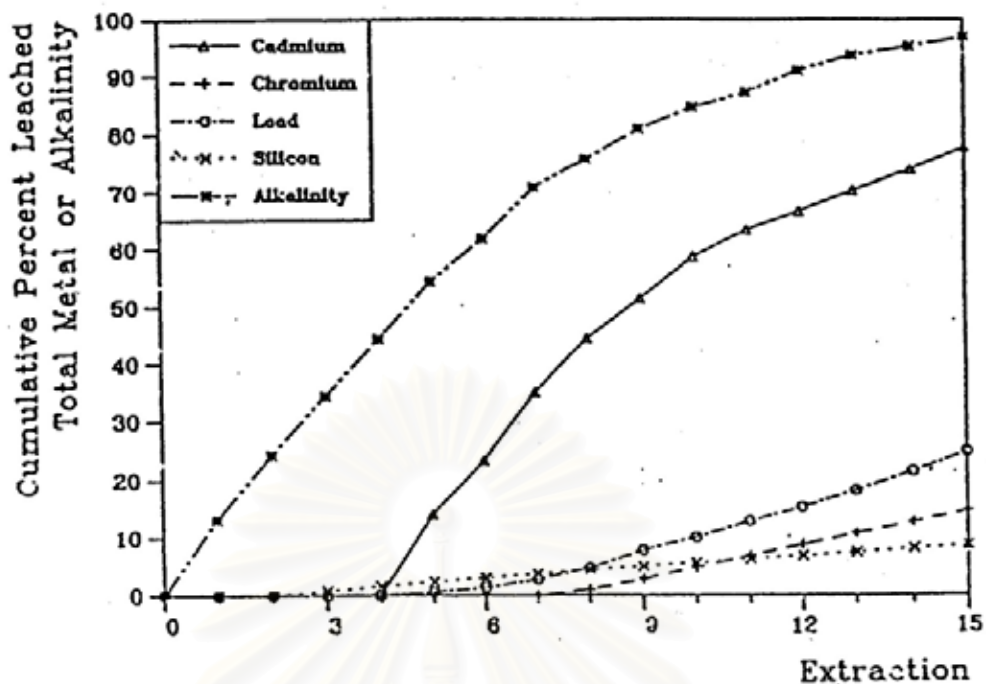
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงพีเอชและความเป็นด่างสะสมจากการสกัด 15 ครั้ง (Bishop, 1989)

2.7.2 การยึดจับโลหะหนัก

จากการทดลองที่ผ่านมาหลายครั้งทำให้ทราบว่า โลหะหนักอาจอยู่ในโพรงของโครงสร้างของของเสี้ยวที่แข็งตัว ดูดติด (Adsorption) บนผนังโพรง และทำปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อนกับสารประกอบของซีเมนต์เฟสท์

ถ้าโลหะหนักถูกติดไปในโครงสร้างแข็งในโพรง หรือถูกดูดติดบนพื้นผิวโพรงโลหะหนักเหล่านั้น ควรถูกชะละลายออกคล้ายกับการชะละลายของความเป็นด่าง จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า มีความคล้ายคลึงกันของเส้นกราฟความเป็นด่างสะสม และแคดเมียมสะสม ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียมควรอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ และเกาะติดอยู่ตามผนังโพรง

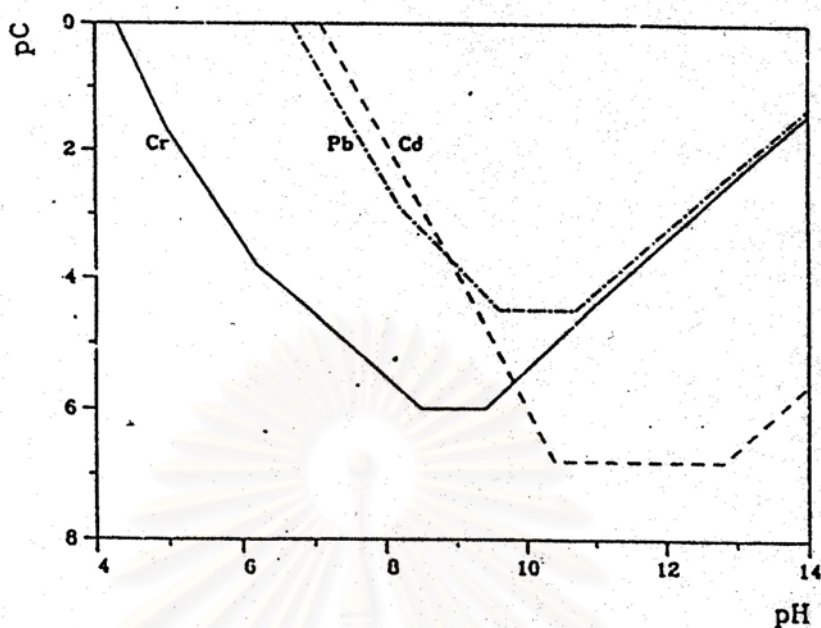
โครเมียมและตะกั่ว น่าจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกามากกว่าอยู่ในโพรง ถ้าเป็นดังที่กล่าวไว้ โลหะหนักเหล่านี้ควรถูกชะละลายออกมา เมื่อโครงสร้างของซิลิกาถูกทำลาย และจากรูปที่ 2.6 พบว่า เส้นกราฟสะสมของโครเมียมและตะกั่วคล้ายกับของซิลิกอน ดังนั้นโครเมียมและตะกั่ว ควรอยู่ในรูปซิลิเกตที่ไม่ละลายมากกว่าที่จะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลาย ความเป็นด่างถูกชะละลาย และซิลิกอนถูกชะละลาย จากการสกัด 15 ครั้ง (Bishop, 1989)

รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ในสารละลายที่มีค่ากำลังประจุ (ionic strength) 0.75 โมลาร์ ในขณะที่เริ่มผสมซีเมนต์ พีเอชสูงของซีเมนต์พีเอสประมาณ 11 - 12 ทำให้โครเมียมและตะกั่วอยู่ในรูปละลาย และกลายเป็นส่วนหนึ่งของปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิเกต สำหรับแคดเมียมอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นของแข็งที่ค่าพีเอชช่วงนี้ และไม่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการแข็งตัว จึงถูกดูดซับในรูปพรีไซพิต จากสาเหตุดังกล่าวนี้ จึงอธิบายได้ว่า โครเมียมและตะกั่วถูกชะละลายออกมา โดยขึ้นกับการละลายของซิลิเกต สำหรับแคดเมียมถูกชะละลายออกมาตามการชะละลายของความเป็นด่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 แผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียม และ ตะกั่ว (Bishop, 1989)

2.8 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากการบดเม็ดปูน ซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ เช่น หินปูน (Limestone) หรือดินขาว (Marl) กับดินเหนียว (Clay) หรือหินดินดาน (Shale) ในสัดส่วนที่ถูกต้องเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิต อาจมีการเติมแร่เหล็ก (Iron Ore) หรือยิบซั่ม (Gypsum) ตามความจำเป็น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติตามต้องการ (ประณต กุลประสูตร, 2536)

ปูนซีเมนต์แบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1. Non Hydraulic Cement หมายถึง ซีเมนต์ชนิดที่ไม่ก่อตัวหรือแข็งตัวในน้ำ ตลอดจนไม่มีความคงตัว (Unstable) ในน้ำ เช่น ปูนพลาสติกเตอร์

2. Hydraulic Cement หมายถึง ซีเมนต์ที่สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ในน้ำ มีความคงตัว (stable) ในน้ำ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา (Ordinary Portland Cement, OPC) ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป ซึ่งไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ไม่อยู่ในสภาวะอากาศรุนแรง หรือที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาค ตราเพชรเม็ดเดียว

ตารางที่ 2.4 ออกไซด์ของธาตุต่างๆ และสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
(วินิต ช่อวิเชียร, 2529)

องค์ประกอบ	สูตรเคมีและสัญลักษณ์	ร้อยละ (%)
1. ออกไซด์ของธาตุต่างๆ		
- แคลเซียมออกไซด์	CaO	60 – 65
- ซิลิกา	SiO ₂	20 – 24
- อลูมินา	Al ₂ O ₃	4 – 8
- เหล็กออกไซด์	Fe ₂ O ₃	2 – 5
2. องค์ประกอบในรูปสารประกอบ		
- ไตรแคลเซียมซิลิเกต	3CaO · SiO ₂ (C ₃ S)	49
- ไดแคลเซียมซิลิเกต	2CaO · SiO ₂ (C ₂ S)	25
- ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	3CaO · Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	12
- เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)	8

อุดม หงษ์ประธานพร, 2533 กล่าวถึงสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไว้ดังนี้

- ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, 3CaO.SiO₂) มีคุณสมบัติทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็ว ให้กำลังสูงและเกิดความร้อนมาก
- ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, 2CaO.SiO₂) มีคุณสมบัติทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้ช้า ให้กำลังสูงและเกิดความร้อนน้อย
- ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, 3CaO.Al₂O₃) มีคุณสมบัติทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัวทันทีที่ผสมน้ำ ให้ความร้อนสูง โดยจะทำให้กำลังรับแรงอัดเล็กน้อยในวันแรกและจะไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จะมีประโยชน์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต
- เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite, 4CaO.Al₂O₃ · Fe₂O₃) จะก่อตัวอย่างรวดเร็ว แต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนตเล็กน้อย ส่วนกำลังรับแรงอัดยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกตรวมกันประมาณ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เพราะฉะนั้นจึงมีการศึกษาโดยใช้ X-ray Diffraction เพื่อศึกษาสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต และตัวประสาน แคลเซียม – ซิลิเกต – ไฮเดรต ซึ่งเป็นตัวก่อการประสาน และรับกำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.9 ถ้ำลอยขยะ

ถ้ำลอยขยะเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาขยะชุมชน ในโรงเผาขยะมูลฝอยจังหวัดภูเก็ต ซึ่งการเผามูลฝอยเริ่มดำเนินการเผามูลฝอยตั้งแต่วันที่ 28 มิถุนายน 2542 ถึงวันที่ 30 ตุลาคม 2544 รวม 776 ตัน เตาเผาดำเนินการโดยเทศบาลเมืองภูเก็ต การเผามูลฝอยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.5 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- เผามูลฝอยรวม 187,364.45 ตัน เฉลี่ย 241.45 ตัน/วัน (ไม่รวมน้ำ)
- เกิดเถ้าหนัก 43,622 ตัน เฉลี่ย 56.21 ตัน/วัน (23.28%)
- เกิดถ้ำลอย 6,600 ตัน เฉลี่ย 8.51 ตัน/วัน (3.52%)

รูปที่ 2.8 แสดงระบบเตาเผามูลฝอย การดำเนินการของโรงเผาขยะมูลฝอยถูกควบคุมและตรวจสอบโดยระบบคอมพิวเตอร์จากห้องควบคุมกลาง เตาเผาเป็นแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Mitsubishi Martin Moving Grate) ซึ่งเผามูลฝอยได้ 250 ตัน/วัน ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง และสามารถทำงานได้เป็นเวลาอย่างน้อย 7,008 ชั่วโมงต่อปี โดยมีระยะเวลาดำเนินการต่อเนื่องกันอย่างน้อยครั้งละไม่ต่ำกว่า 2,000 ชั่วโมง

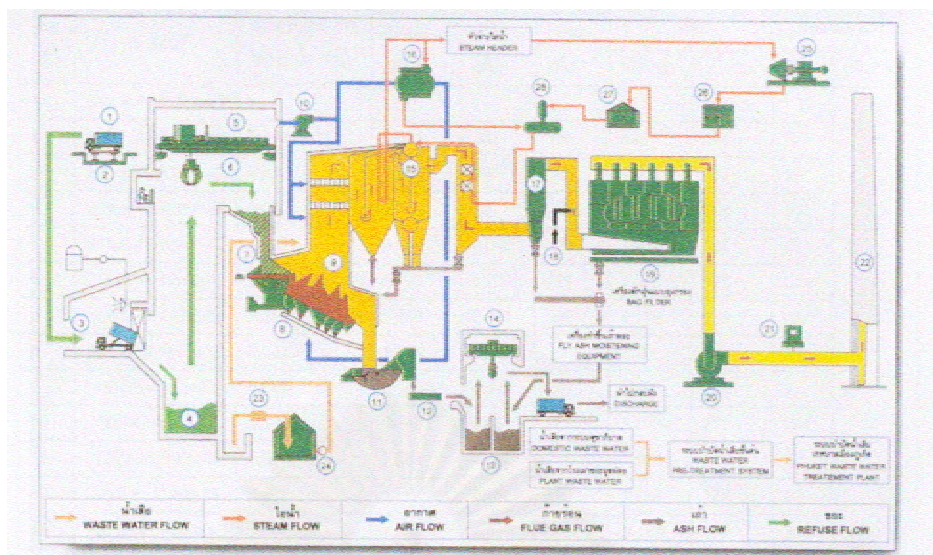
ส่วนประกอบของขยะในเมืองภูเก็ตแสดงดังตาราง 2.6 และส่วนประกอบทางเคมีของถ้ำลอยที่ได้ทำการทดสอบขั้นต้นโดยการวิเคราะห์ XRF โดยส่งตะกอนไปทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับความรู้ของธาตุต่างๆ ดังแสดงในตาราง 2.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 สถิติปริมาณมูลฝอยที่ทำการรับและเผารวมทั้งปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยที่เกิดขึ้น

รายนงานที่	ระหว่างวันเดือนปี	ปริมาณมูลฝอยที่รับเข้าโรงเผาฯ ไม่รวมน้ำ(ตัน)	ปริมาณมูลฝอยไม่รวมน้ำ			ปริมาณเถ้าทั้งหมด (ตัน)		เฉลี่ยการเผามูลฝอยไม่รวมน้ำ	
			ถูกเผา (ตัน)	เหลือ (ตัน)	เฉลี่ย (ตัน)	เถ้าหนัก	เถ้าลอย	วัน	ตัน/วัน
1.	24 พ.ค.42-22 มิ.ย.42	-	-	-	-	-	-	-	-
2.	23 มิ.ย.42-22 ก.ค.42	5,193.6	4,831	362	161	946	244	22	239
3.	23 ก.ค.42-21 ส.ค.42	6,436.0	5,902	897	196	1,901	243	29	
4.	22 ส.ค.42-20 ก.ย.42	5,902.0	6,778	20	225	1,276	164	30	
5.	21 ก.ย.42-20 ต.ค.42	5,852.0	4,526	1,347	215	1,042	107	241	
6.	21 ต.ค.42-19 พ.ย.42	6,696.0	6,772	1,270	225	1,578	177	30	
7.	20 พ.ย.42-19 ธ.ค.42	6,266.0	5,419	2,117	235	1,170	269	23	
8.	20 ธ.ค.42-18 ม.ค.43	6,951.0	2,824	6,245	256	918	203	11	
9.	19 ม.ค.43-17 ก.พ.43	6,686.0	6,512	6,419	241	1,143	125	27	
10.	18 ก.พ.43-18 มี.ค.43	6,182.0	7,540	5,061	251	2,202	277	30	
11.	19 มี.ค.43-17 เม.ย.43	6,536.0	7,389	4,207	246	1,597	162	30	
12.	18 เม.ย.43-17 พ.ค.43	3,339.0	5,067	2,480	230	1,332	173	22	
13.	18 พ.ค.43-16 มิ.ย.43	7,557.0	7,225	2,811	240	1,859	306	30	
14.	17 มิ.ย.43-16 ก.ค.43	7,120.0	7,209	2,722	240	2,220	171	30	
15.	17 ก.ค.43-15 ส.ค.43	6,577.0	7,179	2,120	239	1,669	195	30	
16.	16 ส.ค.43-14 ก.ย.43	6,374.0	6,836	1,657	227	1,617	192	30	
17.	15 ก.ย.43-13 พ.ย.43	6,552.0	6,703	1,506	223	1,644	175	30	
18.	14 พ.ย.43-13 พ.ย.43	6,988.0	6,036	2,458	232	1,450	184	26	
19.	14 พ.ย.43-13 ธ.ค.43	5,946.0	4,903	3,502	233	1,045	129	21	
20.	14 ธ.ค.43-12 ม.ค.44	7,379.0	7,584	3,297	252	1,717	146	30	
21.	13 ม.ค.44-11 ก.พ.44	7,591.0	7,638	3,251	254	1,731	181	30	
22.	12 ก.พ.44-13 มี.ค.44	7,356.0	7,683	2,923	256	1,702	140	30	
23.	14 มี.ค.44-12 เม.ย.44	7,068.0	7,819	2,173	260	1,658	173	30	
24.	13 เม.ย.44-12 พ.ค.44	7,064.0	7,798	1,439	259	1,924	149	30	
25.	13 พ.ค.44-11 มิ.ย.44	4,884.0	5,343	981	267	1,155	123	20	
1.	12 มิ.ย.44-2 ก.ค.44	3,654.0	2,268	2,367	162	505	67	14	
1.	3 ก.ค.44-1 ส.ค.44	7,275.0	7,746	1,895	258	1,473	143	30	263
2.	2 ส.ค.44-31 ส.ค.44	7,830.0	7,915	1,811	263	1,622	1,622	30	
3.	1 ก.ย.44-30 ก.ย.44	7,358.0	8,178	991	272	1,745	172	30	
4.	1 ต.ค.44-30 ต.ค.44	7,805.0	7,728	1,068	257	1,783	188	30	
รวม		188,433.6	187,364	1,068	-	43,622	6,600	776	241
		เฉลี่ยร้อยละ	100			23.28	3.52		

ที่มา : กรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย (2544)



รูปที่ 2.8 ระบบเตาเผามูลฝอย

ตารางที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติมูลฝอย

ลำดับที่	รายการ	ผลการวิเคราะห์	
		มูลฝอยสด	มูลฝอยหมัก
1	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	291.0	275.0
2	ความชื้น (%)	51.81	39.99
3	สารที่เผาไหม้ได้ (%โดยน้ำหนัก)	20.17	30.07
4	เถ้า (%)	28.01	29.94
5	Higher Heating Value (แคลอรี/กรัม)	1,025	1,454
6	Lower Heating Value (แคลอรี/กรัม)	714	1,214
7	องค์ประกอบมูลฝอย (%)		
	- กระดาษ	12.51	15.61
	- เศษผ้า	9.04	9.50
	- เศษอาหาร	12.12	11.92
	- เศษไม้	15.10	15.39
	- พลาสติก	10.02	10.60
	- ยาง/หนัง	2.29	1.59
	- สารที่ไม่เผาไหม้	28.81	26.70
	- อื่น ๆ	10.11	8.67

ที่มา : กรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย (2544)

ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

สารประกอบ	ร้อยละ
Na ₂ O	8.65
MgO	1.58
Al ₂ O ₃	2.68
SiO ₂	3.56
P ₂ O ₅	1.39
SO ₃	5.76
Cl	29.1
K ₂ O	10.10
CaO	34.79
TiO ₂	0.56
MnO	0.04
Fe ₂ O ₃	0.79
CuO	0.05
ZnO	0.60
Br	0.03
Rb	0.02
SrO	0.03
SnO ₂	0.11
PbO	0.15

การทำเสถียรเถ้าลอยขยะ (Chaim J.Poran et al.,1989) จาก ASTM คำนิยามของเถ้าลอยขยะคือ สารปอซโซลาน ปฏิกริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยขึ้นกับปัจจัยดังนี้

1. ปริมาณของวัสดุประสาน (ปูนขาว หรือซีเมนต์)
2. ความชื้น
3. สภาวะแวดล้อม (อุณหภูมิ ปริมาณความชื้นในอากาศ)
4. ความละเอียดของเถ้าลอย
5. ปริมาณคาร์บอนของเถ้าลอยขยะ
6. เวลาในการทำปฏิกริยา

การทำเสถียรด้วยปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดเฉือน และลดความชื้นน้ำของเถ้าลอย

2.10 ถ้ำลอยลิกไนต์

ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้า ได้ถ้ำลอยประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของถ่านหิน สามารถแบ่งถ้ำจากการเผาไหม้ได้เป็น 3 พวก

1. ถ้ำก้อนเตา มีขนาดใหญ่และตกลงกันเตา
2. ถ้ำตะกรัน เป็นถ้ำที่หลอมละลายเกาะเป็นตะกรันที่ผนังของเตาหรือหม้อน้ำ
3. ถ้ำลอย เป็นถ้ำที่มีเม็ดละเอียด โดยที่ถ้ำนี้จะลอยไปพร้อมแก๊สร้อนจากปล่อง แต่จะถูกจับโดยเครื่องจับตะกอนถ้ำ หลังจากนั้นจะถูกนำเข้าไปเก็บในถังเก็บ

ถ้ำลอยลิกไนต์มีขนาดเล็กมากคือมีขนาดตั้งแต่ 0.03 มิลลิเมตร ถึง 0.42 มิลลิเมตร รูปร่างมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลม มีความถ่วงจำเพาะ 2.23 ถึง 2.48 มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3

ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ของถ้ำลอยลิกไนต์ (เอกสารสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำถ้ำลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ ของสำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ของถ้ำลอยลิกไนต์

Month	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
JAN	46.95	26.40	12.04	7.79	2.08	1.83	0.64	2.25
FEB	50.70	24.54	12.11	0.87	1.01	1.97	0.34	2.26
MAR	44.40	22.61	14.27	9.91	1.49	2.01	0.52	3.80
APR	42.87	22.88	16.12	9.80	1.72	2.06	0.50	3.54
MAY	-	-	-	-	-	-	-	-
JUN	40.35	22.94	14.34	12.40	2.63	2.47	1.07	3.52
JUL	40.63	23.70	16.20	11.10	2.60	2.34	0.83	3.60
AUG	39.56	20.47	14.65	15.00	3.09	2.14	1.14	3.94
SEP	38.22	21.23	15.15	14.20	3.16	2.13	1.37	4.85
OCT	37.77	22.30	14.38	14.30	3.27	2.42	1.09	4.43
NOV	41.48	22.04	12.61	13.50	3.05	2.32	0.92	3.80
DEC	43.98	24.95	13.71	9.37	2.34	2.66	0.73	2.26
AVG	42.48	23.10	14.14	11.30	2.40	2.21	0.83	3.48

ที่มา : สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2536)

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบร้อยละของธาตุในถ้ำลอยจากการเผาขยะชุมชน และถ้ำลอยลิกไนต์

สารประกอบ	ถ้ำลอยขยะ	ถ้ำลอยลิกไนต์
Na ₂ O	8.65	0.83
MgO	1.58	2.40
Al ₂ O ₃	2.68	23.10
SiO ₂	3.56	42.48
P ₂ O ₅	1.39	-
SO ₃	5.76	3.48
Cl	29.1	-
K ₂ O	10.10	2.21
CaO	34.79	11.3
TiO ₂	0.56	-
MnO	0.04	-
Fe ₂ O ₃	0.79	14.14
CuO	0.05	-
ZnO	0.60	-
Br	0.03	-
Rb	0.02	-
SrO	0.03	-
SnO ₂	0.11	-
PbO	0.15	-

จากตารางจะพบว่าถ้ำลอยขยะมีส่วนประกอบทางเคมีหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) คลอไรด์ (Cl) โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) และ โซเดียมออกไซด์ (Na₂O) และถ้ำลอยขยะยังมีโลหะหนักหลายชนิด ส่วนถ้ำลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือ SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และไม่พบโลหะหนักในถ้ำลอยลิกไนต์

2.11 การนำซีเมนต์ลอมมาผสมในคอนกรีต

การนำซีเมนต์ลอมมาผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต สามารถทำได้ 3 วิธี ดังนี้

1. การแทนที่ (Replacement Method)

เป็นการผสมซีเมนต์ลอมมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตอาจจะทำได้โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก การแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักจะได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่าการแทนที่ซีเมนต์โดยปริมาตร และเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่ได้จากซีเมนต์ลอมมาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมซีเมนต์ลอมมาแบบแทนที่จะมีแนวโน้มต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากซีเมนต์ลอมมา

2. การผสมเพิ่ม (Adding Method)

การผสมซีเมนต์ลอมมาในคอนกรีตโดยวิธีผสมเพิ่มจะผสมซีเมนต์ลอมมาในคอนกรีตโดยใช้ปริมาณซีเมนต์เท่าเดิม โดยที่การผสมซีเมนต์ลอมมาในซีเมนต์ในลักษณะนี้จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีแต่ซีเมนต์ลอมมา เนื่องจากเป็นการเพิ่มอนุภาคและเนื่องจากปฏิกิริยาปอลิเมอร์ของซีเมนต์ลอมมา

3. การแทนที่และผสมเพิ่ม (Replacement – Addition Method)

เป็นการใช้ซีเมนต์ลอมมาผสมในคอนกรีต โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ลอมมาผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงเพื่อลดราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตให้ถูกลง และเพื่อเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาปอลิเมอร์ในคอนกรีต

2.12 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ยังผลให้เกิดความเหนียวและจับตัวกันแน่นเป็นก้อนแข็ง ออกไซด์ในปูนซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ โดยปฏิกิริยาเกิดดังนี้



* สูตรสตอยคิโอมेटริกที่แสดงไม่ใช่สูตรที่แน่นอน ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิการก่อตัว เป็นต้น

ขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ เมื่อผงซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำจะเกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และ ไดแคลเซียม (C_2S) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วนดังแสดงในสมการ

ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ โดยที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกมาจากแคลเซียมซิลิเกต (CaO.SiO₂) ไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จนสารละลายนั้นอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) หรือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (CaO.SiO₂) ถูกทำปฏิกิริยาจนหมด

ส่วนสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้ง 2 ส่วน ได้แก่

1) แคลเซียมซิลิเกต - ไฮเดรต (Calcium - Silicate - Hydrate, C - S - H) เช่น 3CaO₂SiO₂.3H₂O ซึ่งจัดเป็นวัสดุประสาน มีประมาณร้อยละ 50 - 90 โดยปริมาตร

2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, C - H) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา มีปริมาณร้อยละ 20 - 25 โดยปริมาตร

ความเป็นต่างที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงความจุฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ของซีเมนต์ เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอช (pH) สูงกว่า 11 ผลึกแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่ละลายจะรวมตัวเกิดเป็นโครงสร้างซีเมนต์ (Nevill, 1991)

Shively และคณะ (1986) กล่าวว่าซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) มีความเป็นต่างสูงและมีพื้นผิวเป็นออกซีไฮดรอกไซด์ (Oxyhydroxide) จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกของโลหะแอมโฟเทอริก (Amphoteric Metal) (ซึ่งเป็นโลหะที่สามารถละลายได้ทั้งกรดและเบส) และปฏิกิริยาในการดูดติดผิวโลหะ

2. ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

สารปอซโซลาน หมายถึง วัสดุที่ตัวเองไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานแต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นตัวประสานได้ซึ่งมีสารประกอบหลัก ได้แก่ SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, และ CaO วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C₂S) ที่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึงขีดจำกัดหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการเคมีดังต่อไปนี้



* สูตรสตอยชิโอเมตริกที่แสดงไม่ใช่สูตรที่แน่นอน ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิการก่อตัว เป็นต้น

2.13 เกณฑ์มาตรฐานในการระบุของเสียอันตราย

U.S.EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปฝังกลบโดยวิธีการทดสอบเรียกว่า Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ซึ่งวิธีการทดสอบมีดังนี้

สำหรับของเสียที่มีปริมาณของแข็งน้อยกว่าร้อยละ 0.5 กรองแยกของเหลวออกจากน้ำแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้ว 0.6 – 0.8 ไมครอน นำของเหลวไปวิเคราะห์ และนำสภาพของแข็งไปสกัดสาร

สารสกัดที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่

สารสกัดชนิดแรก เป็นสารสกัดที่ได้จากการเติม 5.7 มิลลิลิตร ของกรดเกลืออะซิติก ลงในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร และเติม 64.3 มิลลิลิตร ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

สารสกัดชนิดที่ 2 เป็นสารสกัดที่ได้จากการทำกรดเกลืออะซิติก 5.7 มิลลิลิตร ให้เจือจางโดยเติมน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร

นำตัวอย่างของเสียชิ้นเล็กๆ 5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร แล้วกวนอย่างแรงเป็นเวลา 5 นาที

ถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดแรก

ถ้าพีเอชมากกว่า 5 เติม 3.5 มิลลิลิตร ของกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล แล้วให้ความร้อน 500°C เป็นเวลา 10 นาที เมื่อทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดแรก ถ้าพีเอชมากกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดที่ 2

นำตัวอย่างประมาณ 100 กรัม และใช้สารสกัดปริมาณ 20 เท่า ของน้ำหนักตัวอย่าง

ถ้ามีสารระเหยง่ายต้องใช้ภาชนะบรรจุพิเศษ เพื่อป้องกันการระเหยของสารมลพิษอินทรีย์

เขย่าด้วยการหมุนรอบ 30 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง

กรองแยกของเหลวออกจากของแข็ง ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว 0.6 – 0.8 ไมครอน นำของเหลวไปวิเคราะห์ค่าสารมลพิษ

ถ้าเป็นไปได้นำของเหลวที่อยู่ในรูปของเสียตอนแรก มาเติมรวมกับน้ำสกัด และทำการวิเคราะห์ของเหลวผสมรวมที่ได้ต่อไป

จากวิธีทดสอบหาปริมาณสารมลพิษในน้ำสกัด ถ้าความเข้มข้นของสารมลพิษที่ได้มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ก็ถือว่าเป็นของเสียอันตราย

2.14 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

Jaggi (1988) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุประสานประเภทวัสดุซีเมนต์ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์แกลบ ผงซีเมนต์ไคนเตา (Cement Klin Dust) ในการทำให้กากของเสียอันตรายคงสภาพโดยการทำให้แข็งตัว กากของเสียอันตรายที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

1. กากของเสียอันตรายจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และโรงงานผลิตแบตเตอรี่ซึ่งมีแคดเมียมและตะกั่วเจือปน
2. กากของเสียอันตรายประเภทสารอินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตยาฆ่าแมลงซึ่งมีสารอัลดริน (Aldrin) เจือปน

เมื่อทำการตรวจวัดค่าอัตราการชะละลายของสารพิษ และค่าความสามารถในการรับแรงอัด เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุประสานแต่ละประเภท ผลสรุปได้ดังนี้

- อัตราการชะละลายจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกากของเสียในก้อนตัวอย่าง และอัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรของก้อนตัวอย่าง แต่จะเป็นอัตราส่วนผกผันกับค่า pH แรกเริ่มของสารละลายที่ใช้ในการสกัดสาร
- ค่าความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น หากใช้ปริมาณสารพิษน้อยลง และจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่าง
- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกากของเสียอินทรีย์ สำหรับกากของเสียอินทรีย์ ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.35
- การใช้ซีเมนต์แกลบผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 1:1 จะทำให้กากของเสียจากโรงงานชุบโลหะคงสภาพได้ดีที่สุด
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้โลหะแคดเมียมละลายน้อยที่สุด
- การใช้ซีเมนต์กันเตาเป็นวัสดุประสาน จะทำให้ค่าการชะละลายต่ำที่สุด และมีความสามารถรับแรงอัดพอเพียงสำหรับการบำบัดกากของเสียจากยาฆ่าแมลง

Shin และ Sujitwatthana (1988) ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของกากของเสียอันตรายในส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (a/v ratio) pH ของสารละลายที่ใช้ในการสกัดสาร และระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างกากของเสียอันตรายที่ทำให้แข็งตัวและคงสภาพโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยทดลองใช้กากของเสียอันตราย 4 ชนิด คือ กากของเสียที่มีแคดเมียม ตะกั่ว อัลดรินและ คลอเดนซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ปริมาณแคลเซียม ตะกั่ว อัลตรีนและ คลอเดน ที่ถูกละลายออกมาเป็นสัดส่วนกับ ปริมาณของเสียที่เติมลงในส่วนผสมของปูนซีเมนต์และทราย
- ค่าความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโลหะหนักลงในส่วนผสมของซีเมนต์และทราย
- อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ 0.5 จะทำให้ค่าการรับแรงอัดของ ก้อนตัวอย่างสูงกว่าเมื่อใช้ W/C ratio ที่ 1.0 และ 0.25
- ค่า a/v ratio จะมีผลต่อการชะละลาย ค่า a/v ratio สูงจะมีการชะละลายสูงขึ้น
- ระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่าง มีผลต่อการชะละลายน้อยมาก แต่จะมีผลทำให้ค่า ความสามารถรับแรงอัดสูงขึ้น ถ้าระยะเวลาในการบ่มนานขึ้น
- การใช้ปูนซีเมนต์และซิลิกาในกระบวนการทำให้แข็งตัวและคงสภาพ เหมาะสำหรับ กากของเสียที่มีโลหะหนักมากกว่าของเสียประเภทสารอินทรีย์ จำพวยกายาฆ่าแมลง

Poran (1989) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของเถ้าลอยขยะเพื่อหาความเป็นไปได้ใน การนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุในการทำพื้นถนน หรือใช้ในงานก่อสร้างโดยการทำให้เถ้าลอย ขยะด้วยซีเมนต์ และปูนขาว โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่น ความ ชีมน้ำ กำลังรับแรงเฉือน และแคริฟอเนี่ย แบริง เรโซ (California bearing ratio) ซึ่งสรุปผลการ ทดลองได้ดังนี้

- ความหนาแน่นของเถ้าลอยแข็งมีค่าต่ำกว่าวัสดุเดิมที่ใช้อยู่
- การทำให้เถ้าลอยด้วยปูนขาวมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการทำให้เถ้าลอยด้วยซีเมนต์และเป็น สาเหตุของการบวม
- การทำให้เถ้าลอยด้วยซีเมนต์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างได้
- การทำให้เถ้าลอยขยะทำให้ค่าความชื้นน้ำต่ำลง

Youn (1990) ได้ทำการศึกษาวิจัยการทำให้ตะกอนของเสียจากห้องทดลอง (ส่วนใหญ่ เป็นของเสียจากน้ำเสีย COD) ให้เป็นก้อนแข็ง โดยใช้วัสดุประเภทซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ W/C ratio ที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาว ผสมซีเมนต์แก่กลบ ซึ่งให้ค่าการรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ
- เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนซีเมนต์จะทำให้ค่าการรับแรงอัดต่ำลง ในทางตรงกัน ข้าม เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ จะมีแนวโน้มให้ค่าการรับแรง อัดสูง

- เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์
แกลบ ค่าการชะละลายจะมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ปูนขาวผสมซีเมนต์แกลบจะให้ค่าการชะ
ละลายน้ำน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก
- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) จะมีผลต่อการรับแรงอัด โดยที่ค่า W/C ratio เพิ่ม
ขึ้น จะทำให้ค่าการรับแรงอัดลดลงทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แกลบ
- ค่าการรับแรงรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะสูงขึ้น ตามเวลาการบ่มก่อนตัว
อย่างในทางตรงข้าม เมื่อใช้ปูนขาวผสมซีเมนต์แกลบ จะทำให้ค่าการรับแรงอัดสูงขึ้นใน
ช่วงแรก ของการบ่มตัวอย่าง (ประมาณ 7 วัน) หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง
- ค่าการชะละลาย มีค่าลดลงเมื่อทำการบ่มก่อนตัวอย่างนานขึ้น ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ต
แลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แกลบ

Rijal (1990) ได้ทำการศึกษาในการทำให้ตะกอนน้ำเสียจากห้องทดลองแข็งตัวและคง
สภาพ ไม่มีการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก (Cr และ Zn) โดยการใช้วัสดุประเภทซีเมนต์เป็นวัสดุ
ประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับซีเมนต์แกลบ (อัตรา
ส่วน 1:1) โดยทำการผสมตะกอนกับวัสดุประสานผสมทราย (1:2) ที่ส่วนผสมต่างๆ กัน ในอัตรา
ส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเท่ากับ 0.65 สำหรับปูนซีเมนต์ผสม
ซีเมนต์แกลบ

การประเมินประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักไว้ในก้อนตัวอย่างของวัสดุประสานแต่ละ
ชนิด จะทำการสอบค่าอัตราการชะละลาย และค่าความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนตัว
อย่างที่ตัวแปรต่างๆ ผลสรุปได้ดังนี้

- ค่าความสามารถรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง จะลดลงตามปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นใน
ส่วนผสม
- ค่าอัตราการชะละลายจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสาน
- การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน จะทำให้อ่อนตัวอย่างมีความสามารถ
รับแรงอัดได้สูงกว่าใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบทุกตัวอย่าง
- ค่าอัตราการชะละลายของโครเมียมในก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะต่ำ
กว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบ ที่อัตราส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสานต่ำกว่า
0.2 แต่ที่อัตราส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสานสูงกว่า 0.5 ตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ต
แลนด์เป็นวัสดุประสาน จะให้ค่าการชะละลายโครเมียมสูงกว่า

Leangon (1993) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาหาวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนของกากตะกอน จากโรงงานฟอกหนัง และกากตะกอนจากโรงงานเคมีคอนกรีต โดยกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนังจะมีโครเมียม และสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนกากตะกอนจากโรงงานเคมีคอนกรีตประกอบด้วย ทองแดง ตะกั่วและดีบุก วัสดุประสาน 5 ชนิด ที่นำมาใช้ทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เถ้าจากแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และซิลิกาฟูม จากการทดสอบกระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสานผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนของเสียที่แข็งตัว อาทิ กำลังรับแรงอัด การชะละลายและค่าใช้จ่ายในการกำจัด พบว่าวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกำจัดกากตะกอนดังกล่าวมีดังนี้

	ปูนซีเมนต์	เถ้าจากแกลบ	เถ้าลอยลิกไนต์
1. กากตะกอนจากโรงฟอกหนัง	0.7	0.2	0.1
2. กากตะกอนจากโรงงาน เคมีคอนกรีต	0.7	0.1	0.2

โดยสามารถกำจัดกากตะกอนได้สูงสุดในอัตราส่วน กากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 และ 1.37 ตามลำดับ

Tay (1993) ได้ศึกษาการชะละลายของเถ้าลอยที่ได้จากการเผาขยะชุมชนโดยนำมาทำการทำเสถียรโดยปูนขาว และซีเมนต์ ในอัตราส่วนของเถ้าลอยและวัสดุประสานที่เท่าๆ กัน โดยนำเถ้าลอยหรือเถ้าลอยที่ผ่านการทำเสถียรมาบรรจุลงในคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร มีชั้นความสูง 10 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร วางประกบผิวด้านบนและด้านล่างของเถ้าลอยตามลำดับ และทดลองให้น้ำประปาไหลผ่าน โดยรักษาระดับเฮด 20 เซนติเมตร เหนือผิวระบายชั้นบน กำหนดอัตราไหลออกจากคอลัมน์ 50 ลิตรต่อวัน เป็นเวลา 3 เดือน ผลการทดลองสรุปว่าเถ้าลอยที่ผ่านการทำเสถียรด้วยปูนขาวหรือปูนซีเมนต์มีความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำชะละลายต่ำกว่าค่าที่เครื่องสามารถตรวจวัดได้ แสดงว่าปูนซีเมนต์และปูนขาวมีประสิทธิภาพสูงในการทำเสถียรเถ้าลอย และเถ้าลอยจากการเผาขยะชุมชนมีคุณสมบัติเป็นวัสดุผสมเพิ่ม (Fill material) ได้

นฤมิตร (2538) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก จาก การบำบัดน้ำเสียซีไอดี โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์จะทำให้ตะกอนโลหะหนักมีคุณสมบัติทางกายภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แต่ปรอทมีการชะละลายออกมาค่อนข้างสูงจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสารพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

กรรมโครเมียมและเหล็กมีการชะละลายออกมาเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ได้ดีกว่าซีเมนต์ล้วน

อนุวัฒน์ (2539) ศึกษาการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี โดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปในตะกอนก่อนนำไปทำให้เป็นก้อนโดยปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยลิกไนต์ แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ความชื้นได้ของน้ำ และการชะละลายเพื่อหาความเข้มข้นของโครเมียม ปรอท และเหล็ก ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการทำเสถียรของโครเมียมและเหล็กมีค่าเท่ากับ 60.01 และ 91.40% ที่สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่า ตามลำดับ และที่สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ 3.0 เท่า มีประสิทธิภาพเท่ากับ 94.0 และ 99.49%

ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนผสมของตะกอนตัวประสานเท่ากับ 0.25 การประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดสำหรับการเติมโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 และ 3.0 เท่า มีค่าเท่ากับ 5,000 และ 5,790 หากไม่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์เลย ค่าใช้จ่ายประมาณ 3,900 บาท ต่อตันของตะกอน แต่ความเข้มข้นของปรอทสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

กาญจนา (2542) ศึกษาเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลจากการชุบโลหะจากโรงงานผลิตแท่งโดยใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน และการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน ทำการทดลองหาอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนที่เหมาะสมในการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน โดยพิจารณาสมบัติทางกายภาพของตัวอย่าง ได้แก่ กำลังรับแรงอัด และประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะนิกเกิล ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียร ได้แก่ อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนเป็น 0.5 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.75 ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนคือ ที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.75 และปูนขาวต่อเถ้าลอยเป็น 1.0 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.6 เมื่อแปรค่าระยะเวลาพบว่า ระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นไม่ช่วยให้สมบัติทางกายภาพรวมถึงการลดการชะละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะนิกเกิลในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน เป็น 97.04% และ 63.46% ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการเสถียรด้วยปูนขาวการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมลิกไนต์ และหากใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน คือ 2,500 1,903 และ 833 บาทต่อตันตามลำดับ

Inthasaro (2002) ศึกษาการนำเถ้าลอยจากเตาเผามูลฝอยชุมชนจังหวัดภูเก็ตมาใช้ทดแทนซีเมนต์บางส่วน โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และทางแร่ของเถ้าลอย เมื่อทำการผสมเถ้าลอยแทนที่ในซีเมนต์มอร์ตาร์ ทำการทดสอบค่าความต้องการน้ำ ระยะเวลาก่อตัว และการพัฒนาแรงอัด รวมทั้งทดสอบลักษณะน้ำชะละลายจากก้อนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้า

ลอย ผลการทดสอบคุณสมบัติเถ้าลอยเตาเผามูลฝอยชุมชน ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอชโซลานตามข้อกำหนด ASTM C618 เมื่อนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ทำให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาลดลง ความต้องการน้ำและระยะก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีเมนต์มอร์ตารธรรมดา และเมื่อทำการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ที่สัดส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 15 และ 25 และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาทเท่ากับ ร้อยละ 92.7 90.9 และ 70.0 ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายทั้งจากเถ้าลอยและจากก้อนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- ตะกอนโลหะหนัก : จากการตกตะกอนของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานแห่งหนึ่งในสวนอุตสาหกรรมบางกะดี
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)
- ไม้ลอยขยะ
- น้ำประปา

2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- กรดซัลฟูริก
- กรดไนตริก
- น้ำกลั่น

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการหา Optimum moisture content

- mold เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว พร้อมด้วย Collar สูง 2.5 นิ้ว
- hammer เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ขนาด 5.5 ปอนด์
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 4
- ค้อนยาง, แปรงอ่อนใช้ปิดวัสดุ
- ช้อนตัก
- บรทัดเหล็กปาด
- ถาดผสม
- ตาชั่ง ชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม
- ตาชั่ง ชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม
- เต้าอบดินอุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส
- เครื่องดันตัวอย่างออกจาก mold
- กระบอกตวง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ สำหรับการทำให้เป็นก้อน

- เครื่องชั่ง 2,000 กรัม อ่านได้ละเอียด 0.2 กรัม
- กระจกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร อ่านได้ละเอียด 10 มิลลิลิตร
- แบบหล่อขนาดลูกบาศก์ 2 นิ้ว หรือ 50 มิลลิลิตร
- เครื่องผสมหรือแผ่นกระจกสำหรับผสมด้วยมือ
- Tamper ขนาดหน้าตัด $\frac{1}{2} \times 1$ นิ้ว มีความยาว 5-6 นิ้ว ปลายตัดเรียบและหน้าตัดตั้งฉากกับแกนของมือจับซึ่งทำจากวัสดุไม่ดูดซึมน้ำ
- เกรียงพลาสติกขนาดหน้ากว้างของใบ 4-6 นิ้ว

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำให้เป็นก้อนและการทดสอบกำลังอัด

- แบบสำหรับอัดมาตรฐาน (Standard Mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีปริมาตร $1/3 \pm 0.004$ ลบ.ฟุต มีปลอก (Collar) ขนาดเดียวกันสูง 2.5 นิ้ว และมีแผ่นรองที่มีหลักยึดให้ติดกับแบบเวลาทำการบดอัด
- เครื่องตอก (Hammer) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ขนาด 5.5 ปอนด์
- เครื่องดันตัวอย่าง (Sample Extruder)
- เหล็กปาด (Straightedge)
- ตาชั่ง : แบบชั่งได้สูงสุด 15 กก. ชั่งได้ละเอียดถึง 0.1 กก. และแบบชั่งได้สูงสุด 1000 กรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
- เครื่องมือที่ใช้สำหรับผสม
- เตาอบควบคุมอุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
- กระจกตวงสำหรับวัดปริมาณน้ำที่ใช้ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Testing Machine)

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการชะละลาย

- ตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร
- ขวดพลาสติกขนาด 2 ลิตร
- เครื่องชั่งขนาด 2 กิโลกรัม
- กระจกตวงขนาด 2 ลิตร
- เครื่องเขย่าแบบหมุน 30 รอบ/นาที
- กระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6-0.8 ไมครอน พร้อมชุดกรองแบบปั๊มสุญญากาศ

- เครื่องวัดพีเอช
 - เครื่องวัดความนำไฟฟ้า
 - เครื่องย่อยสลายตัวอย่างโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester)
 - เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
4. ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง
- อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน และ อัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
 - อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
 - ระยะเวลาการบ่มตัว

3.2 การดำเนินการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น

การทดลองเบื้องต้น : ทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

1. ส่วนประกอบทางเคมี: เถ้าลอยและกากตะกอนโลหะหนัก ทดสอบหาโดยวิธีวิเคราะห์ X-ray Fluorescence Spectrometry และใช้วิธีการย่อย (Digestion) โดยใช้กรดซัลฟูริก ย่อยสลายตัวอย่างตะกอน แล้วหาส่วนประกอบของโลหะหนักต่างๆ ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว ปะรอท อาร์เซนิก และเงิน เพื่อหาชนิดของโลหะหนักที่มีโอกาสปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม
2. ความละเอียด: เถ้าลอยขยะ และตะกอนโลหะหนัก โดยใช้เครื่อง Particle size analyzer .
3. ความถ่วงจำเพาะ : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ เถ้าลอยขยะ หาโดยการแทนที่น้ำ มันก้าดตามมาตรฐาน ASTM C 188-95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 1 หา Optimum Moisture Content ของเถ้าลอย และกากตะกอนโลหะหนัก

วิธีการทดลอง

1. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของ mold พร้อมทั้งคำนวณหาปริมาตรของ mold
2. ชั่งน้ำหนักของ mold ให้ได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
3. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เตรียมไว้มาอย่างน้อย 4 กิโลกรัม ผสมน้ำลงไป 4% คลุกเคล้ากันให้ทั่วจนได้ความชื้นของตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งหมด
4. ตักตัวอย่างใส่ mold ที่ประกอบ Collar และ base plate แล้วกะแบ่งปริมาตรของตัวอย่างที่ใส่ให้ได้จำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน เมื่อ compact เสร็จแล้ว ชั้นสุดท้ายให้เหลือพื้นที่บนของ mold เล็กน้อยประมาณ 1-2 เซนติเมตร
5. ใช้ hammer ขนาด 5.5 ปอนด์ compact ตัวอย่างใน mold ในแต่ละชั้นๆ ละ 25 ครั้ง และต้องพยายาม compact ให้ได้ความหนาแน่นของตัวอย่างในแต่ละชั้นสม่ำเสมอเท่ากันตลอด โดยขณะ compact ตัว mold จะต้องวางบนพื้นคอนกรีตที่เรียบและแข็ง
6. เมื่อ compact ครบจำนวนครั้งแล้วถอด collar ของ mold ออกใช้บรรทัดเหล็กปาดส่วนที่สูงเกินปาก mold ออก ใช้แปรงปัดทำความสะอาดตัวอย่างที่ค้างอยู่นอก mold แล้วถอด base plate ออกนำไปชั่งน้ำหนักตัวอย่างใน mold ให้ได้ความละเอียดถึง 0.1 กรัม
7. ดันตัวอย่างออกจาก mold แล้วผ่ากลางตามแนวตั้งเก็บตัวอย่างตามแนวผานี้อย่างน้อย 100 กรัม ไปชั่งน้ำหนักและเข้าเตาอบเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้น
8. เอาตัวอย่างที่เหลือมาทุบให้ร่วนและผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แล้วผสมน้ำเพิ่มอีกประมาณ 3 % และคลุกเคล้ากันให้ทั่วสม่ำเสมอแล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4-7 อีกจนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างใน mold ที่ชั่งได้ครั้งสุดท้ายลดลง
9. หาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Water content) และ Dry density โดยการนำค่า Dry density มา plot ในแกนตั้ง และ Water content (%) plot ในแนวแกนนอน
10. หาค่า Optimum Moisture Content จาก curve ในข้อ 9

การทดลองที่ 2 การศึกษาหาอัตราส่วนวัสดุประสานที่เหมาะสมในการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยขยะเป็นวัสดุประสาน มีตัวแปรคือ อัตราส่วนวัสดุประสาน และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน เปลี่ยนค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุคำนวณจากค่า Optimum Moisture Content ที่ได้จากการทดลองที่ 1 และนำมารวมกับปริมาณ Optimum Moisture Content ของปูนซีเมนต์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.485 แบบถ่วงน้ำหนัก และใช้เวลาในการบ่มเท่ากับ 7 วัน ซึ่งอัตราส่วนผสมแสดงได้ดังนี้

อัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อ ซีเมนต์ (FA/OPC)	อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B)					
	0.0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
0						
1:3						
1:1						
3:1						

การทดสอบประกอบด้วย

1. การหล่อก้อนตัวอย่าง
2. การทดสอบการชะละลาย

ขั้นตอนการทดสอบแสดงในภาคผนวก ก-1 และ ก-3 (ทำการหล่อก้อนตัวอย่าง 3 ก้อนในแต่ละอัตราส่วนผสม จำนวนตัวอย่าง 72 ตัวอย่าง)

การทดลองที่ 3 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาบ่ม โดยใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนที่เหมาะสม จากการทดลองที่ 2 แล้วแปรค่าเวลาบ่มดังนี้

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	3	7	14	28
ผลการทดสอบ				
- การชะละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)				
- กำลังรับแรงอัด(กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)				
- ความหนาแน่น (ตัน/ลูกบาศก์เมตร)				

การทดสอบประกอบด้วย

1. การทดสอบหากล้างอัด
2. การทดสอบการชะละลาย
3. วัดค่าความหนาแน่นของตัวอย่างโดยการชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างและหารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่าง

ขั้นตอนการทดสอบแสดงในภาคผนวก ก-2 และ ก-3 (ทำการหล่อก้อนตัวอย่าง 3 ก้อนในแต่ละอัตราส่วนผสม จำนวนตัวอย่าง 12 ตัวอย่าง)

3.3 การหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะหนัก และประมาณค่าใช้จ่ายในการทำก้อน และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทำก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นวัสดุประสาน กับค่าใช้จ่ายในการจ้างบำบัดกากตะกอน

- การหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะหนัก การทดสอบประกอบด้วย

1. การหล่อก้อนตัวอย่างและทดสอบกำลังรับแรงอัด
2. การทดสอบการชะละลาย

ขั้นตอนการทดสอบแสดงในภาคผนวก ผ1 และ ผ2

- การประมาณค่าใช้จ่ายในการทำกากตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนต่อปริมาณกากตะกอนโลหะหนักโดยมีค่าใช้จ่ายดังต่อไปนี้

1. ค่าใช้จ่ายในการทำก้อน
2. ค่าขนส่งไปยังหลุมฝังกลบ
3. ค่าฝังกลบ

- เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทำก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นวัสดุประสาน กับค่าใช้จ่ายในการจ้างบำบัดกากตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) กากตะกอนโลหะหนัก



ข) ภาพถ่ายจากเตาเผาขยะชุมชน

รูปที่ 3.1 ภาพแสดงวัสดุผสมต่าง ๆ



รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำให้เป็นก้อน



รูปที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับหาค่า Optimum moisture content



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 3.4 ภาพแสดงอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

- ก) เครื่องดันตัวอย่าง
- ข) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด
- ค) เครื่องเขย่าแบบหมุน
- ง) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล



รูปที่ 3.5 เครื่อง Particle size analyzer



รูปที่ 3.6 เครื่องย่อยสลายตัวอย่างโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 สมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

ทำการศึกษาร่องรอยประกอบทางเคมี การชะละลายโดยวิธีสกัดตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และลักษณะสมบัติทางกายภาพของกากตะกอน และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ผลการศึกษาลักษณะสมบัติต่าง ๆ เป็นดังนี้

4.1.1 กากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอนโลหะหนักที่นำมาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ได้จากการตกตะกอนของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ของโรงงานแห่งหนึ่งในสวนอุตสาหกรรมบางกระดี

4.1.1.1 สมบัติทางด้านเคมี

วิเคราะห์หาปริมาณตะกอนโลหะหนักในตะกอน 2 วิธี คือการหาองค์ประกอบของกากตะกอนโดยวิธีวิเคราะห์ X-ray fluorescence (XRF) Spectrometry และหาองค์ประกอบของกากตะกอนโดยการย่อยด้วยกรดตามวิธีของ U.S.EPA

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน วิธีวิเคราะห์ X-ray fluorescence (XRF) Spectrometry จะอยู่ในรูปออกไซด์ของธาตุ ซึ่งแสดงค่าดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนด้วยเครื่อง X-ray fluorescence Spectrometry (XRF)

องค์ประกอบ	ปริมาณ , % โดยน้ำหนัก
CuO	1.49
PbO	4.16
ZnO	4.74
NiO	0.03
As ₂ O ₃	N.D.
Ag ₂ O	N.D.
CdO	N.D.
HgO	N.D.

** N.D. = Not Detected

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน โดยวิธีย่อยด้วยกรดเข้มข้น ตามมาตรฐาน U.S.EPA แสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการย่อยกากตะกอนด้วยกรดเข้มข้น พบว่ามีโลหะหนัก 3 ชนิดที่พบในปริมาณสูงคือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ปริมาณ 20.72 15.02 และ 41.49 มิลลิกรัมต่อกรัมกากตะกอน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตะกอน โดยวิธีการย่อยด้วยกรดเข้มข้น

ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ก.)
ตะกั่ว	20.72
ทองแดง	15.02
สังกะสี	41.49

4.1.1.2 สมบัติของน้ำสกัด

นำกากตะกอนมาผ่านการชะละลาย ตามวิธีการสกัดสารของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 เพื่อหาปริมาณโลหะหนัก ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดมีค่าเท่ากับ 28.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 (ของเสียที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว ในน้ำสกัดจากของเสียนั้นสูงกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จัดเป็นของเสียอันตราย) จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า กากตะกอนจัดเป็นของเสียอันตรายที่ต้องบำบัดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน โดยวิธีการชะละลาย

ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล.)	เกณฑ์มาตรฐาน (มก./ล.)*
ตะกั่ว	28.7	5
ทองแดง	7.49	-
สังกะสี	29.4	-

* เกณฑ์มาตรฐานปริมาณโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540

4.1.1.3 สมบัติทางกายภาพ

จากการสังเกตลักษณะภายนอกของกากตะกอน พบว่า เป็นตะกอนสีน้ำตาลอ่อนและมีเกร็ดโลหะรวมอยู่ด้วย ส่วนลักษณะสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ เป็นดังนี้

1. ความละเอียด

การกระจายขนาดคละของตะกอนโลหะ ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Particle size Analyzer ได้ผลตามตารางที่ 4.4 รูปที่ ๘.4 ในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.4 ผลของค่าเฉลี่ยและค่า Uniformity Coefficient ของตะกอนโลหะ

คุณสมบัติ	ตะกอนโลหะ
ค่าเฉลี่ย (D_{50}) ,ไมโครเมตร	117.371
Uniformity Coefficient	0.676

2. ค่า Optimum moisture content

ค่า Optimum moisture content ของตะกอนโลหะหนัก ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1157-91 ได้ค่า Optimum moisture content ของตะกอนโลหะหนักมีค่าเท่ากับ 0.40

4.1.2 แ่้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

แ่้าลอยที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้จากเตาเผาขยะชุมชนของจังหวัดภูเก็ต

4.1.2.1 สมบัติทางด้านเคมี

วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของแ่้าลอย 2 วิธี คือการหาองค์ประกอบของแ่้าลอยโดยวิธีวิเคราะห์ X-ray fluorescence Spectrometry (XRF) และหาองค์ประกอบของแ่้าลอยโดยการย่อยด้วยกรดตามวิธีของ U.S.EPA

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของแ่้าลอย วิธีวิเคราะห์ X-ray fluorescence Spectrometry (XRF) จะอยู่ในรูปออกไซด์ของธาตุ ซึ่งแสดงค่าดังตาราง 4.5

การหาส่วนประกอบโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometry ของแ่้าลอยเปรียบเทียบกับแ่้าลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นการศึกษาของ สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2536) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532) แสดงในตารางที่ 4.5

ผลรวมของสารประกอบออกไซด์ อลูมิเนียม เหล็ก และซิลิกา ($Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2$) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แ่้าลอยลิกไนต์ และแ่้าลอยขยะ เท่ากับร้อยละ 28.54 79.72 และ 7.03 โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบกับการแบ่งชั้นคุณภาพของ

วัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 96 ตามตารางที่ 4.6 พบว่าเถ้าลอยขยะ
ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ส่วนเถ้าลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน

ตารางที่ 4.5 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยลิกไนต์ และเถ้าลอยขยะ

ลำดับที่	สารประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยขยะ
1	Al ₂ O ₃	5.42	23.10	2.68
2	CaO	63.82	11.30	34.79
3	CuO	-	-	0.05
4	Fe ₂ O ₃	2.92	14.14	0.79
5	K ₂ O	0.46	2.21	10.10
6	MgO	1.50	2.40	1.58
7	MnO	-	-	0.04
8	Na ₂ O	0.26	0.83	8.65
9	PbO	-	-	0.15
10	SiO ₂	20.2	42.48	3.56
11	SnO ₂	-	-	0.11
12	SrO	-	-	0.03
13	TiO ₂	-	-	0.56
14	ZnO	-	-	0.60
15	SO ₃	2.55	3.48	5.76
16	P ₂ O ₅	-	-	1.39
17	Cl	-	-	29.10
18	Rb	-	-	0.02
19	Br	-	-	0.03
	รวม	97.13	99.94	99.99

หมายเหตุ :

- 1) ผลการวิเคราะห์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นข้อมูลจาก อุดม หงษ์ประทานพร (2532)
- 2) ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ เป็นข้อมูลจาก สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2536)
- 3) “-“ ไม่มีข้อมูลจากการวิจัย

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วลอยลิกไนต์ และ แก้วลอยขยะ (ASTM C 618-96)

คุณสมบัติ	Class N	Class F	Class C	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	แก้วลอย ลิกไนต์	แก้วลอย ขยะ
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ % ต่ำสุด	70.0	70.0	50.0	28.54	79.72	7.03
SO ₃ % สูงสุด	4.0	5.0	5.0	2.55	3.48	5.76
Moisture Content % สูงสุด	3.0	3.0	3.0	-	-	-
LOI % สูงสุด	10.0	6.0	6.0	-	-	-

หมายเหตุ :

- 1) ผลการวิเคราะห์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นข้อมูลจาก อุดม หงษ์ประทานพร (2532)
- 2) ผลการวิเคราะห์แก้วลอยลิกไนต์ เป็นข้อมูลจาก สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2536)
- 3) “-“ ไม่มีข้อมูลจากการวิจัย

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย โดยวิธีย่อยด้วยกรดเข้มข้น ตามมาตรฐาน U.S.EPA เพื่อหาปริมาณ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในแก้วลอย โดยวิธีการย่อยด้วยกรดเข้มข้น

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ก.)
ตะกั่ว	1.20
สังกะสี	1.60
ทองแดง	0.40

4.1.2.2 สมบัติน้ำสกัด

นำแก้วลอยมาทำการชะละลาย ตามวิธีการสกัดสารของกรมโรงงาน อุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 เพื่อหาปริมาณโลหะหนัก ผลการศึกษานี้แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยขยะโดยวิธีการชะละลาย

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล.)	ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (มก./ล.)
ตะกั่ว	2.23	5
สังกะสี	2.94	-
ทองแดง	0.69	-

4.1.2.3 สมบัติทางกายภาพ

1. ค่าความละเอียดของถ้ำลอย

การกระจายขนาดคละของตะกอนโลหะ ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Particle size Analyzer ได้ผลตามตารางที่ 4.9 รูปที่ ๘.5 ในภาคผนวก ข. พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคถ้ำลอยมีขนาดอนุภาค 10 –1,000 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.9 ผลของค่าเฉลี่ยและค่า Uniformity Coefficient ของถ้ำลอยขยะ

คุณสมบัติ	ถ้ำลอยขยะ
ค่าเฉลี่ย (D50) , ไมโครเมตร	68.22
Uniformity Coefficient	0.67

2. ค่าความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะ (Bulk gravity) ของถ้ำลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หาโดยวิธีแทนที่ในน้ำมันก๊าดตามมาตรฐาน ASTM C 188-95 เปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะของถ้ำลอยลิกไนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าสูงกว่าถ้ำลอยลิกไนต์และถ้ำลอยขยะ ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของถ้ำลอยขยะ จะส่งผลต่อความหนาแน่นของก้อนตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.10 ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าลอยขยะ และ กากตะกอนโลหะหนัก

ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.12
เถ้าลอยลิกไนต์	2.48
เถ้าลอยขยะ	2.40
กากตะกอนโลหะหนัก	2.63

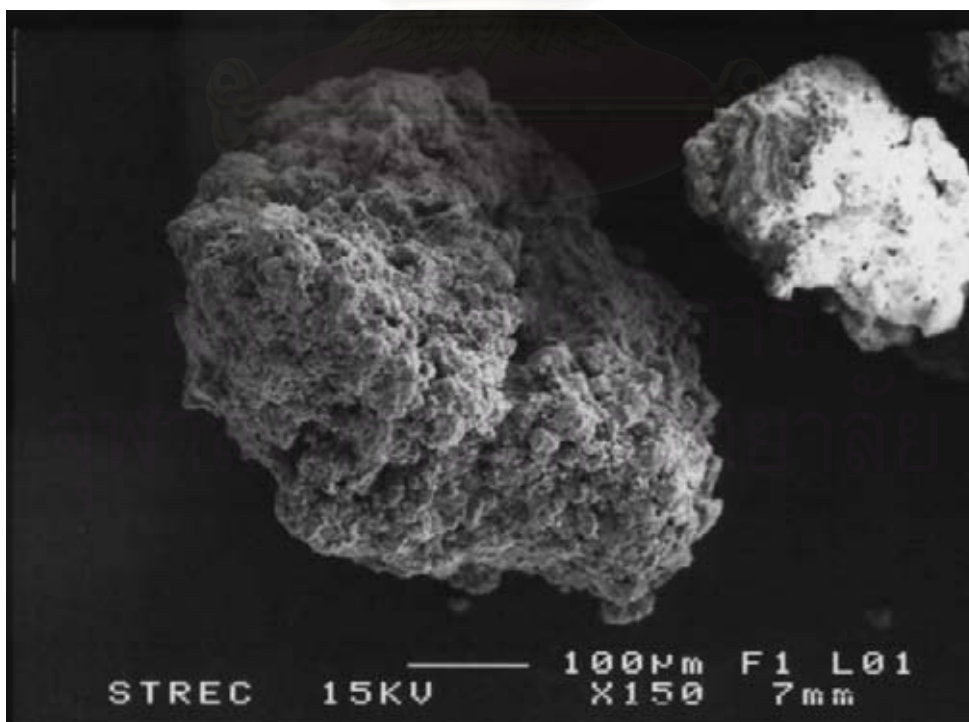
หมายเหตุ

ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ เป็นข้อมูลจาก สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้า ฝายผลิตแห่งประเทศไทย (2536)

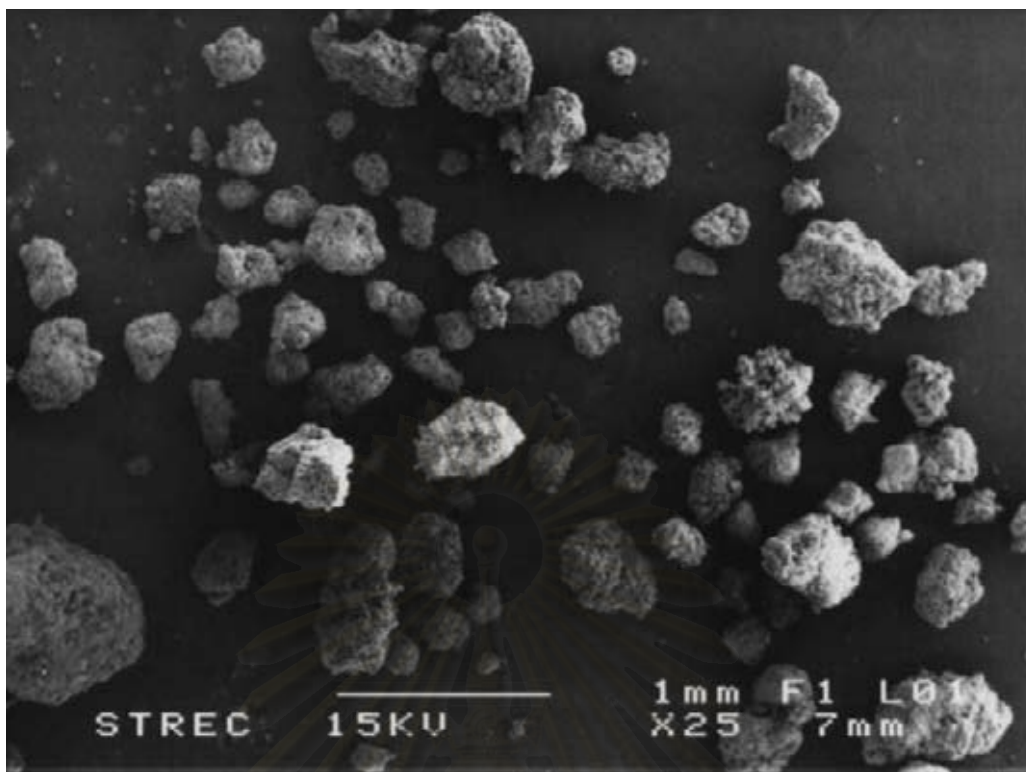
3. ค่า Optimum moisture content ของเถ้าลอยขยะ

ค่า Optimum moisture content ของเถ้าลอยขยะ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1157-91 ได้ค่า Optimum moisture content ของตะกอนโลหะหนักมีค่าเท่ากับ 0.372

4. ลักษณะอนุภาค



ก) ภาพเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่กำลังขยาย 150 เท่า



ข) ภาพเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่กำลังขยาย 25 เท่า

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เพื่อสังเกตลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอยขยะ ดังรูปที่ 4.1 ก) และ ข) แสดงลักษณะอนุภาคเถ้าลอยที่กำลังขยาย 150 และ 25 เท่า พบว่าเถ้าลอยมีรูปร่างไม่แน่นอน มีลักษณะผิวพรุนคล้ายกับอนุภาคเล็กจำนวนมากมาจับตัวกันเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ปูนขาวแห้ง (CaO) ที่ถูกพ่นไปรวมกับละอองฝุ่นร้อน (Flue gas) เพื่อจับก๊าซพิษและถูกทำให้ไม่ฟุ้งกระจายระหว่างการขนส่งด้วยกระบวนการทำให้เปียกด้วยน้ำ ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนและเมื่อน้ำระเหยจนทำให้เกิดรูพรุนดังกล่าว

4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนวัสดุประสานที่เหมาะสม

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์ของตะกอนโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยขยะ มีตัวแปรคือ อัตราส่วนวัสดุประสาน และอัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสาน โดยแปรค่าอัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (FA/OPC) ตั้งแต่ 0 - 3 และแปรค่าอัตราส่วนตะกอน ต่อวัสดุประสาน (S/B) ตั้งแต่ 0 - 1.25 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานขึ้นกับค่า optimum moisture content ของส่วนผสม โดยมีระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7 วันหลังจากที่ทำการบ่มจนครบกำหนดแล้ว นำตัวอย่างนี้ไปทดสอบการชะละลาย จากนั้นนำผล

การทดลองไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และนำไปหาประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ของตะกอนโลหะหนัก เพื่อนำไปเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการทดลองต่อไป การทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.2.1 การทดสอบการชะละลายของตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

การทดสอบการชะละลายก้อนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนในทุกสัดส่วน ทำตามมาตรฐานการทดสอบการชะละลายของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดแสดงดังตาราง 4.11 4.12 และ 4.13

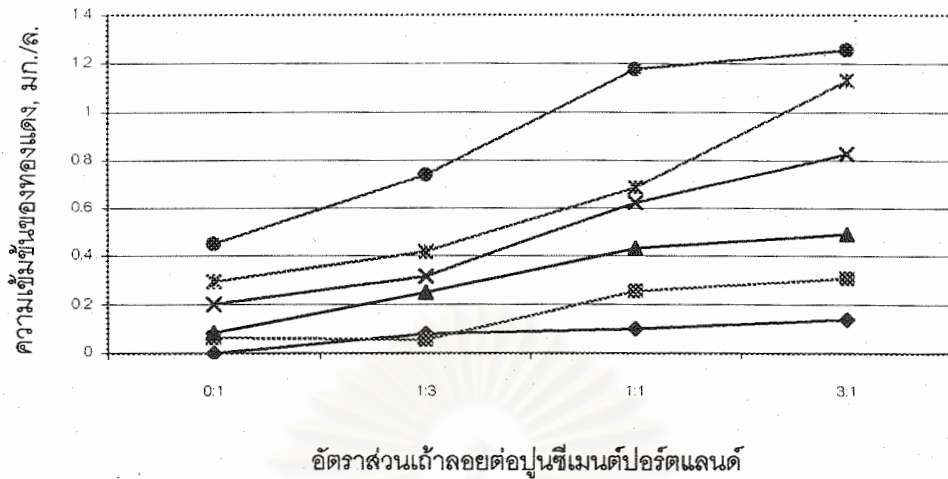
4.2.1.1 ค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

ตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.2 แสดงผลของปริมาณทองแดงในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำสกัดมีค่าระหว่าง 0.064 – 1.256 มิลลิกรัมต่อลิตร

การใช้วัสดุประสานในปริมาณคงที่ พบว่า น้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่างที่เกิดจากวัสดุประสานที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว จะมีค่าความเข้มข้นของทองแดงน้อยที่สุด และความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของแฉะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มมากขึ้น และทุกอัตราส่วน S/B ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ปริมาณทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.11 ปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (มก./ล.)

อัตราส่วนแฉะต่อปูนซีเมนต์ (FA/OPC)	อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B)					
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
0:1	0.000	0.064	0.085	0.203	0.294	0.449
1:3	0.080	0.055	0.251	0.316	0.417	0.738
1:1	0.100	0.255	0.431	0.621	0.685	1.177
3:1	0.141	0.309	0.49	0.825	1.130	1.256



S/B = 0
 S/B = 0.25
 S/B = 0.50
 S/B = 0.75
 S/B = 1.0
 S/B = 1.25

รูปที่ 4.2 ปริมาณทองแดงในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

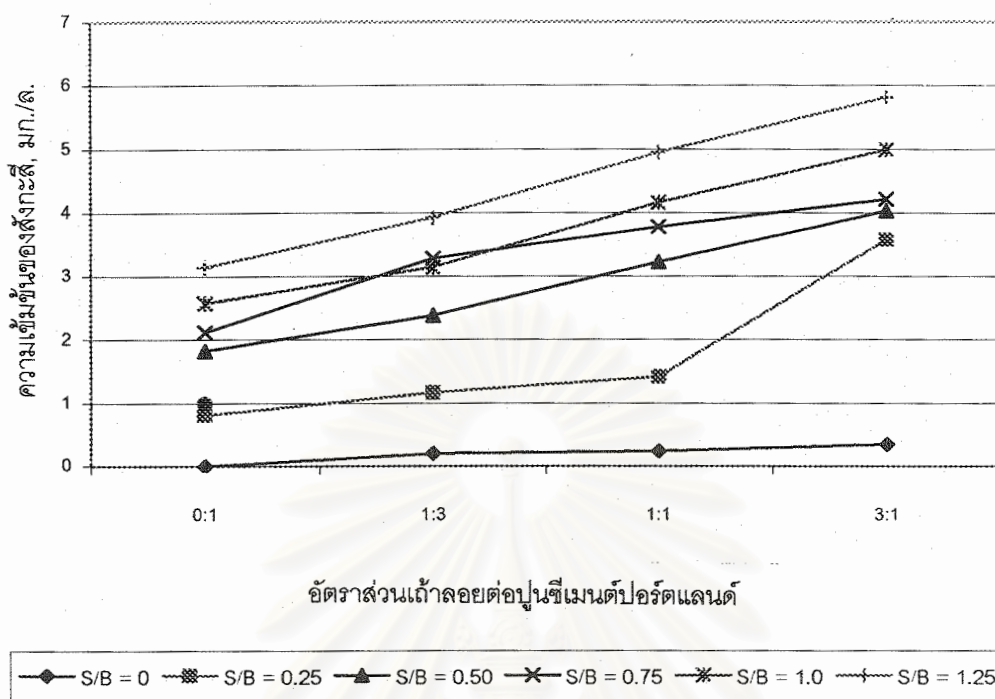
4.2.1.2 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

ตารางที่ 4.12 และ รูปที่ 4.3 แสดงผลของปริมาณสังกะสีในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดมีค่าระหว่าง 0.20 – 5.81 มิลลิกรัมต่อลิตร

การใช้วัสดุประสานในปริมาณคงที่ พบว่า น้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่างที่เกิดจากวัสดุประสานที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว จะมีค่าความเข้มข้นของสังกะสีน้อยที่สุด และความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของถ้ำลยชยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มมากขึ้น และทุกอัตราส่วน S/B ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ปริมาณสังกะสีมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.12 ปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (มก./ล.)

อัตราส่วนถ้ำลยชยะต่อ ซีเมนต์ (FA/OPC)	อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B)					
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
0:1	0.00	0.82	1.83	2.12	2.57	3.14
1:3	0.20	1.17	2.38	3.28	3.14	3.93
1:1	0.24	1.42	3.22	3.78	4.17	4.95
3:1	0.35	3.57	4.03	4.22	4.99	5.81



รูปที่ 4.3 ปริมาณสิ่งสกปรกในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

4.2.1.3 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

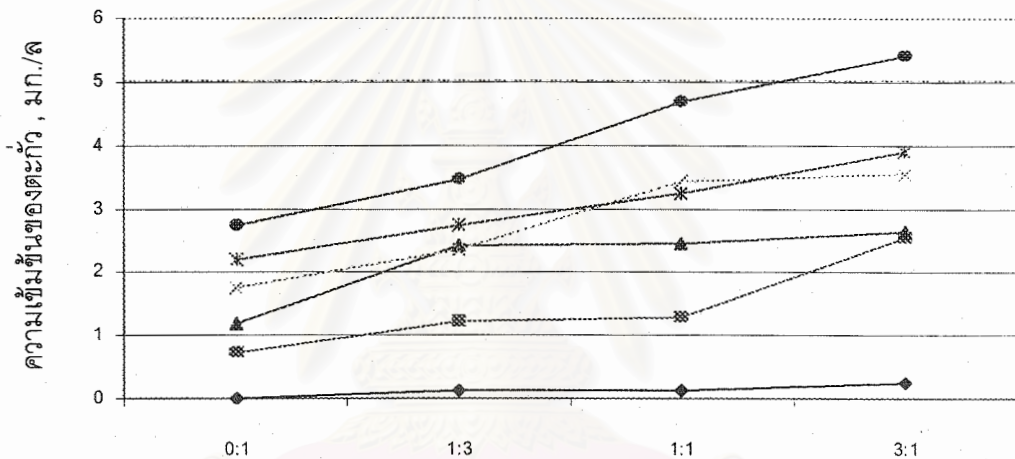
ตารางที่ 4.13 และ รูปที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดมีค่าระหว่าง 0.14 – 5.39 มิลลิกรัมต่อลิตร

การใช้วัสดุประสานในปริมาณคงที่ พบว่า น้ำสกัดจากการชะละลายก้อนตัวอย่างที่เกิดจากวัสดุประสานที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว จะมีค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่น้อยที่สุด และความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มมากขึ้น และทุกอัตราส่วน S/B ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ปริมาณตะกั่วมีค่าเพิ่มขึ้น

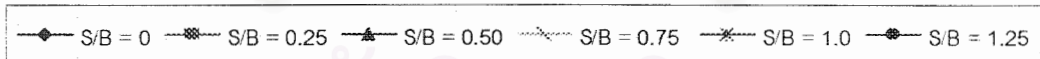
เกณฑ์มาตรฐานปริมาณโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดจากการชะละลาย มีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนผสมของกากตะกอนต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 1.25 และอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 3 ค่าความเข้มข้นของตะกั่ว

ตารางที่ 4.13 ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (มก./ล.)

อัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อซีเมนต์ (FA/OPC)	อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B)					
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
0:1	0.00	0.72	1.19	1.77	2.19	2.74
1:3	0.14	1.23	2.42	2.35	2.72	3.46
1:1	0.14	1.29	2.44	3.43	3.25	4.69
3:1	0.25	2.53	2.63	3.55	3.89	5.39



อัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.4 ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของตะกอนโลหะหนัก

การหาประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของตะกอนโลหะหนัก ในการทดลองนี้ใช้ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย (Leachability) ซึ่งมีนิยามว่า อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกชะละลายในน้ำสกัด ต่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในตัว อย่างซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม โดยการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการถูกชะละลายของตะกอนโลหะหนักก่อนและหลังการทำละลายฤทธิ์ด้วยตัวประสานคือ ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยขยะ ผลการคำนวณหาประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของตะกอนโลหะหนักที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานทุกสัดส่วนแสดงในตารางที่ 4.14 4.15 และ 4.16

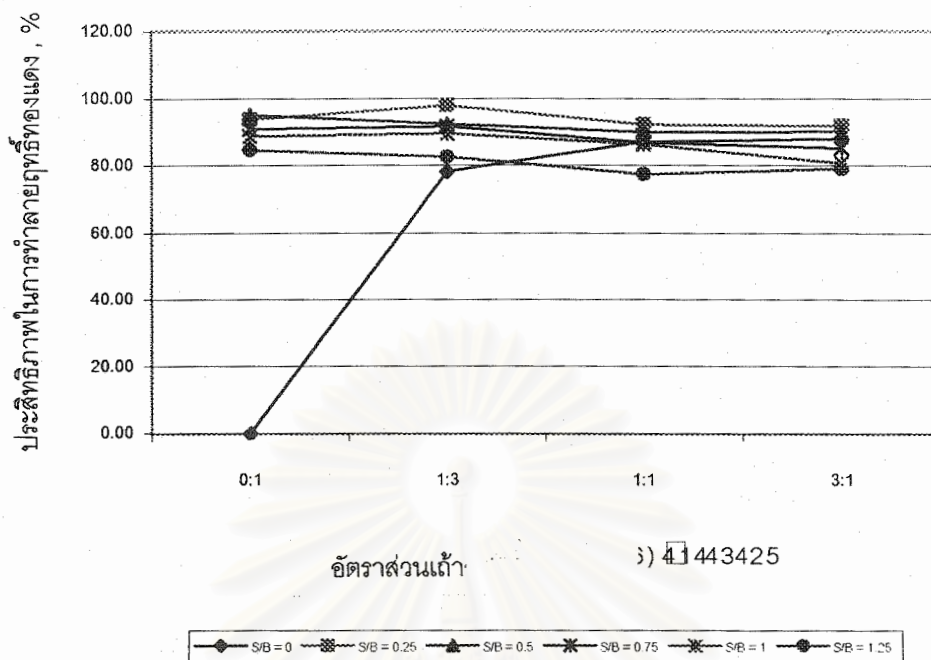
4.2.2.1 ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของทองแดง

ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของทองแดงในตะกอนโลหะหนักก่อนผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าเท่ากับ 15.02 มิลลิกรัมต่อกรัมตะกอน และจากการวิเคราะห์ความสามารถในการถูกชะละลายของเถ้าลอยขยะ พบว่าเถ้าลอยขยะมีค่าความสามารถในการถูกชะละลายของทองแดงมีค่าเท่ากับ 7.49 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำสกัด มีค่าอยู่ระหว่าง 0.064 – 1.256 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการคำนวณหาประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของทองแดงมีค่าอยู่ระหว่าง 78.10 – 97.79 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของทองแดงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนเถ้าขยะต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของทองแดง (เปอร์เซ็นต์)

อัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อ ซีเมนต์ (FA/OPC)	อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B)					
	0.0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
0:1	0.00	93.73	95.04	90.84	88.67	84.48
1:3	78.10	97.79	92.35	91.48	89.53	82.33
1:1	86.92	92.07	89.80	86.86	86.30	77.22
3:1	88.01	91.79	90.06	85.02	80.55	78.98



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ของแดง

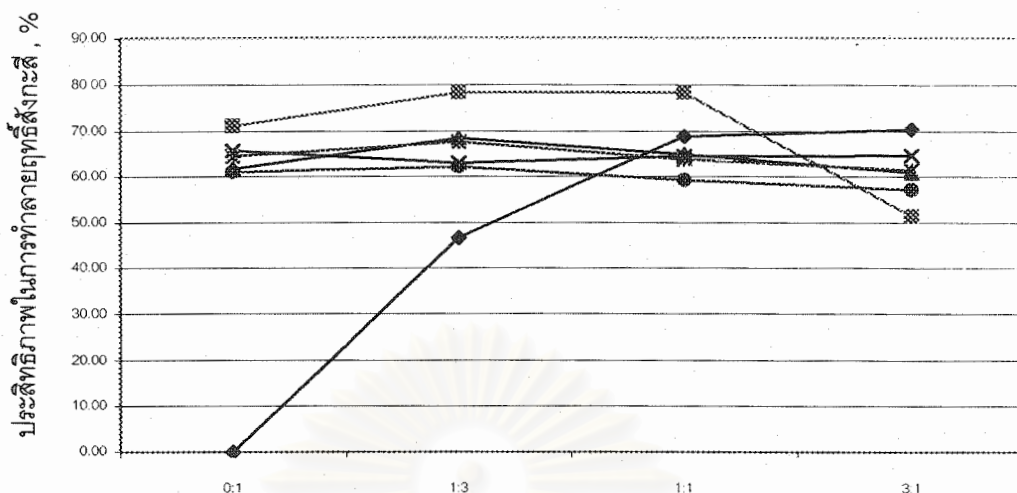
4.2.2.2 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์สังกะสี

ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของสังกะสี ในตะกอนโลหะหนักก่อนผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าเท่ากับ 41.49 มิลลิกรัมต่อกรัมตะกอน และจากการวิเคราะห์ความสามารถในการถูกชะละลายของเถ้าลอยขยะ พบว่าเถ้าลอยขยะมีค่าความสามารถในการถูกชะละลายของสังกะสีมีค่าเท่ากับ 29.4 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัด มีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 – 5.81 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการคำนวณประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ของสังกะสีมีค่าอยู่ระหว่าง 46.62 – 78.29 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราส่วนเถ้าขยะต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ของสังกะสีมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์สังกะสี (เปอร์เซ็นต์)

อัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อซีเมนต์ (FAOPC)	อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B)					
	0.0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
0:1	0.00	71.10	61.61	65.60	64.40	60.99
1:3	46.62	78.29	68.46	62.87	67.67	62.07
1:1	68.90	78.26	64.81	64.35	63.76	59.14
3:1	70.37	51.30	60.85	64.61	61.32	57.05



อัตราส่วนแก๊สต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

—●— S/B = 0 —■— S/B = 0.25 —▲— S/B = 0.50 —×— S/B = 0.75 —*— S/B = 1.0 —●— S/B = 1.25

รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการทำละลายที่สังกะสี

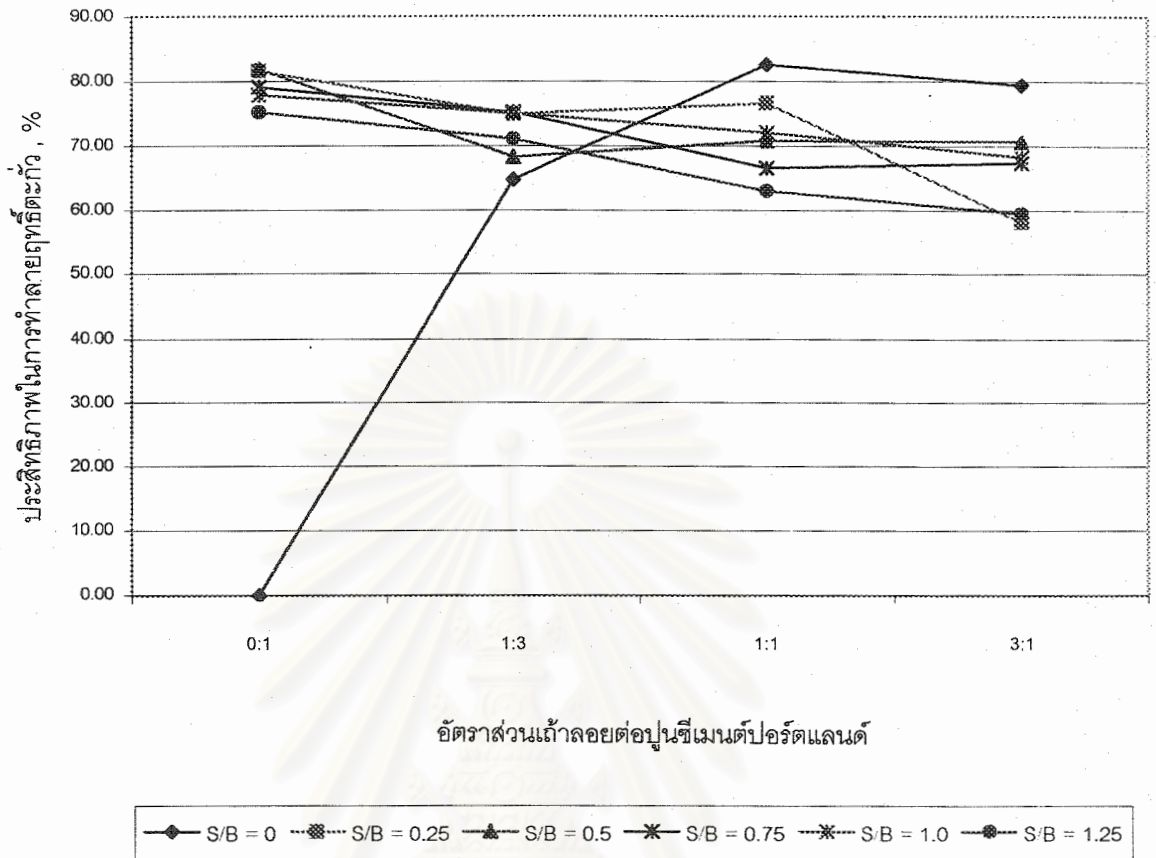
4.2.2.3 ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ตะกั่ว

ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของตะกั่ว ในตะกอนโลหะหนักก่อนผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าเท่ากับ 20.70 มิลลิกรัมต่อกรัมตะกอน และจากการวิเคราะห์ความสามารถในการถูกชะละลายของแก๊สละลาย พบว่าแก๊สละลายมีค่าความสามารถในการถูกชะละลายของตะกั่วมีค่าเท่ากับ 28.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัด มีค่าอยู่ระหว่าง 0.14 – 5.39 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการคำนวณประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของตะกั่วมีค่าอยู่ระหว่าง 58.16 – 82.58 เปอร์เซ็นต์ จากผลการคำนวณพบว่าการผสมแก๊สละลายลงในวัสดุประสานทำให้ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ของตะกั่วมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการทำละลายฤทธิ์ตะกั่ว (เปอร์เซ็นต์)

อัตราส่วนแก๊สละลายต่อซีเมนต์ (FA/OPC)	อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B)					
	0.0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
0	0.00	81.58	81.88	79.15	77.98	75.29
1:3	64.74	75.00	68.27	75.26	75.02	71.07
1:1	82.58	76.66	70.79	66.55	72.06	63.00
3:1	79.41	58.16	70.61	67.38	68.28	59.46



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ตะกั่ว

4.2.3 สรุปอัตราส่วนวัสดุประสานที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อน

การพิจารณาเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมนั้น พิจารณาจากเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อใช้ตรวจสอบความเข้มข้นของทองแดง สังกะสี และตะกั่วในน้ำสกัดที่ผ่านการทดสอบการชะละลาย

พิจารณาผลการทดสอบน้ำสกัดที่ผ่านการทดสอบการชะละลาย เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตะกอนโลหะหนักเพิ่มขึ้นพบว่าความเข้มข้นของทองแดง สังกะสี และตะกั่วในน้ำสกัดมีค่ามากขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ส่งผลให้ความเข้มข้นของทองแดง สังกะสี และตะกั่วในน้ำสกัดมีค่ามากขึ้น

ซึ่งค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัด ที่อัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 3 และอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 5.39 ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

สำหรับความเข้มข้นของสังกะสี และทองแดง ซึ่งประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 ฉบับ พ.ศ.2540 ไม่ได้ระบุไว้ แต่เนื่องจากการดำเนินการฝังกลบ กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดให้มีการตรวจสอบคุณภาพน้ำในบ่อสูบน้ำที่รวบรวมน้ำของหลุมฝังกลบทุกครั้ง ก่อนที่จะระบายทิ้ง โดยจะต้องมีความสกปรกไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงนำค่าความเข้มข้นของสังกะสี และทองแดงในน้ำสกัด ไปเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ซึ่งกำหนดความเข้มข้นของสังกะสี และทองแดงไว้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

พิจารณาความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดพบว่า ที่อัตราส่วนแฉ่ำลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 3 และอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 5.81 ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน

พิจารณาความเข้มข้นของทองแดงในน้ำสกัดพบว่า ที่อัตราส่วนแฉ่ำลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 3 และอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และ 1.25 ค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำสกัดเท่ากับ 1.130 และ 1.256 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนแฉ่ำลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 1 และอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำสกัดมีค่าเท่ากับ 1.177 ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน

พิจารณาประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของแฉ่ำลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ มีผลให้ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ของทองแดง สังกะสีและตะกั่วมีแนวโน้มลดลง และประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ของทองแดง สังกะสี และตะกั่ว มีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสานมีค่าเพิ่มขึ้น

พิจารณาลักษณะการนำไปใช้งานจริง พบว่าที่อัตราส่วนผสมแฉ่ำลอยขยะต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3 มีการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ส่วนผสมมีความแห้ง และเมื่อถอดแบบจะมีลักษณะร่วน ไม่เหมาะแก่การใช้งานได้จริง

จากข้อสังเกตข้างต้น ดังนั้นในการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม จึงควรพิจารณาจากความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก และลักษณะการนำไปใช้งานจริง และสัดส่วนผสมที่ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถกำจัดกากตะกอนได้ในปริมาณที่มาก

จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนตะกอนโลหะต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 1.25 และอัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็น 1:3 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

4.3 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม

การทดลองนี้นำเอาอัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B) และอัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ (FA/OPC) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 ได้แก่อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสาน (S/B) เป็น 1.25 และอัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ (FA/OPC) เป็น 1:3 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.422 แล้วแปรค่าระยะเวลาการบ่ม เป็น 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

4.3.1 การทดสอบการชะละลายของตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

4.3.1.1 ปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

จากตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.8 แสดงผลของปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายมีค่าลดลง และที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายมีค่าต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.17 ปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (มก./ล.)

อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุ ประสาน (S/B)	ระยะเวลาการบ่ม			
	3	7	14	28
1.25	0.893	0.713	0.694	0.728

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ปริมาณทองแดงในน้ำชะละลาย

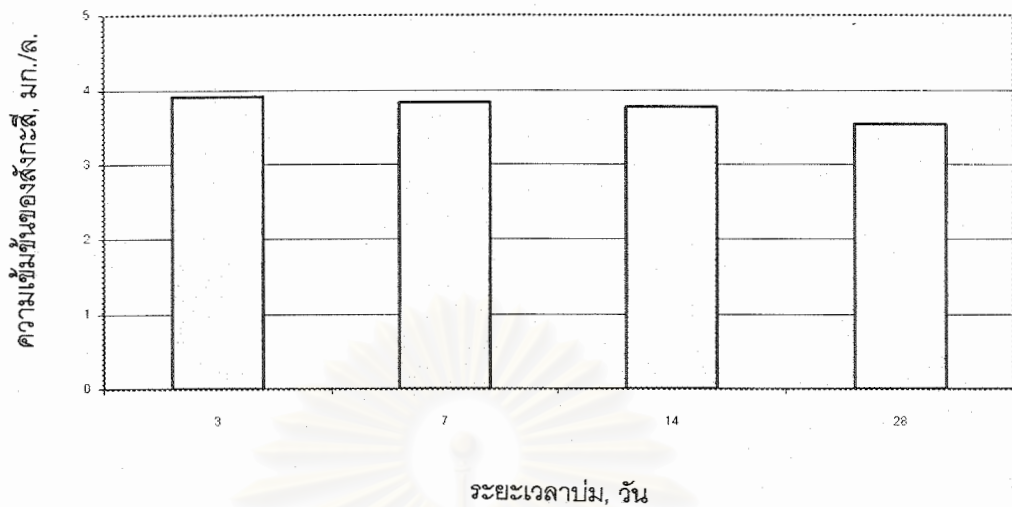
4.3.1.2 ปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

จากตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.9 แสดงผลของปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลาย ตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลายมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.18 ปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (มก./ล.)

อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุ ประสาน (S/B)	ระยะเวลาการบ่ม			
	3	7	14	28
1.25	3.92	3.84	3.78	3.55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



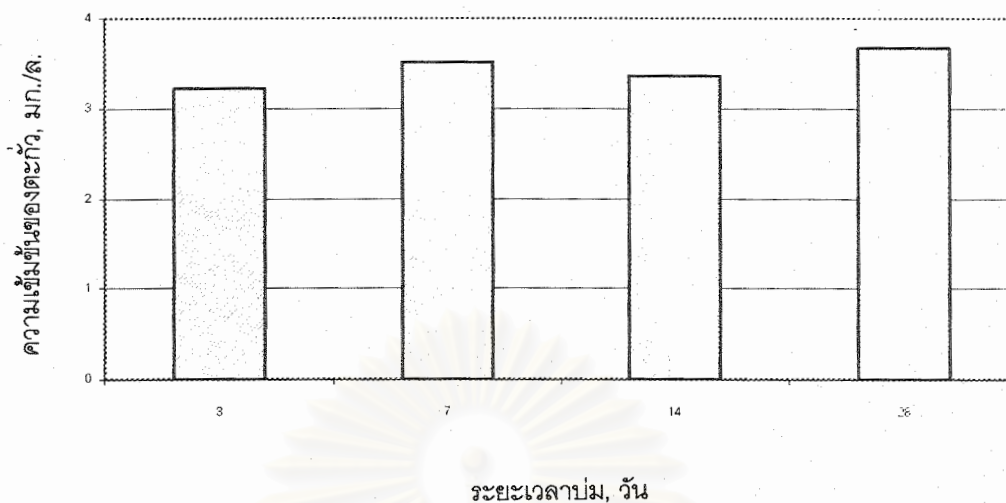
รูปที่ 4.9 ปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลาย

4.3.1.3 ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

จากตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.10 แสดงผลของปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลาย ตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 3 วันปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายมีค่าต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.19 ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (มก./ล.)

อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุ ประสาน (S/B)	ระยะเวลาการบ่ม			
	3	7	14	28
1.25	3.22	3.51	3.36	3.67



รูปที่ 4.10 ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลาย

4.3.1.4 ค่าพีเอช

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าพีเอช ของน้ำสกัดของตะกอนเมื่อผ่านการทำก้อนด้วย ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยขยชะ จากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำสกัดมีค่าอยู่ระหว่าง 12.24 – 11.66 และค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.20 ค่าพีเอชของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำก้อนแล้ว

อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุ ประสาน (S/B)	ระยะเวลาการบ่ม			
	3	7	14	28
1.25	12.24	12.18	11.82	11.66

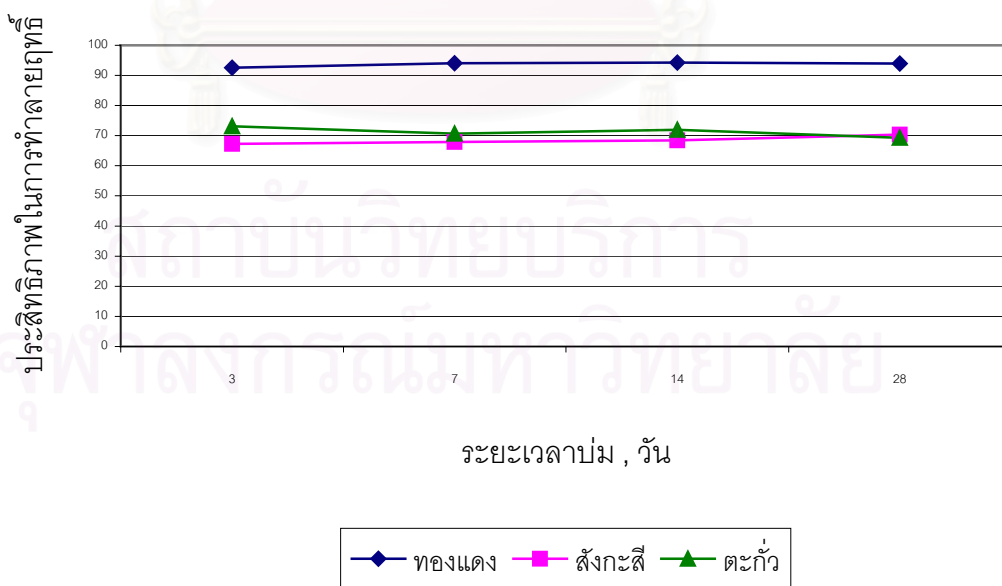
4.3.2 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก

โดยการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการถูกชะละลายของตะกอนโลหะหนัก ก่อนและหลังการทำลายฤทธิ์ด้วยตัวประสานคือ ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยขยะ ผลการคำนวณหา ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ของตะกอนโลหะหนักที่อัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสาน เท่ากับ 1.25 และอัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1:3 โดยแปรค่าระยะเวลาบ่มเป็น 3 7 14 และ 28 วัน แสดงในตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.11

ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักเมื่อระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วันมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.21 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)

ชนิดของโลหะ	ระยะเวลาการบ่ม			
	3	7	14	28
ทองแดง	78.62	82.93	83.38	82.57
สังกะสี	62.16	62.93	63.51	65.73
ตะกั่ว	73.08	70.66	71.91	69.32



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก

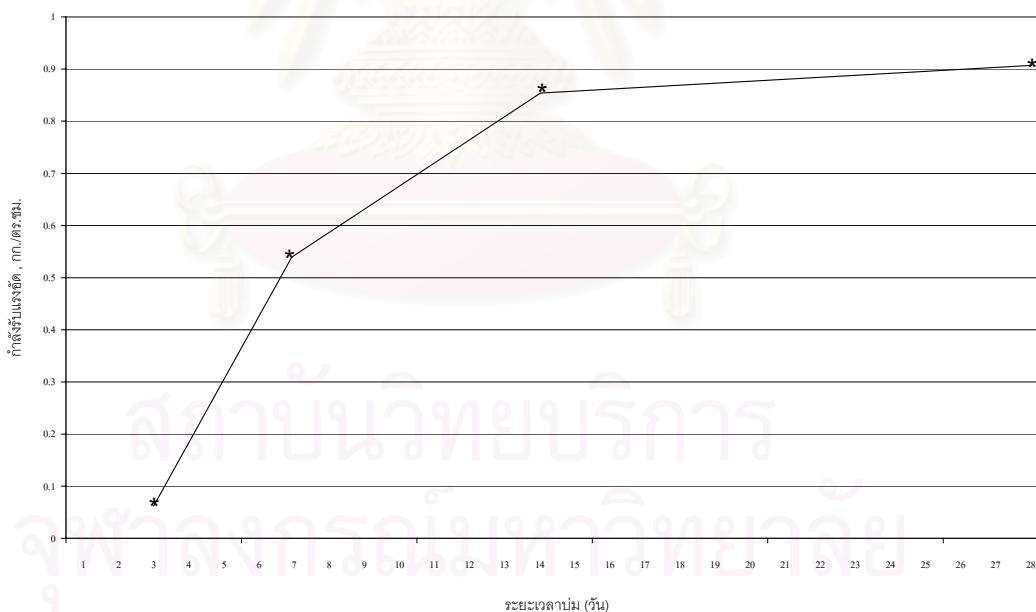
4.3.3 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

4.3.3.1 กำลังรับแรงอัด

จากตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.12 แสดงผลของกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน โดยเลือกค่าอัตราส่วน S/B ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 และแปรค่าระยะเวลาในการบ่ม ผลจากการทดลองสรุปว่า ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อนำตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรมแล้วพบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (เกณฑ์มาตรฐานเท่ากับ 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ตารางที่ 4.22 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (กก./ตร.ซม.)

อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุ ประสาน (S/B)	ระยะเวลาการบ่ม			
	3	7	14	28
1.25	7	64	102	108



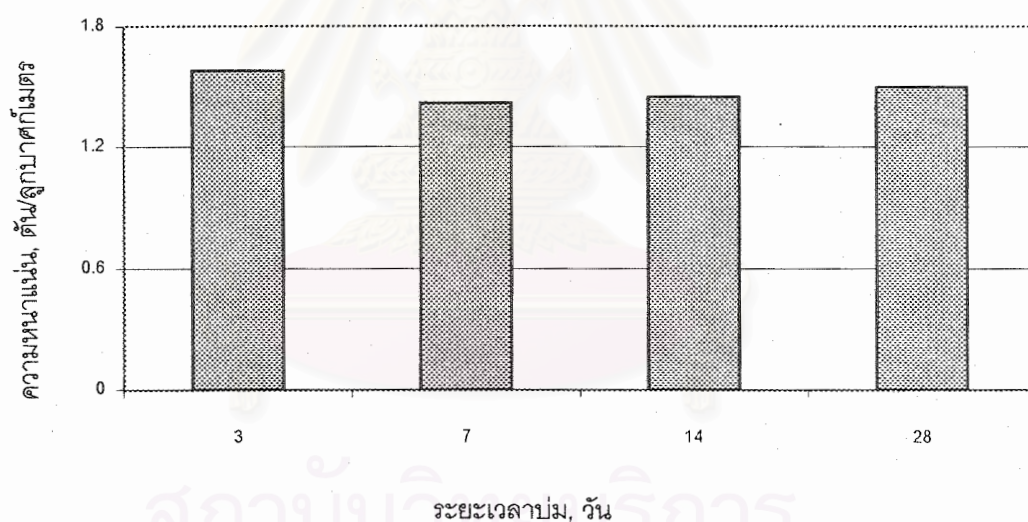
รูปที่ 4.12 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

4.3.3.2 ความหนาแน่น

จากตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.13 แสดงผลของค่าความหนาแน่น ของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน พบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อนำตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิภูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรมแล้วพบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ 1.15 ดัชนีลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.23 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (ตัน/ลบ.ม.)

อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุ ประสาน (S/B)	ระยะเวลาการบ่ม			
	3	7	14	28
1.25	1.58	1.42	1.45	1.50



รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

4.3.3 สรุประยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นทำให้การชะละลายของโลหะลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น และความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อนำตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิภูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แล้วพบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่กล่าวมาแล้ว ระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมคือ 3 วัน เนื่องจากเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิภูลที่ผ่านการทำเป็นก้อน ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แล้วพบว่าที่ระยะเวลาในการบ่ม 3 วันมีค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายมีค่าอยู่เกณฑ์มาตรฐาน

4.4 ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย

โดยการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการถูกชะละลายของตะกอนโลหะหนัก ก่อนและหลังการทำลายฤทธิ์ด้วยตัวประสา ผลการคำนวณหาประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ของตะกอนโลหะหนักที่อัตราส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสานเท่ากับ 1.25 และอัตราส่วนแก้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1:3 โดยระยะเวลาบ่มเป็น 3 วัน แสดงในตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)

ชนิดของโลหะหนัก	ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ (เปอร์เซ็นต์)
ทองแดง	78.62
สังกะสี	62.16
ตะกั่ว	73.08

4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอน

การศึกษาการทำให้เป็นก้อนของกากตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พบว่าการใช้วัสดุประสานในปริมาณร้อยละ 80 เทียบกับน้ำหนักกากตะกอน และอัตราส่วนเถ้าลอยขยะต่อปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1:3 มีความเหมาะสมที่สุดเพราะคุณสมบัติทางกายภาพ และการชะละลายผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ปริมาตรสุดท้ายของของเสียเพิ่มไม่มากนัก และประหยัดวัสดุในการทำให้เป็นก้อน

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อน ค่าขนส่ง และค่าฝังกลบ

4.5.1 ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อน

ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อนประกอบด้วย ค่าวัสดุและค่าแรงในการบำบัด ข้อมูลจากฝ่ายข้อมูลราคา กองดัชนีเศรษฐกิจการค้า กรมเศรษฐกิจพาณิชย์ เดือนมกราคม 2547 ปูนซีเมนต์ราคาตันละ 2,400 บาท ในการทำให้เป็นก้อนนี้ กากตะกอน 1 ตัน ต้องใช้ปูนซีเมนต์ 0.6 ตัน คิดเป็นราคาปูนซีเมนต์ 1,440 บาท โดยปกติแล้วค่าแรงในการผสมคอนกรีตคิดเป็นร้อยละ 20 ของราคาวัสดุที่ใช้ ดังนั้นค่าแรงในการทำก้อนจึงมีค่าประมาณ 288 บาท ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการทำก้อนกากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนประมาณ 1,728 บาทต่อตันของกากตะกอน

4.5.2 ค่าขนส่งและค่าขนย้ายไปยังหลุมฝังกลบ

โรงงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตั้งอยู่ที่ สวนอุตสาหกรรมบางกะดี จ.นนทบุรี ซึ่งจะต้องขนก้อนกากตะกอนไปยังศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ เพื่อนำไปฝังกลบ โดยคิดราคาค่าขนส่งเท่ากับ 2.75 บาท/ตัน/กิโลเมตร และคิดค่าขนย้ายขึ้นลงจากรถ 300 บาท/ตัน

กากตะกอน 1 ตัน ถ้าทำเป็นก้อนแข็งจะมีน้ำหนัก 1.8 ตัน การขนส่งก้อนกากตะกอนไปฝังกลบที่ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ มีระยะทางประมาณ 120 กิโลเมตร ดังนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่ง $(1.8 \times 2.75 \times 120)$ เท่ากับ 594 บาทต่อกากตะกอน 1 ตัน และขนย้ายก้อนกากตะกอนไปยังหลุมฝังกลบ (1.8×300) เท่ากับ 540 บาทต่อกากตะกอน 1 ตัน รวมค่าขนส่งและค่าขนย้ายจากสวนอุตสาหกรรมบางกะดีไปยังศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ เท่ากับ 1,134 บาทต่อกากตะกอน 1 ตัน

4.5.3 ค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ

ที่ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ คิดค่าฝังกลบประมาณ 875 บาทต่อตัน กากตะกอน 1 ตัน ถ้าทำเป็นก้อนแข็งจะมีน้ำหนัก 1.8 ตัน ดังนั้นจะต้องเสียค่าฝังกลบ (1.8 X 875) เท่ากับ 1,575 บาทต่อกากตะกอน 1 ตัน

ดังนั้นรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดสำหรับการจัดการกากตะกอน 1 ตันเท่ากับ 4,437 บาท

4.6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนด้วยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ และถ่าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นวัสดุประสาน กับการส่งให้ GENCO บำบัด

4.6.1 ค่าใช้จ่ายในการส่งให้ GENCO บำบัด

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการทำลายฤทธิ์ ค่าขนส่ง และค่าฝังกลบ

4.6.1.1 ค่าใช้จ่ายในการทำลายฤทธิ์ ราคา 600 บาทต่อกากตะกอน 1 ตัน

4.6.1.2 ค่าขนส่ง คิดราคาค่าขนส่งเท่ากับ 3.16 บาท/ตัน/กิโลเมตร และคิดค่าขนย้ายขึ้นลงจากรถ 562.2 บาท/ตัน ดังนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่ง (1 X 3.16 X 120) เท่ากับ 379.2 บาทต่อกากตะกอน 1 ตัน และขนย้ายก้อนกากตะกอนไปยังหลุมฝังกลบ (1 X 562.2) เท่ากับ 562.2 บาทต่อกากตะกอน 1 ตัน รวมค่าขนส่งและขนย้ายจากสวนอุตสาหกรรมบางกะดีไปยังศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ เท่ากับ 941.4 บาทต่อกากตะกอน 1 ตัน

4.6.1.3 ค่าฝังกลบ ค่าฝังกลบประมาณ 875 บาทต่อตัน กากตะกอน 1 ตัน

ดังนั้นรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการส่งให้ GENCO บำบัดกากตะกอน 1 ตันเท่ากับ 2,416.4 บาท

4.6.2 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนด้วยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ และถ่าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นวัสดุประสาน ทั้งหมดสำหรับการจัดการกากตะกอน 1 ตัน เท่ากับ 4,437 บาท

จากการวิเคราะห์พบว่า การบำบัดกากตะกอนโดยให้ก้อนด้วยการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ และถ่าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นวัสดุประสาน มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการส่งให้ GENCO บำบัด แต่ยังไม่ได้คิดถึงมูลค่าที่นำถ่าลอยซึ่งเป็นของเสียมาใช้ประโยชน์ และสามารถลดต้นทุนในการจัดการถ่าลอย ในปัจจุบันถ่าลอยที่เหลือจากการเผาขยะชุมชนจะถูกนำไปฝังกลบซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการฝังกลบตันละ 150 บาท (ค่าใช้จ่ายในการจ้างรถขนถ่าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน จ.ภูเก็ต ไปยังหลุมฝังกลบซึ่งตั้งอยู่ภายในบริเวณเดียวกับโรงเผาขยะชุมชน ซึ่งไม่ได้

รวมค่าใช้จ่ายในการสร้างหลุมฝังกลบ อุปกรณ์ในการสร้างหลุมฝังกลบ ค่าที่ดินในการก่อสร้าง
ค่าดำเนินการในการฝังกลบ ค่าดำเนินการภายใน)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นตัวประสาน โดยทำการทดลองหาค่า Optimum moisture content ของเถ้าลอย และตะกอนโลหะหนัก เพื่อนำมาใช้หาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ในการทดลองเพื่อให้ก้อนมีความหนาแน่นมากที่สุด และศึกษาสัดส่วนผสมของตะกอนต่อตัวประสาน และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง และหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของทองแดง สังกะสี และตะกั่ว และทำการประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนนี้ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเพิ่มสัดส่วนของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนในวัสดุประสานทำให้ความเข้มข้นของทองแดง สังกะสี และตะกั่วในน้ำสกัดมีค่ามากขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มสัดส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสาน จะส่งผลให้ความเข้มข้นของทองแดง สังกะสี และตะกั่วในน้ำสกัดมีค่าสูงขึ้น

2. อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 1.25 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1:3 เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักและเถ้าลอยต่อตัวประสานมากกว่านี้ จะทำให้ตะกอนโลหะหนักและตัวประสานมีการก่อก้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้ส่วนผสมแห้งและเมื่อถอดแบบออกจะมีลักษณะร่วน ไม่เหมาะแก่การนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้ความเข้มข้นของตะกั่วและทองแดงในน้ำสกัดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

3. ระยะเวลาในการบ่มตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง กล่าวคือทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น และความหนาแน่นมีแนวโน้มสูงขึ้น รวมทั้งความเข้มข้นของทองแดง และสังกะสีในน้ำสกัดมีค่าลดลง แต่ไม่มีผลกับความเข้มข้นตะกั่วในน้ำสกัด

4. ประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อนของตะกอนโลหะหนัก ที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเป็น 1.25 สำหรับอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์เป็น 1 : 3 เท่ากับ 78.62% 62.16 % และ 73.08 % สำหรับทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และ

ค่าความเข้มข้นของทองแดง และสังกะสีมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 พ.ศ.2539

5. การประมาณค่าใช้จ่ายในการทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสาน คือ ถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และปูนซีเมนต์เป็น 4,437 บาทต่อตันกากตะกอน เมื่อเทียบกับการส่งให้ GENCO บำบัดซึ่งมีค่า 2,416 บาทต่อตันกากตะกอน เห็นว่าค่าใช้จ่ายในการทำก้อนมีค่าสูงกว่า แต่ยังไม่ได้คิดถึงมูลค่าที่นำถ้ำลอยซึ่งเป็นของเสียมาใช้ประโยชน์ และผลประโยชน์ในการลดต้นทุนในการจัดการถ้ำลอย

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. ทดลองศึกษาเปรียบเทียบขนาดของถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนในการทำก้อนกากตะกอนโลหะหนัก ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย ค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น
2. ควรศึกษาถึงการนำกากตะกอนที่ถูกทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์และถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนแล้วมาใช้ประโยชน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กาญจนา ต่วนเทศ. การเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิดด้วยปูนขาวและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. เอกสารสัมมนาทางวิชาการเรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2536. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยโลหะวัสดุ. รายงานการศึกษาวิจัยโครงการกำจัดกากแร่สังกะสี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2512.
- ดวงสมร ผดุงเกียรติวงศ์. การเปรียบเทียบการทำปรอทซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- นฤมิตร คินิมาน. การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- ประณต กุลประสูตร. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต, 2536.
- ปราโมทย์ พรหมทอง. ผลการคัดแยกมูลฝอยของเตาเผามูลฝอยชุมชนจังหวัดภูเก็ตที่มีต่อการทำลายเถ้าลอยให้เป็นก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- วรากร ไม้เรียง, จีรวัดน์ โชติกไกร, ประทีป ดวงเดือน. ปฐพีกลศาสตร์ ทฤษฎีและปฏิบัติการ. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ การพิมพ์. 2525.
- วินิต ช่อวีเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. ภาควิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
- ศักดา วรพิพัฒน์. การทำเสถียรตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงย่างแร่สังกะสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. รวมกฎหมายสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้ปฏิบัติ. มิตรนราการพิมพ์, 2542.

อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย. การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
ลิไกต์เป็นตัวประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539.

อุดม หงษ์ประธานพร. การพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและเถ้า
แกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรม
ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing and Materials D 558-95, Standard Test Methods for
Moisture-Density Relations of Soil-Cement Mixtures, American Society for testing
and materials.

American Society for Testing and Materials 559-95, Standard Test Methods for Wetting
and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, American Society for testing and
materials.

American Society for Testing and Materials 1633-95, Standard Test Methods for
Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, American Society for
testing and materials.

American Society for Testing and Materials 1266-95, Standard Practice for Processing
Mixtures of Lime, Fly ash, and Heavy Metal Wastes in Structural Fills and Other
Construction Applications, American Society for testing and materials.

Bishop, P.L. Leaching of Inorganic Hazardous Constituents from Stabilized/Solidified
Hazardous Waste. Hazardous Waste & Hazardous Materials. 5 : 129-143. ,1988.

Conway, R.A. and Malloy, B.C. Hazardous Solid Waste Testing : First Conference. ASTM
STP 760,1981.

Dean, J.G. Bosqui, F.L. and Lanouette, K.H. Removing heavy metals from waste water.
Envi.Sci & Tech, 6:518-521,1972.

Inthasaro, P. Utilization of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash as a Partial Cement
Replacement . Master's Thesis, Inter-Departmental Program in Environmental
Management, Graduate School, Chulalongkorn University, 2002

Jaggi, N. Solidification of Hazardous Wastes using Cementitious Binders. Thesis No. EV-
88-18, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand, 1988.

- Josephson, J. Immobilization and Leachability of Hazardous Waste. Environmental Science and Technology.4: 219A - 223A , 1982.
- Leangon, K. Solidification of Hazardous Waste By Cement-Based Technique. Solidification of Hazardous Wastes using Cementitious Binders. Thesis No. EV-93-10, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand, 1993.
- McIntyre, A.D. and Mills, C.F.. Effects of Heavy metal and Organohalogen Compounds. Ecological Toxicology Research, pp.189-194, Plenum Press, USA., 1975.
- Poon, C.S., Peters, C.J., and Perry, R. Use of stabilization Process in the Control of Toxic Waste. Effluent Water Treatment Journal, 23 (11) : pp. 451-459, 1985.
- Rijal S.P. Solidification of Laboratory Wastes Using Cementitious Binders. Thesis No. EV-90-20, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand, 1990.
- Shin, H.S. and Sujitwattana, P. Factors Affecting Solidification of Hazardous Materials. Hazardous Waste Detection, Control, Treatment. : 1549-1560, 1988.
- Shin, H.S. Koo, J.K., Kim, J.O. and Yoon, S.P. Leaching Characteristics of Heavy Metal from Solidified Sludge Under Seawater Conditions. Hazardous Waste and Hazardous Waste and Hazardous Materials 7 (1990X : 261-271).
- Shuhrow, A.J., Pajak, A.P., and Touhill, C.J. Hazardous Waste Leachate Management Manual, Park Ridge, N.J. Noyes Data Corporation, 1982.
- Sollars, C.J. and Perry, R. Cement-based Stabilization of Wastes Principal and Theoretical Consideration. Journal of the Institution of Water and Environment Management. 3 : 125-131, 1989.
- Sujitwattana, P. Factor Affecting Solidification of hazardous Waste. Thesis No. EV-87-5, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand, 1987.
- Tay, J.H., and Goh, A.T.C. Municipal Solid Waste Incinerator Fly ash for Geotechnical Application. Journal of Geotechnical Engineering. 119: 811-825 , 1993.
- Thomson D.W. Malone P.G. and Jones, L.W. Survey of Available Stabilization Technology. In R.B. Pojasek (ed.), Toxic and Hazardous Waste Disposal. Pp9-12 Michigan : Ann Arbor Science, 1979.

Wiles, C.C. Solidification and Stabilization Technology. In Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, pp. 7.85-7.101. Mc Graw-Hill Book, 1989.

Youn, J.H. Solidification of Laboratory Wastes by Using Ordinary Portland Cement and lime Rice Hush Ash Cement. Thesis No. EV-90-27, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand, 1990.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

รายละเอียดการทดลอง

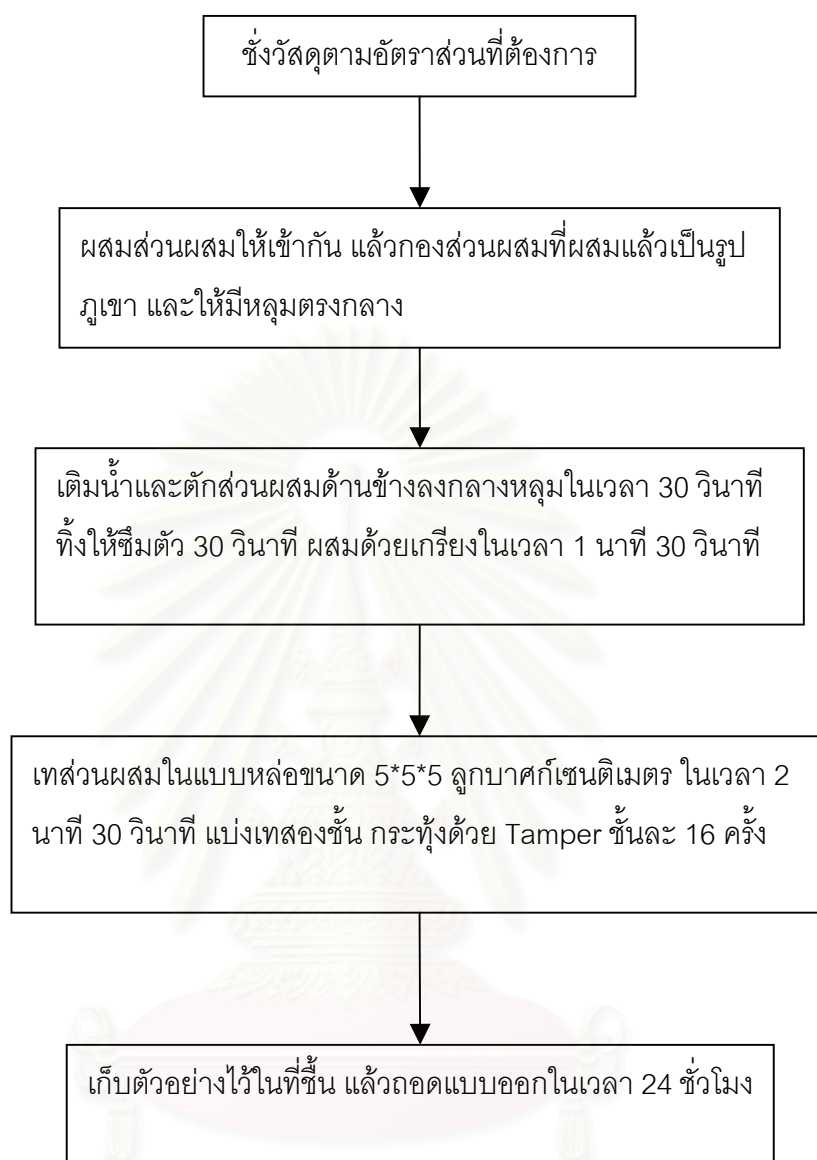
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก-1 ขั้นตอนการหล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้โมลด์ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1. ชั่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบโดยให้ได้ 3 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม
2. การผสมใช้วิธีผสมด้วยมือ (สวมถุงมือยาง) โดยผสมวัสดุประสานต่อตะกอนแต่ละชนิดเข้าด้วยกันบนแผ่นกระจก เมื่อเข้ากันดีแล้วกองส่วนผสมที่ผสมแล้วเป็นรูปภูเขา
3. และให้มีหลุมตรงกลาง เติมน้ำลงในหลุมและตักส่วนผสมจากด้านข้างลงในกลางหลุมในเวลา 30 วินาที และทิ้งให้ซึมตัวด้วยน้ำ 30 วินาที เริ่มผสมด้วยเกรียงให้เข้ากันในเวลา 1 นาที 30 วินาที
4. เอาส่วนผสมเทลงในแบบหล่อ ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที การหล่อจะแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกหนาประมาณ 2.5 เซนติเมตร แล้วใช้ Tamper กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้ง โดย 8 ครั้ง แรกจะมีทิศตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลัง ให้แรงกระทุ้งพอประมาณ และเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้องขณะกระทุ้งใช้ Tamper กระทุ้งเช่นเดียวกับครั้งแรก เมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
5. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ชื้นทันที และถอดแบบหล่อออกในเวลา 24 ชั่วโมง

ขั้นตอนของการหล่อก้อนตัวอย่างแสดงในรูป ผ-1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

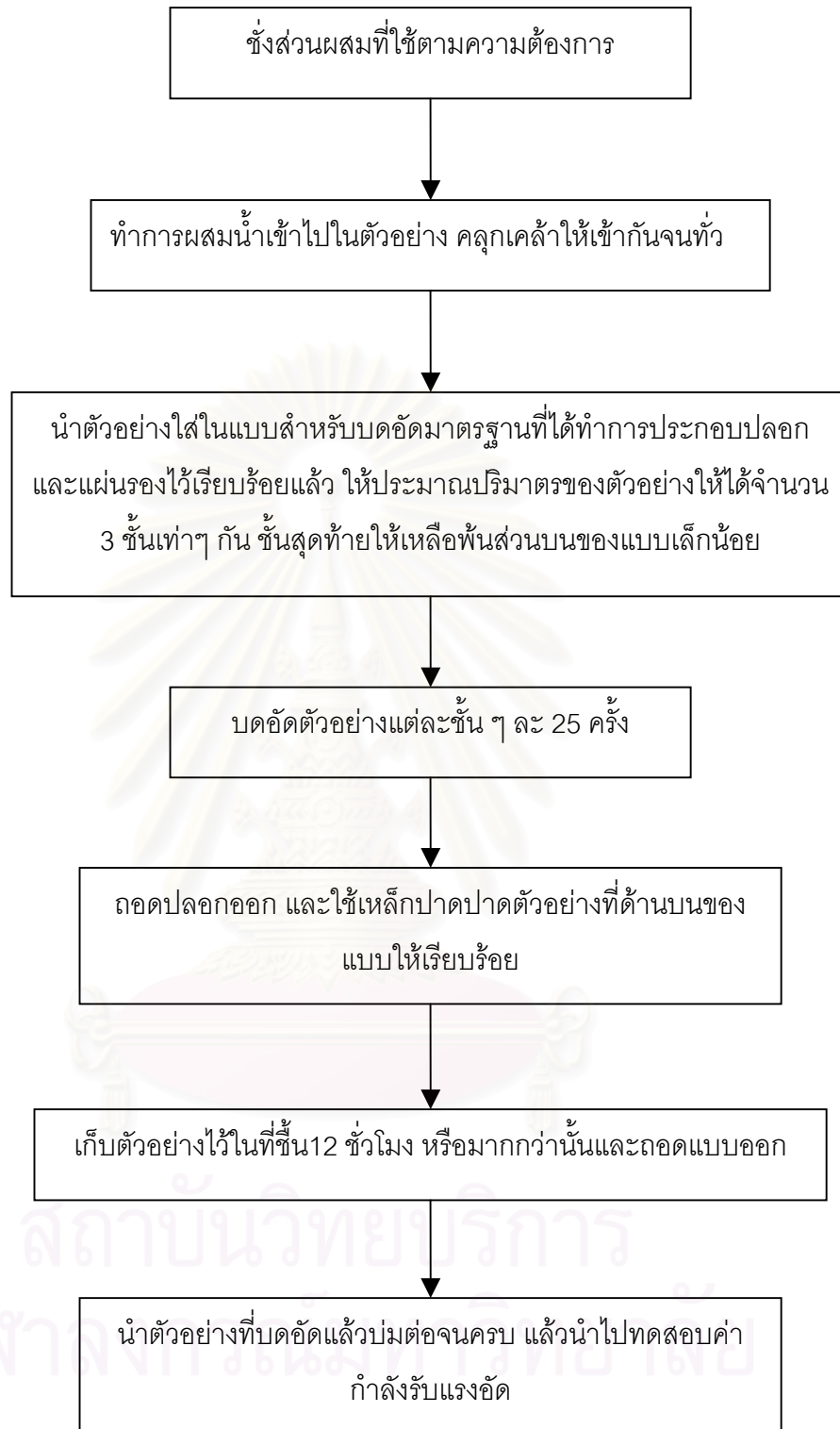
รูป ผ-1 แสดงขั้นตอนการหล่อก้อนตัวอย่าง

ก-2. ขั้นตอนการหล่อก้อนตัวอย่างและทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM D-1633

1. ชั่งส่วนผสมที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการ
2. ทำการบดอัดตัวอย่างโดยการใช้การบดอัดตัวอย่างมาตรฐาน โดยมีขั้นตอนดังนี้
 - 2.1 หาปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงไป
 - 2.2 ทำการผสมน้ำเข้าไปในตัวอย่าง คลุกเคล้าให้เข้ากันให้ทั่วจนได้ความชื้นของตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งหมด จากนั้นนำตัวอย่างไปใส่ในแบบสำหรับบดอัดมาตรฐานที่ได้ทำการประกอบปลอก (Collar) และแผ่นรองไว้เรียบร้อยแล้ว ให้ประมาณปริมาตรของตัวอย่างที่ใส่ให้ได้จำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน ชั้นสุดท้ายให้เหลือพื้นที่ส่วนบนของแบบเล็กน้อย
 - 2.3 บดอัดดินแต่ละชั้นๆ ละ 25 ครั้ง การบดอัดต้องให้ได้ความแน่นของดินในแต่ละชั้นสม่ำเสมอเท่ากันตลอด
 - 2.4 ถอดปลอก (Collar) ออกและใช้เหล็กปาด (Straightedge) ปาดตัวอย่างที่ด้านบนของแบบให้เรียบ ถอดแผ่นรองออก
 - 2.5 เก็บตัวอย่างไว้ในที่ชื้น 12 ชั่วโมง หรือมากกว่านั้น แล้วถอดแบบออก
 - 2.6 นำตัวอย่างที่บดอัดแล้วบ่มต่อจนครบกำหนด
 - 2.7 นำตัวอย่างไปแช่น้ำ 4 ชั่วโมง ก่อนทดสอบด้วยเครื่อง Compression Test
 - 2.8 คำนวณค่ากำลังรับแรงอัดโดยนำค่าแรงกดในแนวตั้งสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่รับน้ำหนักกด

ขั้นตอนของการหล่อก้อนตัวอย่างและทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงอัด แสดงในรูป ผ-2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



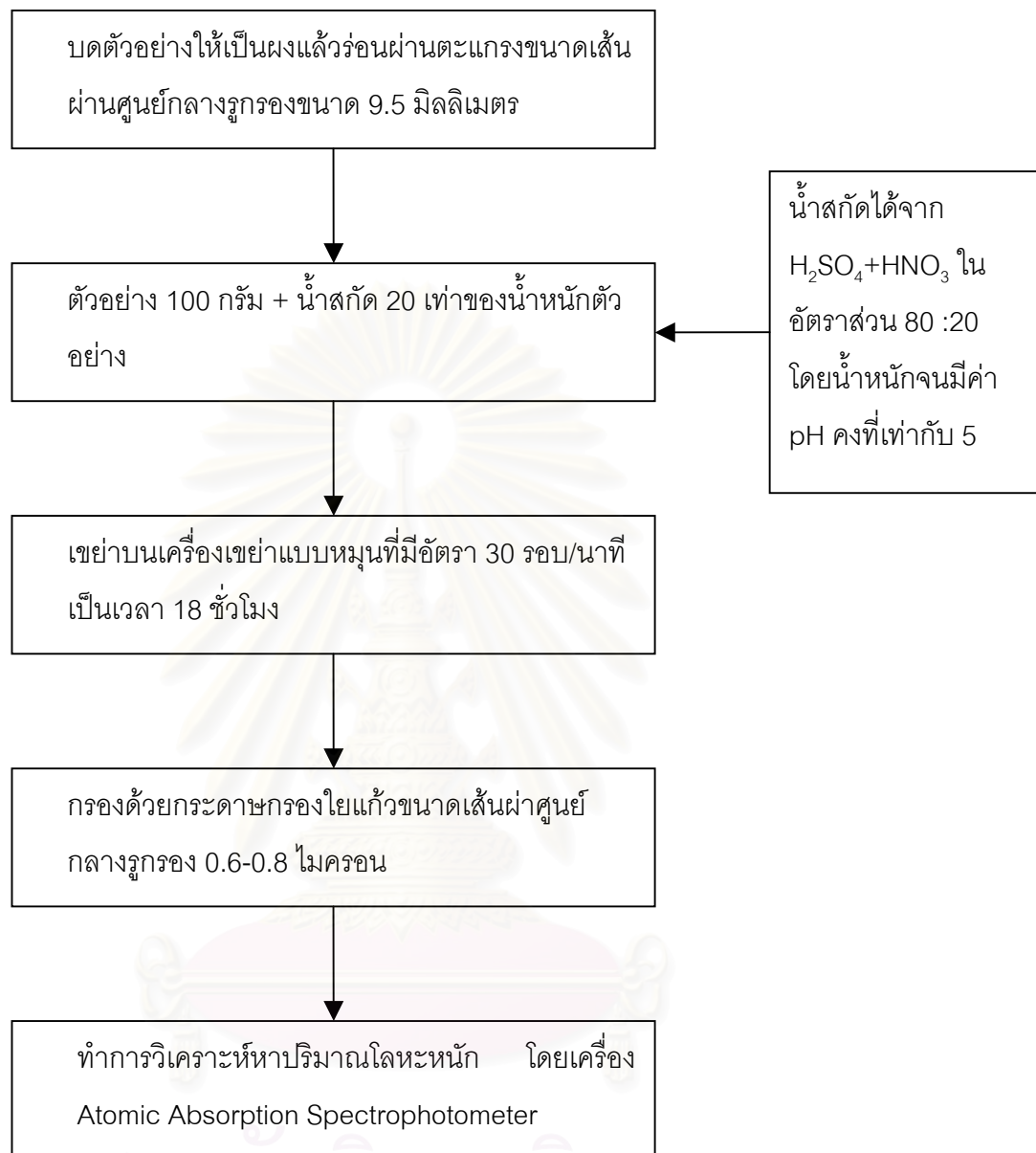
รูป ผ-2 แสดงขั้นตอนการหล่อก้อนตัวอย่างและทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงอัด

ก-3. ขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย ตามภาคผนวกท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (2540)

1. บดตัวอย่างให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรองขนาด 9.5 มิลลิเมตร
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1) หนัก 100 กรัมเติมด้วยน้ำสกัด ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) หาค่าความเป็นกรดหรือค่าพีเอช (pH) ของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของส่วนผสมให้อัตราส่วนปริมาตรน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย แสดงในรูปที่ ผ-3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๘-3 แสดงขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย

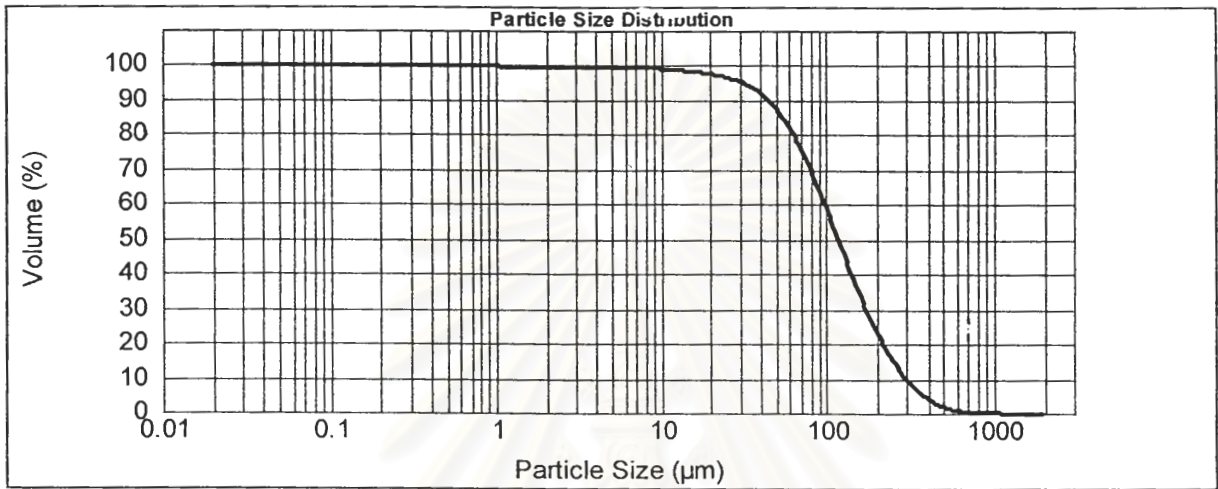


ภาคผนวก ข
สมบัติของวัสดุผสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายขนาดคละของวัสดุผสมต่าง ๆ วิเคราะห์โดยเครื่องวัดการกระจายขนาด (Particle size analysis) MASTERSIZER 2000

d(0.1): 44.948 um d(0.5): 117.371 um d(0.9): 296.400 um



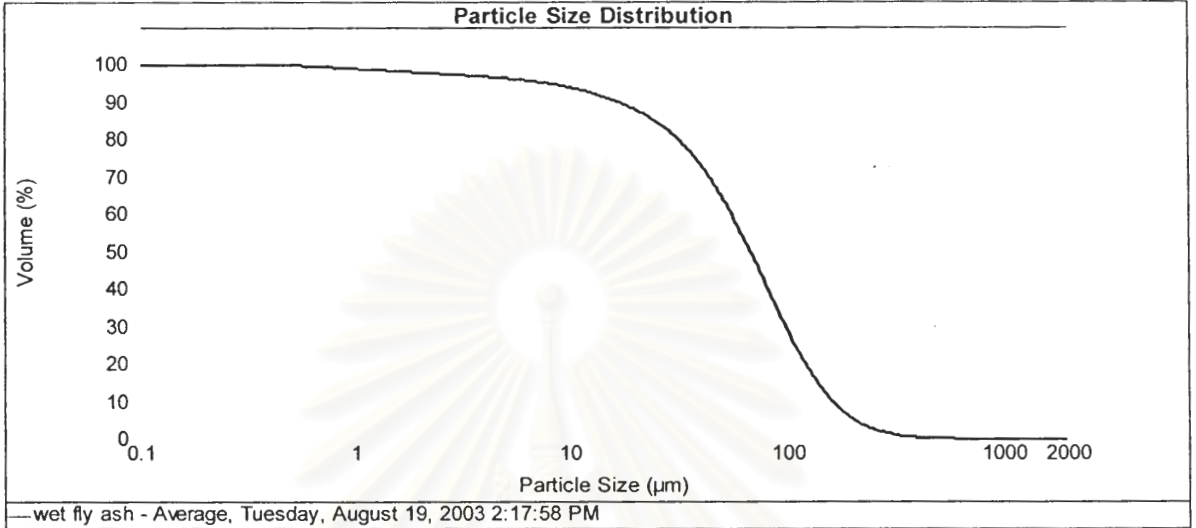
Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.07	7.096	0.07	50.238	3.28	355.656	1.85
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.07	7.962	0.11	56.368	3.93	399.052	1.42
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.07	8.934	0.14	63.246	4.59	447.744	1.05
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.04	10.024	0.17	70.963	5.19	502.377	0.74
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.20	79.621	5.70	563.677	0.45
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.24	89.337	6.08	632.456	0.24
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.27	100.237	6.30	709.627	0.16
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.887	0.31	112.468	6.35	796.214	0.09
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.36	126.191	6.23	893.367	0.05
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.43	141.589	5.96	1002.374	0.02
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.00	22.440	0.54	158.866	5.08	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.01	3.557	0.00	25.179	0.69	178.250	4.54	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.04	3.991	0.00	28.251	0.91	200.000	3.97	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.05	4.477	0.00	31.698	1.21	224.404	3.40	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.06	5.024	0.00	35.566	1.60	251.785	2.85	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.06	5.637	0.00	39.905	2.08	282.508	2.33	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.07	6.325	0.04	44.774	2.64	316.979			
0.142	0.00	1.002		7.096		50.238		355.656			

รูปที่ ๔.4 การกระจายขนาดของตะกอนไลเหนียว

d(0.1): 16.997 um

d(0.5): 68.223 um

d(0.9): 161.670 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.17	7.096	0.43	50.238	5.26	355.656	0.26
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.17	7.962	0.50	56.368	5.74	399.052	0.19
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.17	8.934	0.59	63.246	6.11	447.744	0.14
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.17	10.024	0.68	70.963	6.29	502.377	0.05
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.17	11.247	0.78	79.621	6.28	563.677	0.01
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.17	12.619	0.89	89.337	6.06	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.17	14.159	1.01	100.237	5.65	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.17	15.887	1.15	112.468	5.07	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.17	17.825	1.32	126.191	4.39	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.03	2.825	0.18	20.000	1.53	141.589	3.64	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.07	3.170	0.18	22.440	1.79	158.866	2.91	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.11	3.557	0.19	25.179	2.11	178.250	2.24	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.13	3.991	0.21	28.251	2.50	200.000	1.66	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.15	4.477	0.23	31.698	2.97	224.404	1.19	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.17	5.024	0.26	35.566	3.51	251.785	0.84	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.17	5.637	0.31	39.905	4.09	282.508	0.60	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.17	6.325	0.36	44.774	4.69	316.979	0.39		
0.142	0.00	1.002	0.17	7.096	0.43	50.238	5.26	355.656	0.26		

รูปที่ ๕.5 การกระจายขนาดคละของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน



ภาคผนวก ค.

การหาค่า Optimum Moisture Content

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สูตรการคำนวณ

$$\rho_m = 1000(M_t - M_{md}) / V$$

Where;

$$\rho_m = \text{moist density of specimen and mold, Mg/m}^3$$

$$M_t = \text{mass of moist specimen and mold, kg}$$

$$M_{md} = \text{mass of compaction mold, kg. And}$$

$$V = \text{volume of compaction mold, m}^3$$

$$\rho_d = \rho_m / (1 + w/100)$$

Where;

$$\rho_d = \text{dry density of compacted specimen, Mg/m}^3, \text{ and}$$

$$w = \text{water content, \%}$$

$$\gamma_d = 9.807 \rho_d \text{ in kN/m}^3$$

Where;

$$\gamma_d = \text{dry unit weight of compacted specimen.}$$

$$W_{sat} = \frac{(\gamma_w)G_s - \gamma_d}{(\gamma_d)(G_s)} \times 100$$

Where;

$$W_{sat} = \text{water content for complete saturation, \%}$$

$$\gamma_w = \text{unit weight of water, 9.807 kN/m}^3$$

$$\gamma_d = \text{dry unit weight of soil}$$

$$G_s = \text{specific gravity of soil}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ผ1 การหาค่า Optimum moisture content ของตะกอนโคลนเหนียว

Type of compaction : Standard Proctor

Volume of mold : 0.0009443150 m³

Water Content determination

Density Determination

% water	Wt. Wet waste (grams)	Wt. Dry waste (grams)	Wt. Water (grams)	% water content	Wt. waste in mold (grams)	Wet density (Mg/m ³)	Dry density (Mg/m ³)	Dry unit weight γ_d	W_{sat}
5	112.167	100.377	11.790	11.75	1755	1.86	1.66	16.31	70.80
8	97.367	85.443	11.924	13.96	1805	1.91	1.68	16.45	69.07
10	100.464	86.398	14.066	16.28	1860	1.97	1.69	16.61	67.12
12	100.316	84.787	15.529	18.31	1920	2.03	1.72	16.85	64.28
14	120.927	100.644	20.283	20.15	1965	2.08	1.73	16.98	62.76
16	125.826	103.135	22.691	22.00	2000	2.12	1.74	17.02	62.32
18	95.265	76.487	18.778	24.55	2060	2.18	1.75	17.18	60.62
20	105.738	83.624	22.114	26.44	2100	2.22	1.76	17.25	59.83
23	103.685	80.432	23.253	28.91	2160	2.29	1.77	17.40	58.17
26	110.214	83.475	26.739	32.03	2220	2.35	1.78	17.46	57.53

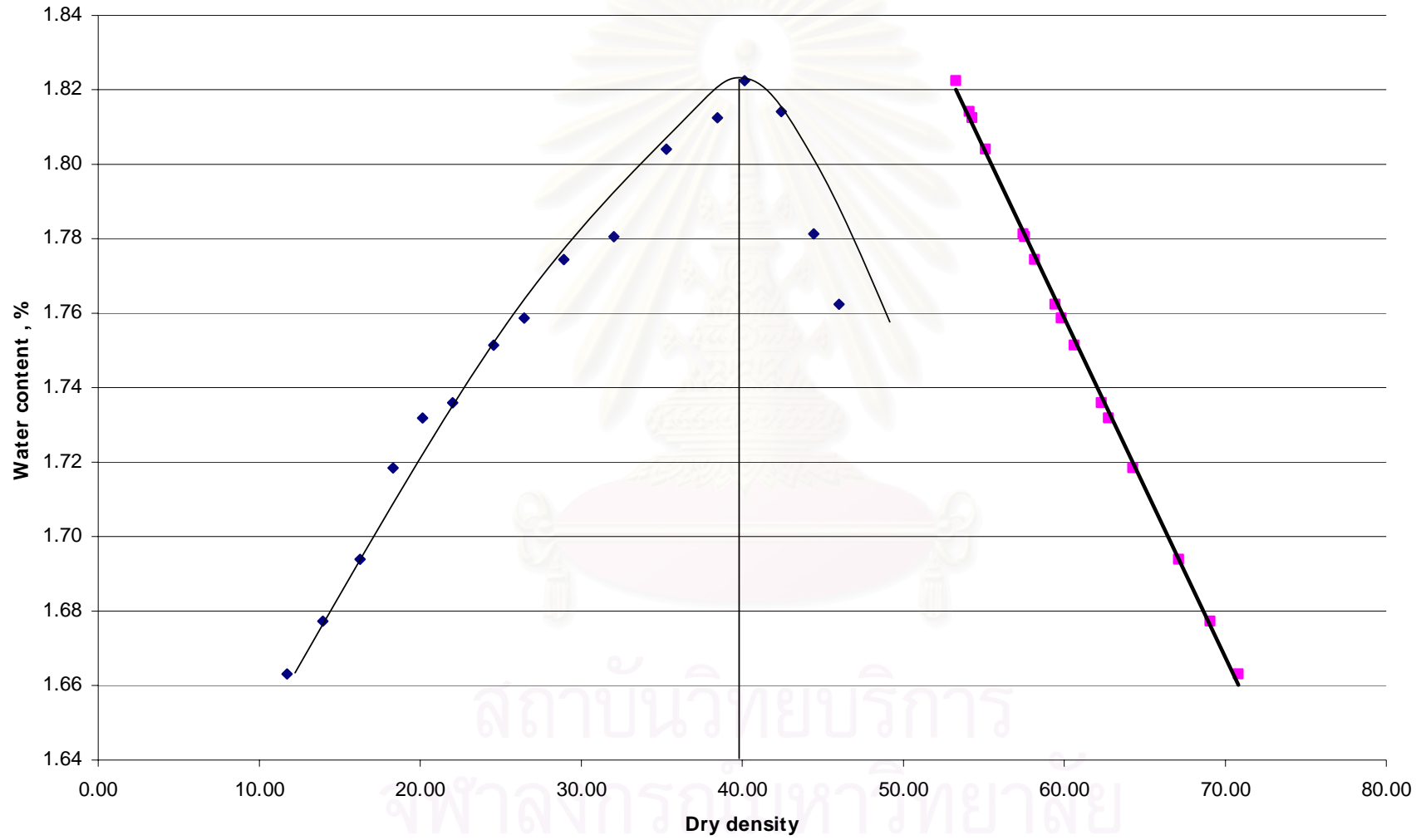
ตาราง ผ1 (ต่อ)

Water Content determination

Density Determination

% water	Wt. Wet waste (grams)	Wt. Dry waste (grams)	Wt. Water (grams)	% water content	Wt. waste in mold (grams)	Wet density (Mg/m ³)	Dry density (Mg/m ³)	Dry unit weight γ_d	W_{sat}
29	90.523	66.906	23.617	35.30	2305	2.44	1.80	17.69	55.12
32	100.216	72.3761	27.840	38.47	2370	2.51	1.81	17.78	54.27
35	99.019	70.6565	28.363	40.14	2430	2.57	1.84	18.01	53.28
38	125.506	88.1209	37.385	42.42	2440	2.58	1.81	17.79	54.1
40	126.994	87.9131	39.081	44.45	2430	2.57	1.78	17.47	57.44
41	99.998	68.4859	31.512	46.01	2430	2.57	1.76	17.28	59.45

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๘.6 แสดงค่า Optimum moisture content ของตะกอนโคละหนัก

ตาราง ผ2 การหาค่า Optimum moisture content ของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

Type of compaction : Standard Proctor

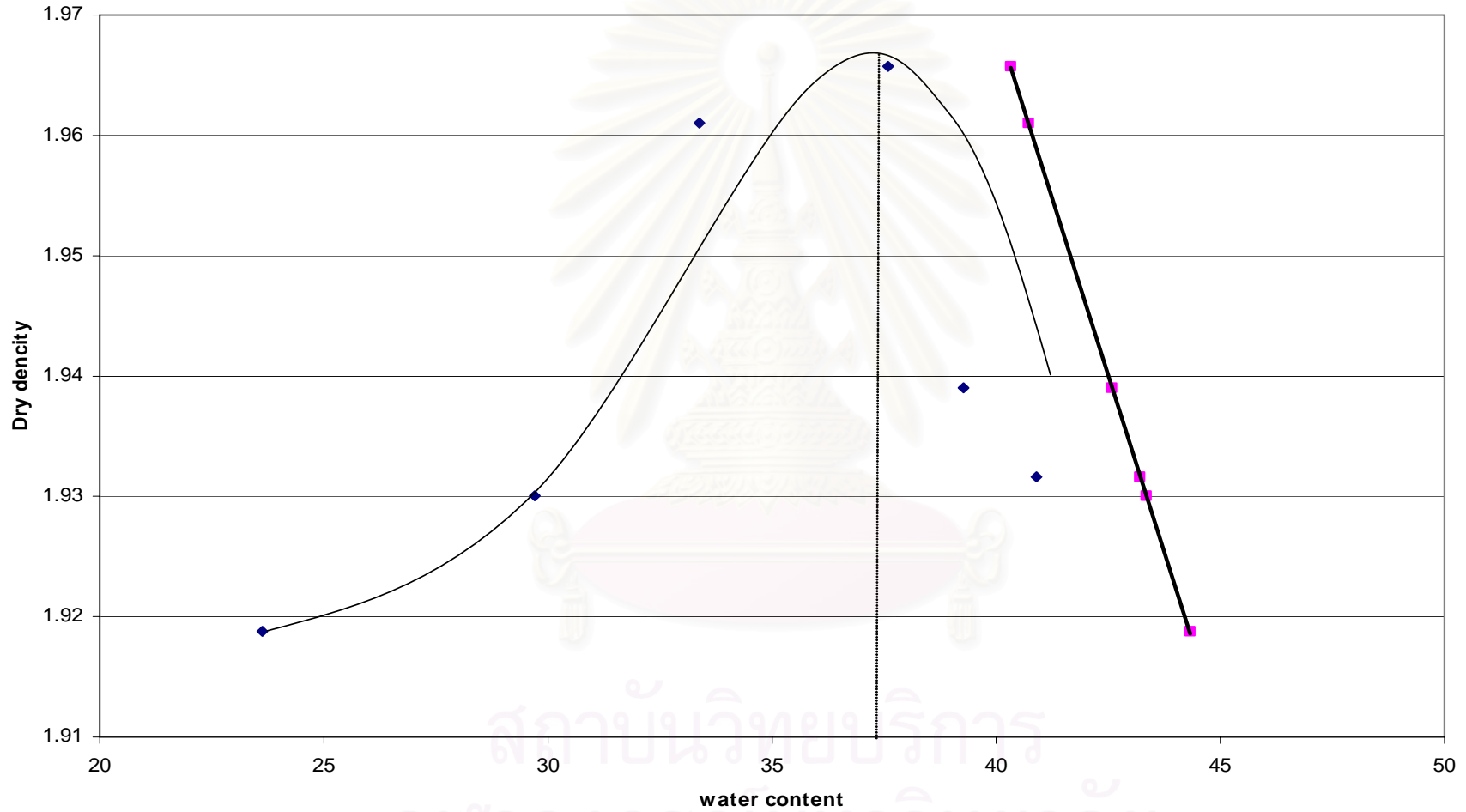
Volume of mold : 0.0009443150 m³

Water Content determination

Density Determination

% water	Wt. Wet waste (grams)	Wt. Dry waste (grams)	Wt. Water (grams)	% water content	Wt. waste in mold (grams)	Wet density (Mg/m ³)	Dry density (Mg/m ³)	Dry weight unit γ_d	unit	W _{sat}
5	110.412	89.312	21.100	23.62	2240	2.37	1.92	18.82		44.33
10	113.18	87.258	25.922	29.71	2364	2.50	1.93	18.93		43.35
13	107.592	80.665	26.928	33.38	2470	2.62	1.96	19.23		40.72
16	92.755	67.416	25.339	37.59	2554	2.70	1.97	19.28		40.33
18	116.421	83.596	32.825	39.27	2550	2.70	1.94	19.02		42.58
20	106.448	75.552	30.896	40.89	2570	2.72	1.93	18.94		43.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๗.7 แสดงค่า Optimum moisture content ของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน



ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.3 ผลการทดสอบปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน
ตามการทดลองที่ 4.2

อัตราส่วน FA/OPC	อัตราส่วน S/B	ปริมาณทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)				
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
0	0	0	0	0	-	0.00
	0.25	0.068	0.076	0.048	0.064	0.01
	0.50	0.091	0.076	0.088	0.085	0.01
	0.75	0.226	0.185	0.198	0.203	0.02
	1.00	0.282	0.317	0.283	0.294	0.02
	1.25	0.511	0.407	0.429	0.449	0.05
1:3	0	0.088	0.072	0.08	0.080	0.01
	0.25	0.041	0.058	0.066	0.055	0.01
	0.50	0.241	0.261	0.25	0.251	0.01
	0.75	0.327	0.321	0.3	0.316	0.01
	1.00	0.414	0.447	0.389	0.417	0.03
	1.25	0.761	0.71	0.742	0.738	0.03
1:1	0	0.092	0.128	0.08	0.100	0.02
	0.25	0.266	0.271	0.229	0.255	0.02
	0.50	0.445	0.439	0.408	0.431	0.02
	0.75	0.636	0.618	0.609	0.621	0.01
	1.00	0.708	0.655	0.691	0.685	0.03
	1.25	1.176	0.998	1.356	1.177	0.18
3:1	0	0.15	0.148	0.124	0.141	0.01
	0.25	0.302	0.314	0.311	0.309	0.01
	0.50	0.494	0.512	0.463	0.490	0.02
	0.75	0.834	0.795	0.847	0.825	0.03
	1.00	1.38	0.987	1.023	1.130	0.22
	1.25	1.322	1.245	1.201	1.256	0.06

ตารางที่ ๘.4 ผลการทดสอบปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน
ตามการทดลองที่ 4.2

อัตราส่วน FA/OPC	อัตราส่วน S/B	ปริมาณสังกะสี (มิลลิกรัม/ลิตร)				
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.81	0.72	0.93	0.82	0.11
	0.50	1.62	1.96	1.91	1.83	0.18
	0.75	2.18	2.25	1.93	2.12	0.17
	1.00	2.52	2.63	2.56	2.57	0.06
	1.25	3.27	3.12	3.03	3.14	0.12
1:3	0	0.23	0.14	0.23	0.20	0.05
	0.25	1.28	1.27	0.96	1.17	0.18
	0.50	2.55	2.33	2.26	2.38	0.15
	0.75	3.13	3.40	3.31	3.28	0.14
	1.00	3.21	3.13	3.08	3.14	0.07
	1.25	3.98	4.10	3.71	3.93	0.20
1:1	0	0.37	0.20	0.15	0.24	0.12
	0.25	1.47	1.51	1.28	1.42	0.12
	0.50	3.34	3.07	3.25	3.22	0.14
	0.75	3.77	3.74	3.83	3.78	0.05
	1.00	4.14	4.32	4.05	4.17	0.14
	1.25	5.03	4.98	4.84	4.95	0.10
3:1	0	0.38	0.31	0.36	0.35	0.04
	0.25	3.61	3.67	3.43	3.57	0.12
	0.50	4.07	3.98	4.04	4.03	0.05
	0.75	4.03	4.16	4.47	4.22	0.23
	1.00	5.05	4.90	5.02	4.99	0.08
	1.25	5.85	5.97	5.61	5.81	0.18

ตารางที่ ผ.5 ผลการทดสอบปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ตาม
การทดลองที่ 4.2

อัตราส่วน FA/OPC	อัตราส่วน S/B	ปริมาณตะกั่ว (มิลลิกรัม/ลิตร)				
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.79	0.73	0.64	0.72	0.08
	0.50	1.38	1.21	0.98	1.19	0.20
	0.75	1.87	1.77	1.67	1.77	0.10
	1.00	2.30	1.96	2.31	2.19	0.20
	1.25	2.62	2.83	2.77	2.74	0.11
1:3	0	0.14	0.12	0.16	0.14	0.02
	0.25	1.27	1.11	1.31	1.23	0.11
	0.50	2.39	2.35	2.52	2.42	0.09
	0.75	2.48	2.37	2.20	2.35	0.14
	1.00	2.83	2.67	2.66	2.72	0.10
	1.25	3.40	3.46	3.52	3.46	0.06
1:1	0	0.16	0.14	0.12	0.14	0.02
	0.25	1.38	1.17	1.32	1.29	0.11
	0.50	2.49	2.54	2.29	2.44	0.13
	0.75	3.38	3.50	3.41	3.43	0.06
	1.00	3.29	3.32	3.14	3.25	0.10
	1.25	4.84	4.67	4.56	4.69	0.14
3:1	0	0.29	0.28	0.18	0.25	0.06
	0.25	2.55	2.76	2.28	2.53	0.24
	0.50	2.70	2.58	2.61	2.63	0.06
	0.75	3.65	3.53	3.47	3.55	0.09
	1.00	3.76	3.96	3.95	3.89	0.11
	1.25	5.41	5.19	5.57	5.39	0.19

ตารางที่ ผ.6 ผลการทดสอบปริมาณทองแดงในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ตามการทดลองที่ 4.3

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ปริมาณทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
3	0.82	0.94	0.92	0.89	0.06
7	0.75	0.64	0.75	0.71	0.06
14	0.71	0.62	0.75	0.69	0.07
28	0.62	0.75	0.81	0.73	0.09

ตารางที่ ผ.7 ผลการทดสอบปริมาณสังกะสีในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ตามการทดลองที่ 4.3

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ปริมาณทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
3	3.87	3.93	3.96	3.92	0.05
7	3.94	3.86	3.72	3.84	0.11
14	3.61	3.98	3.75	3.78	0.19
28	3.54	3.61	3.50	3.55	0.06

ตารางที่ ผ.8 ผลการทดสอบปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ตามการทดลองที่ 4.3

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ปริมาณทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
3	3.24	3.19	3.22	3.22	0.03
7	3.56	3.53	3.51	3.53	0.03
14	3.35	3.27	3.36	3.33	0.05
28	3.63	3.62	3.67	3.64	0.03

ตาราง ผ.9 ผลการทดสอบค่าพีเอชจากการชะละลายของตัวอย่าง ตามการทดลองที่ 4.3

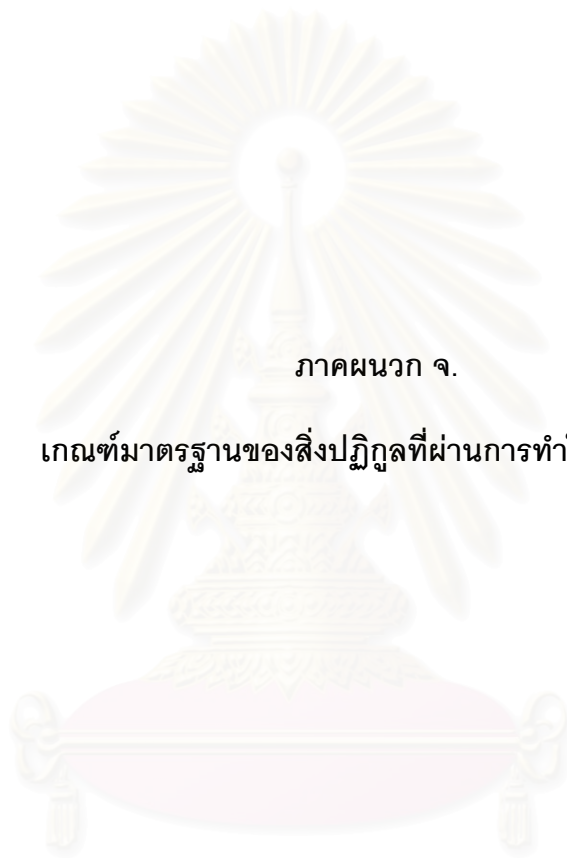
ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่าพีเอช				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
3	12.20	12.30	12.24	12.25	0.05
7	12.20	12.15	12.19	12.18	0.03
14	11.80	11.85	11.81	11.82	0.03
28	11.66	11.66	11.66	11.66	0.00

ตาราง ผ.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง ตามการทดลองที่ 4.3

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
3	7.18	8.00	6.00	7.06	1.01
7	60.00	72.00	60.00	64.00	6.93
14	112.00	96.00	98.00	102.67	8.71
28	129.00	100.00	97.00	108.00	17.67

ตาราง ผ.11 ผลการทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่าง ตามการทดลองที่ 4.3

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ความหนาแน่น (ตัน/ลูกบาศก์เมตร)				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
3	1.57	1.61	1.56	1.58	0.03
7	1.42	1.40	1.42	1.41	0.01
14	1.40	1.42	1.43	1.42	0.02
28	1.53	1.49	1.49	1.50	0.02



ภาคผนวก จ.

เกณฑ์มาตรฐานของสิ่งปฏิภูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณสมบัติของสิ่งปฏิภูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้ว

สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ใช้แล้วที่ผ่านการปรับเสถียร (Stabilization) และทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) แล้วต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. สามารถรับแรงอัดซึ่งทดสอบตามมาตรฐานได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบได้อย่างปลอดภัย
2. มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
3. มีความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดเป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสารตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2540)

ตาราง ผ 18 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ปริมาณสารในน้ำสกัด

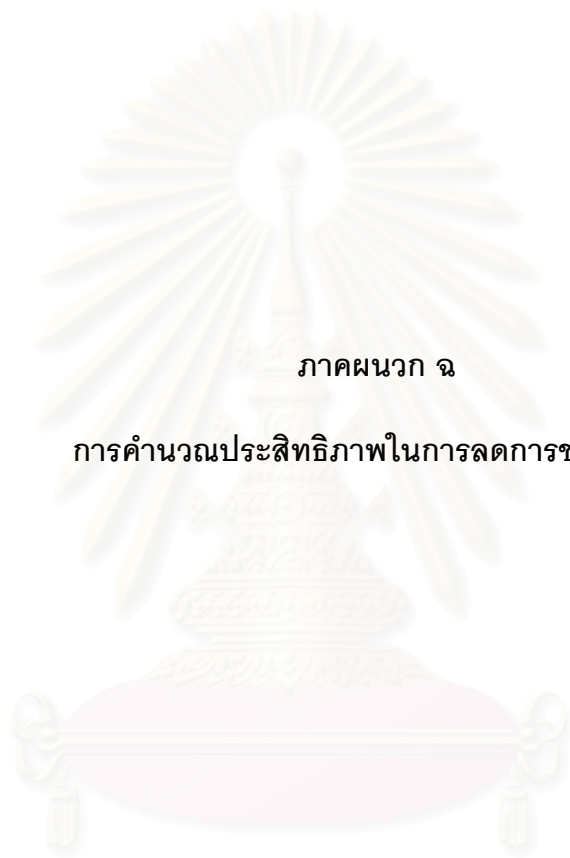
ชนิดของสาร	ปริมาณ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ชนิดของสาร	ปริมาณ (มิลลิกรัม/ลิตร)
อาร์เซนิก (ทั้งหมด)	5.0	เฮกซาคอโรบิวทาไดอิน	0.5
แบเรียม	100.0	เฮกซาคอโรอีเธน	3.0
เบนซีน	0.5	ตะกั่ว	5.0
แคดเมียม (ทั้งหมด)	1.0	ลินเดน	0.4
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	0.5	ปรอท	0.2
คลอเดน	0.0	เมธอกซีคลอร์	10.0
คลอโรเบนซีน	100.0	เมธิล เอธิล คีโตน	200.0
คลอโรฟอร์ม	6.0	ไนโตรเบนซีน	2.0
โครเมียม (ทั้งหมด)	5.0	2,4 ไนโตรโทลูอิน	0.13
ออร์โท-ครีซอล	200.0	เพนตาคลอโรฟีนอล	100.0
เมทา-ครีซอล	200.0	ไพรีดีน	5.0
พารา-ครีซอล	200.0	ซีลีเนียม	1.0
ครีซอล (ทั้งหมด)	200.0	เงิน	5.0
2-4 ดี	10.0	เตตระคลอโรเอทธิลีน	0.7
1,4 ไดคลอโรเบนซีน	7.5	ทอกซาฟีน	0.5
1,2 ไดคลอโรอีเธน	0.5	ไตรคลอโรเอทธิลีน	0.5
1,1 ไดคลอโรเอทธิลีน	0.7	2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล	400.0
เอลดริน	0.02	2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล	2.0
เฮปตาคลอไรด์	0.008	2,4,5 ทีพี (ซิลเว็ก)	1.0
เฮกซาคอโรเบนซีน	0.13	ไวนิล คลอไรด์	0.2

ตาราง ผ 19 คุณลักษณะน้ำทิ้งที่กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539)

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (มิลลิกรัม/ลิตร)
ปรอท	0.005
เซเลเนียม	0.02
แคดเมียม	0.03
ตะกั่ว	0.20
อาร์เซนิก	0.25
โครเมียม	
- Hexavalent Cromium	0.25
- Trivalent Cromium	0.75
บาเรียม	1
นิกเกิล	1
ทองแดง	2
สังกะสี	5
แมงกานีส	5

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2539

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

การคำนวณประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ความสามารถในการถูกชะละลาย

คำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$L = W_i / W_o$$

เมื่อ

$$L = \text{ความสามารถในการถูกชะละลาย}$$

$$W_i = \text{น้ำหนักของตะกอนโลหะหนักที่ถูกชะละลาย ออกมาจากตัวอย่างมีหน่วยเป็นมิลลิกรัม}$$

$$W_o = \text{น้ำหนักของตะกอนโลหะหนักที่มีอยู่ในตัวอย่างทั้งหมดมีหน่วยเป็นกรัม}$$

1.1 ความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนักก่อนการทำลายฤทธิ์

จากข้อมูลในตาราง 4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดเท่ากับ 28.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } W_i &= 28.7 \text{ (มิลลิกรัม/ลิตร)} \times (2 \text{ ลิตร}) \\ &= 57.4 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

ใช้ตัวอย่าง 100 กรัมในการทดสอบการชะละลาย ซึ่งตะกอนโลหะหนัก 1 กรัมจะมีตะกั่ว 20.72 มิลลิกรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } W_o &= (100 \text{ กรัม}) \times (20.72 \text{ มิลลิกรัม/กรัม}) \\ &= 2.072 \text{ กรัม} \\ L_o &= W_i / W_o \\ &= (57.40 \text{ มิลลิกรัม}) / (2.072 \text{ กรัม}) \\ &= 27.70 \text{ มิลลิกรัม / กรัม} \end{aligned}$$

1.2 ความสามารถในการถูกชะละลายของตะกั่วหลังการทำให้เป็นก้อน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.13 ที่อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสานเป็น 0.25 และอัตราส่วนละลายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0 พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดเท่ากับ 0.72 มิลลิกรัม/ลิตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } W_i &= (0.72 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}) \times (2 \text{ ลิตร}) \\ &= 1.44 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

ใช้ตัวอย่าง 100 กรัมที่ประกอบด้วยตะกอนโลหะหนัก 0.2 ส่วน ตัวประสาน 0.8 ส่วน และน้ำ 0.468 ส่วน

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณตะกอนโลหะหนักในตัวอย่าง} &= [0.2/(0.2+0.8+0.468)] \times (100 \text{ กรัม}) \\
 &= 13.62 \text{ กรัม} \\
 W_o &= (13.62 \text{ กรัม}) \times (20.72 \text{ มิลลิกรัม/กรัม}) / 1000 \\
 &= 0.282 \text{ กรัม} \\
 L_s &= (1.44 \text{ มิลลิกรัม}) / (0.282 \text{ กรัม}) \\
 &= 5.101 \text{ มิลลิกรัม/กรัม}
 \end{aligned}$$

2. ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย

คำนวณจากสูตรดังนี้

$$\begin{aligned}
 E &= [(L_o - L_s) / L_o] \times 100 \\
 E &= \text{ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย (\%)} \\
 L_o &= \text{ความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนัก} \\
 &\quad \text{ก่อนการทำให้เป็นก้อน มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/} \\
 &\quad \text{กรัม} \\
 L_s &= \text{ความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนัก} \\
 &\quad \text{ภายหลังการทำให้เป็นก้อนมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/} \\
 &\quad \text{กรัม}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจากค่าตัวอย่างข้างต้นสามารถคำนวณประสิทธิภาพในการลดการชะละลายได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 E &= [(27.70 - 5.10) / (27.70)] \times 100 \\
 &= 81.58 \%
 \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกรทิพย์ เชี่ยวชาญ เกิดเมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2519 สำเร็จการศึกษาปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา
2541 และได้เข้ารับการศึกษาดูในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย