



วิทยานิพนธ์

กลไกการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมในซีเมนต์

**MECHANISM OF ZINC AND CHROMIUM
ENCAPSULATION IN CEMENT**

นายเฉลิมชัย ตระกูลสุดฟ่อง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง กลไกการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมในซีเมนต์

Mechanism of Zinc and Chromium Encapsulation in Cement

นามผู้วิจัย นายเฉลิมชัย ตระกูลผุดผ่อง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์กษิราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.Appl.Sc.)

กรรมการ

(อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

กลไกการเก็บกักตั้งกะสีและโครเมียมในซีเมนต์

Mechanism of Zinc and Chromium Encapsulation in Cement

โดย

นายเฉลิมชัย ตระกูลหุดฟ่อง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2551

เฉลิมชัย ตระกูลหุคผ่อง 2551: กลไกการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมในซีเมนต์
ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.Appl.Sc. 99 หน้า

การจัดการของเสียอันตรายโดยการทำให้แข็งด้วยปูนซีเมนต์เป็นวิธีการที่ให้ผลเป็นที่
ยอมรับ และใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการศึกษาติดตามว่าเมื่อโลหะถูกทำให้แข็งแล้วจะถูกเก็บกัก
ไว้ในส่วนใดของก้อนซีเมนต์ โดยใช้กากตะกอนจากโรงชุบโลหะมาผสมกับปูนซีเมนต์ที่สัดส่วน
ปูนซีเมนต์ ต่อ กากตะกอน เท่ากับ 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 4:6 และ 3:7 หล่อเป็นลูกบาศก์ขนาด 5x5x5
ซม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด และก้อนรูปทรงกระบอกขนาด ϕ 4x8 ซม. สำหรับบิบน้ำที่
อยู่ในช่องว่าง (pore water) ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน แล้ววิเคราะห์ปริมาณสังกะสีและโครเมียมที่อยู่ใน
pore water และที่อยู่ในเนื้อซีเมนต์เวสต์โดยการชะละลายด้วยวิธี TCLP และ โดยการย่อยด้วย
กรด จากการวิเคราะห์พบว่ากากตะกอนดิบมีสังกะสี 284 mg/g (กากตะกอน) โครเมียม 39 mg/g
(กากตะกอน) โดยวิธี TCLP พบสังกะสีถูกชะละลาย 15 mg/g (กากตะกอน) โครเมียม 0.74 mg/g
(กากตะกอน) เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ การชะละลายของสังกะสีและโครเมียม
ลดลง สามารถผ่านเกณฑ์ของกรมโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับการฝังในหลุมฝังกลบแบบ
ปลอดภัยได้ อย่างไรก็ตามปริมาณการชะละลายจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนกากตะกอน ทั้งนี้ปริมาณ
สังกะสีและโครเมียมจากการย่อยก้อนซีเมนต์เวสต์ไม่แตกต่างจากปริมาณที่มีในตะกอนดิบมาก
นัก จากการเปรียบเทียบปริมาณโลหะในส่วนต่างๆของก้อนตัวอย่างพบว่า สังกะสีและโครเมียม
ถูกชะละลายออกมาเพียง 13% (2 mg/g กากตะกอน) และ 8% (0.06 mg/g กากตะกอน) ตามลำดับ
ส่วนที่อยู่ในช่องว่าง (pore water) มีเพียง 0.003% (0.008 mg/g กากตะกอน) และ 0.01% (0.004
mg/g กากตะกอน) ตามลำดับโดยที่มากกว่า 90% ของสังกะสีและโครเมียม อยู่ในเนื้อของ
ซีเมนต์เวสต์ด้วยวิธีการย่อย

Chalermchai Trakulphudphong 2008: Mechanism of Zinc and Chromium Encapsulation in Cement. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Patcharaporn Suwanvitaya, M.Appl.Sc. 99 pages.

Solidification in cement is widely use for hazardous waste. This study aimed to determine the containment mechanism of metal in cement. Sludge from electroplating factory was used in the study. The proportions of the cement to sludge used were 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 4:6 and 3:7. Specimens used were 5x5x5 cm. cube for compressive strength determination at the ages of 3, 7 and 28 days and 4x8 cm. cylinders for pore water expression. The amount of zinc and chromium in 3 portions namely in pore water, in leachate (by TCLP) and acid extraction from the cement-sludge matrix were determined. The solutions were then analysed for the amount of zinc and chromium. It was found that for untreated sludge the amount of zinc and chromium in mg/g sludge were 284 and 39 respectively, and only 15 and 0.74 respectively were found in the the leachate. After containment in cement, the amount of zinc and chromium in the leachate were less than those leached from raw sludge, conformed to the standard for secure landfill set by DOI. However the amount in the leachate increased with an increasing in sludge proportions. It was also found that the amount of zinc and chromium in mg/g sludge remained rather unchanged, at 300 and 36. Comparison of the amounts in the 3 portions showed that only small fraction of zinc and chromium were found in leachate 13% (2 mg/g sludge and 8% (0.06 mg/g sludge) in pore water 0.003% (0.008 mg/g sludge) and 0.01% (0.004 mg/g sludge). 90% of total amount was obtained from acid digestion portion.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ. ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา และ อ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อคิด คำแนะนำในการทดลองต่าง ๆ การทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจน บทความในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 ขอขอบคุณโรงพยาบาลเพชรเกษม ที่เอื้อเฟื้ออากตะกอนในการทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ข้าพเจ้าได้ใช้เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลอง ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจให้ในการทำวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะต่าง ๆ และเป็นกำลังใจ ให้ข้าพเจ้าตลอดมา

เฉลิมชัย ตระกูลผุดผ่อง

พฤษภาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วัสดุและสารเคมี	23
วิธีการ	24
ผลและวิจารณ์	27
ผล	27
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ภาคผนวก	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณของเสียอันตราย แยกตามประเภทและปี	5
2	คุณลักษณะกากตะกอน โลหะที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียจาก โรงงานชุบโลหะ ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมเสมต้า	6
3	โลหะต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติแสดงความเป็นพิษ	9
4	องค์ประกอบที่เป็นค่าออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	18
5	ค่ามาตรฐานจาก US EPA	22
6	วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอน โลหะหนัก	24
7	คุณสมบัติของกากตะกอน โลหะหนัก	28
8	องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าลอยและตะกอน โลหะหนัก	31
9	ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยและตะกอนโลหะหนัก โดยวิธีการย่อยตะกอน	32
10	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายจากเถ้าลอย และตะกอน โลหะหนัก ด้วยกรดอะซิติก	32
11	แสดงปริมาณน้ำที่จุดความชื้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency)	34
12	กำลังรับแรงอัดปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอน โลหะหนัก (ซีเมนต์เวสต์)	35
13	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง Geopolymer ผสมกากตะกอน	38
14	เปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เวสต์กับจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอน	39
15	ความหนาแน่นเฉลี่ยของซีเมนต์เวสต์และจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอน	41
16	การชะละลายของสังกะสีในก้อนตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP	42
17	การชะละลายของสังกะสีในก้อนตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP	42
18	การชะละลายของโครเมียมในก้อนตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP	44
19	การชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP	44
20	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ที่ผสมกากตะกอน (มก./ล.) โดยวิธี TCLP	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ที่ผสมกากตะกอน (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP	47
22	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ที่ผสมกากตะกอน (มก./ล.) โดย วิธี TCLP	48
23	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ผสมกากตะกอน (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP	49
24	ปริมาณสังกะสี (mg/l) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (Pore water)	52
25	ปริมาณสังกะสี (mg/g sludge) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (Pore water)	52
26	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP	54
27	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/g sludge) โดยวิธี TCLP	54
28	ปริมาณสังกะสีจาก Extraction by Acid ของซีเมนต์เวสต์ (อายุ 28 วัน)	56
29	ปริมาณโครเมียม (mg/l) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (Pore water)	58
30	ปริมาณโครเมียม (mg/g sludge) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (Pore water)	59
31	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/l) โดยวิธี TCLP	60
32	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/g. sludge) โดยวิธี TCLP	61
33	ปริมาณโครเมียมจากย่อย (Extraction by Acid) ของซีเมนต์เวสต์ อายุ 28 วัน	63
34	สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสี (28 วัน)	65
35	สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (28 วัน)	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	อัตราส่วนแก้ลยต่อสารละลาย และอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์ (แก้ลยต่อสารละลาย) กับกากตะกอนโลหะหนัก	87
2	ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) หลังแช่กรดของซีเมนต์เวสต์ ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.	95
3	ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) หลังแช่กรดของซีเมนต์เวสต์ ขนาด ϕ 40 x 80 มม.	95
4	ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของ Geopolymer หลังแช่กรด ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.	96

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาพถ่ายแสดงลักษณะตะกอนโลหะหนักที่ได้จากโรงชุบเพชรเกษม	7
2	ตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอน (ซีเมนต์เวสต์)	17
3	กากตะกอนโลหะหนัก (เปียก)	27
4	กากตะกอนโลหะหนักที่อบแห้ง	28
5	ส่วนประกอบทางกายภาพของกากตะกอนโลหะหนักโรงชุบเพชรเกษม	29
6	ปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการวิเคราะห์กากตะกอนโลหะหนัก โรงชุบเพชรเกษม	29
7	กราฟแสดงปริมาณน้ำที่จุดความชื้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency)	33
8	ภาพแสดงลักษณะตัวอย่างซีเมนต์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนัก (ซีเมนต์เวสต์)	34
9	กำลังรับแรงอัดซีเมนต์เพสต์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนัก (ซีเมนต์เวสต์)	36
10	ภาพถ่ายแสดงตัวอย่าง Geopolymer ที่ผสมด้วยกากตะกอนโลหะหนัก	37
11	กำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง Geopolymer ผสมกากตะกอน	38
12	เปรียบเทียบกำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์และจีโอโพลิเมอร์ ผสมกับกากตะกอน	40
13	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP	43
14	การชะละลายของสังกะสีในตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ก. Sludge) โดยวิธี TCLP	43
15	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP	45
16	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก./ก.sludge) โดยวิธี TCLP	45
17	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ที่ผสมกากตะกอน (มก./ล.) โดยวิธี TCLP	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer (มก./ก sludge) โดยวิธี TCLP	48
19	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ผสมกากตะกอน (มก./ล.) โดยวิธี TCLP	49
20	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ผสมกากตะกอน (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP	50
21	ปริมาณสังกะสี (mg/l) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)	53
22	ปริมาณสังกะสี (mg/g sludge) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)	53
23	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก. /ล.) โดยวิธี TCLP	55
24	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/g sludge) โดยวิธี TCLP	55
25	ปริมาณสังกะสี (mg/l) จากการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid)	57
26	ปริมาณสังกะสี (mg/g sludge) จากการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid)	57
27	ปริมาณโครเมียม (mg/l) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (Pore water)	59
28	ปริมาณโครเมียม (mg/g sludge) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (Pore water)	60
29	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/l) โดยวิธี TCLP	61
30	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/g sludge) โดยวิธี TCLP	62
31	ปริมาณโครเมียม (mg/l) จากการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid)	63
32	ปริมาณโครเมียม (mg/g sludge) จากการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid)	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	ขั้นตอนการทดสอบ	79
2	ตัวอย่างซีเมนต์ผสมสมภาคตะกอนโลหะหนักขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มม. X 80 มม.	90
3	แท่นบีบตัวคายน้ำ (Pore water Expresser)	90
4	การวางตัวอย่างทดสอบบนแท่นบีบตัวคายน้ำ (Pore water Expresser)	91
5	เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal testing machine)	91
6	ภาพถ่ายแสดงการอัดตัวอย่างซีเมนต์เวสต์	92
7	ภาพถ่ายแสดงน้ำที่ไหลจากการอัดตัวอย่างซีเมนต์เวสต์	92
8	กราฟแสดงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (หลังแช่กรดอะซิติก)	96
9	กราฟแสดงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ ขนาด ϕ 40 x 80 มม. (หลังแช่กรดอะซิติก)	97
10	กราฟแสดงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่าง Geopolymer ผสมภาค ตะกอน ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (หลังแช่กรดอะซิติก)	97
11	ความสามารถในการละลายของโลหะที่ pH ต่างๆ	98

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ก.	กรัม
กก.	กิโลกรัม
กก./ตร.ซม.	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
กก./ม. ³	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ซม.	นิ้ว โมง
ซม.	เซนติเมตร
มก.	มิลลิกรัม
มก./ก.	มิลลิกรัมของโลหะหนักที่ถูกชะต่อกรัมของโลหะหนักที่มีอยู่ เริ่มต้น
มก./กก.	มิลลิกรัมของโลหะหนักต่อกิโลกรัมของตะกอน
มก./ล.	มิลลิกรัมต่อลิตร
มม. ²	ตารางมิลลิเมตร
นน.	น้ำหนัก
ศูนย์บริการกำจัดกากฯ	ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมเสมาคำ บางขุนเทียน
พ.ท.	พื้นที่
AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ag	เงิน
As	อาร์เซนิก
Be	แบริลเรียม
°C	องศาเซลเซียส
Cd	แคดเมียม
cm	เซนติเมตร
cm ³	ลูกบาศก์เซนติเมตร
Conc.	Concentration
Cr	โครเมียม
Cu	ทองแดง
EP	Extraction Procedure

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

EP-EPA	Extraction Procedure โดย EPA
Fe	เหล็ก
g	กรัม
Hg	ปรอท
US-EPA	The U.S. Environmental Protection Agency
kg.	กิโลกรัม
kg./cm ²	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
mg./g	มิลลิกรัมของโลหะหนักที่ถูกชะต่อกรัมของโลหะหนักที่มีอยู่ เริ่มต้น
mg./kg	มิลลิกรัมของโลหะหนักต่อกิโลกรัมของตะกอน
mg./l.	มิลลิกรัมต่อลิตร
ml	มิลลิลิตร
mm. ²	ตารางมิลลิเมตร
Mn	แมงกานีส
Ni	นิกเกิล
Pb	ตะกั่ว
ppb	หนึ่งในพันล้านส่วน
ppm	หนึ่งในล้านส่วน
Sb	แอนติโมนี
Se	เซเลเนียม
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
Th	ทาลเลียม
Zn	สังกะสี

กลไกการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมในซีเมนต์

Mechanism of Zinc and Chromium Encapsulation in Cement

คำนำ

ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่เหลือใช้จากการผลิต หรือกระบวนการต่างๆ ในการผลิต อาจมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น สังกะสี โครเมียม แคดเมียม ตะกั่ว ปรอท เหล็ก ทองแดง เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่จะปนอยู่กับปริมาณน้ำเสีย หรือกากตะกอน (Sludge) ในโรงงานอุตสาหกรรม โลหะหนักเหล่านี้จำเป็นต้องหาวิธีกำจัดให้เหมาะสมและไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม รวมทั้งสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ

กระบวนการบำบัดของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ทำได้โดยการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียหรือของเสีย แล้วนำกากตะกอน (Sludge cake) ไปกำจัดด้วยวิธีต่างๆ เช่น การบำบัดทางกายภาพ การฝังกลบ (Secured Landfill) การทำให้เป็นของแข็ง หรืออื่นๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือต้องการกำจัดให้ได้อย่างปลอดภัย และไม่เสียดำใช้จายมากเกินไป และที่สำคัญต้องไม่มีการชะละลายหรือปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด

วิธีการกำจัดที่นิยม คือ การตกตะกอนทางเคมีแล้วนำไปทำให้อยู่ในรูปเสถียรหรือการทำให้เป็นก้อนในปูนซีเมนต์ ซึ่งมีความสามารถในการเก็บกักในปูนซีเมนต์สามารถเก็บกักโลหะหนักได้เป็นอย่างดี มีปริมาณโลหะหนักในการชะละลายออกมาจากการทำให้แข็งน้อยมาก (ปกรณ , 2541)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากลไกการเก็บกักโลหะหนักในปูนซีเมนต์ โดยทำการทดสอบปริมาณโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของก้อนตัวอย่าง ได้แก่ ในน้ำช่องว่าง (Pore water) และในเนื้อซีเมนต์ หลังจากแยกน้ำออกจากก้อนตัวอย่างแล้วโดยการย่อยและในส่วนที่ถูกชะละลาย ในก้อนตัวอย่างโดยวิธี TCLP (US EPA, 1992) เพื่อติดตามการเก็บกักโลหะหนักกว่าจะเป็นการยึดไว้ในเนื้อซีเมนต์เพสต์ด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemically Bound) หรือจะถูกเก็บกักด้วยกระบวนการทางกายภาพ (Physically Bound อยู่ใน Pore Solution ของซีเมนต์) ซึ่งกลไกในการเก็บกักจะสามารถกำหนดความแข็งแรงของก้อนซีเมนต์ ที่เก็บกักของเสียจากโลหะหนักได้อย่างปลอดภัย

วัตถุประสงค์

1. หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของกากตะกอนในปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีกำลังอัดมากพอสำหรับนำไปฝังในหลุมฝังกลบตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม
2. หากลดการใช้กากสังกะสีและโครเมียม ในก้อนตัวอย่างซีเมนต์ผสมกากตะกอน โดยหาปริมาณสังกะสีและโครเมียมที่อยู่ในเนื้อซีเมนต์ ในช่องว่าง (pore water) และการชะละลาย ตามมาตรฐาน Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP (US EPA, 1992)

ขอบเขตของการศึกษา

1. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ
2. ตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา เป็นตะกอนโลหะที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุมชนเกษตรกรรม บางขุนเทียน คุณสมบัติต่างๆ ของตะกอนที่ทำการศึกษา ได้แก่
 - ปริมาณความชื้น
 - ปริมาณของแข็งทั้งหมด
 - ปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ทั้งหมด (สารอินทรีย์)
 - ปริมาณของแข็งอนินทรีย์ทั้งหมด
 - ปริมาณสังกะสีและโครเมียม
3. เก็บกักสังกะสีและโครเมียม ในรูป Cement –Waste ในสัดส่วนที่เหมาะสม คือ ให้มีความแข็งแรงและการถูกชะละลายไม่เกินมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด
 - 3.1 ศึกษาปริมาณสังกะสีและโครเมียมในน้ำในช่องว่าง (Pore water) ของก้อนตัวอย่างโดยบีบน้ำจากก้อนซีเมนต์เวสต์ที่แรงกด 120 ตัน
 - 3.2 ศึกษาปริมาณสังกะสีและโครเมียมโดยการชะละลายจากก้อนตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ หลังจากบีบน้ำ
 - 3.3 ศึกษาปริมาณสังกะสีและโครเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในเนื้อซีเมนต์เวสต์หลังจากบีบน้ำ

การตรวจเอกสาร

ของเสียอันตราย (Hazardous Waste)

ของเสียอันตราย หมายถึง ของเสียใดๆ ที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนเป็นวัตถุอันตรายชนิดต่างๆ ซึ่งได้แก่ วัตถุระเบิด วัตถุไวไฟ วัตถุออกซิไดซ์ และวัตถุเปอร์ออกไซด์ วัตถุมีพิษ วัตถุที่ทำให้เกิดโรค วัตถุกัมมันตรังสี วัตถุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม วัตถุกัดกร่อน วัตถุที่ก่อให้เกิดการระคายเคือง วัตถุอย่างอื่นไม่ว่าจะเป็น เคมีภัณฑ์หรือสิ่งอื่นใดที่อาจทำให้เกิดอันตรายแก่บุคคล สัตว์ พืช ทรัพย์สิน หรือสิ่งแวดล้อม (กรมควบคุมมลพิษ)

โลหะหนัก นับเป็นโลหะที่ใช้กันอย่างมากมายในอุตสาหกรรม โรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่ง จำเป็นต้องใช้วัตถุคิบที่มีโลหะหนักเป็นวัตถุดิบในการทำงาน ดังนั้นกากของเสียต่างๆ จึงมีโลหะหนักปะปนออกมาด้วย ทำให้กากตะกอนของเสียต้องได้รับการบำบัดก่อนมีจะนั้นอาจทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของประชาชนได้โลหะหนักที่เป็นพิษ ได้แก่ แบริลเรียม (Be) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) เงิน (Ag) อาร์เซนิก (As) แอนติโมนี (Sb) เซเลเนียม (Se) ทาลเลียม (Tl)ปรอท (Hg) เป็นต้น

1. แหล่งกำเนิดปริมาณของเสียอันตราย

ของเสียอันตรายมีแหล่งกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากเกษตรกรรมและกิจกรรมที่อยู่อาศัยเล็กน้อย ได้แก่

1.1 แหล่งชุมชน

ของเสียจากแหล่งชุมชนไม่ได้จัดเป็นของเสียอันตรายมีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร เศษหนัง และเศษกระดาษ และสารอนินทรีย์ เช่น เศษแก้ว เศษโลหะ เศษวัสดุก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม ของเสียชุมชนอาจเป็นของเสียอันตรายได้ เช่น ถ่านไฟฉายหมดอายุ กระป๋องสารปราบศัตรูพืช ยาหมดอายุ หลอดไฟหมดอายุหรือชำรุดแล้ว แบตเตอรี่หมดอายุ โทรทัศน์ วิทยุ น้ำมันเครื่องเก่า น้ำยาล้างอัดรูป นอกจากนั้น ของเสียอันตรายจากชุมชนอีกประเภทหนึ่งที่ต้องมีการจัดการเฉพาะ ได้แก่ ของเสียจากโรงพยาบาล เนื่องจากเป็นของเสียที่เป็น

แหล่งแพร่กระจายเชื้อโรคนิตต่างๆ สุ่มมนุษย์ ได้อย่างมาก ตัวอย่างของเสียจากโรงพยาบาล ได้แก่ เฝ้ามและกระบอกฉีดยา สำลี พลาสติก สายยางให้อาหาร สายสวนปัสสาวะอุจจาระ สายน้ำเกลือ สายดูดเสมหะ ชิ้นเนื้อส่วนต่างๆ เสมหะ เลือด น้ำในช่องท้อง และน้ำในไขสันหลัง เป็นต้น สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (เดิม) ได้ทำการสำรวจปริมาณขยะติดเชื้อที่เกิดจากโรงพยาบาลในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล พบว่า อัตราของขยะติดเชื้อเฉลี่ยได้ 0.65 ก.ก./เตียง/วัน

1.2 โรงงานอุตสาหกรรม

ตัวอย่างของของเสียที่ไม่เป็นอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม อันได้แก่ เศษวัสดุคืบจากอุตสาหกรรมอาหาร เช่น เศษผัก เศษผลไม้ เศษเนื้อสัตว์ เศษกระป๋อง และบรรจุภัณฑ์เศษผ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ตัวอย่างของเสียอันตราย ซึ่งได้แก่ บรรจุภัณฑ์ของสารปราบศัตรูพืชและสารเคมีต่างๆ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ตะกอนก้นถังกลั่นน้ำยาเคมีต่างๆ และขยะที่มีใยแอสเบสตอสปนเปื้อน รวมทั้งกากตะกอนต่างๆ ที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ ของเสียอันตรายจากแหล่งเกษตรกรรม ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ของสารปราบศัตรูพืชต่างๆ แหล่งกำเนิดของเสียอันตรายที่สำคัญที่สุด คือ โรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากของเสียอันตรายที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีถึงร้อยละ 73-75 ของปริมาณของเสียอันตรายทั้งหมด (มูลนิธิโลกสีเขียว, 2540) นอกจากนั้นบริษัท Engineering Science ได้มีการประเมินว่า โรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นแหล่งกำเนิดของเสียอันตรายร้อยละ 90-92 ของปริมาณของเสียทั้งหมด

การรวบรวมข้อมูลของปริมาณของเสียอันตราย นับได้ว่าเป็นเรื่องที่ยังไม่มีหน่วยใดมารับผิดชอบโดยตรง แต่ในปัจจุบันได้มีการสำรวจและติดตามโรงงานอุตสาหกรรมอย่างใกล้ชิด เพื่อตรวจสอบกากตะกอนของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีกากตะกอนเป็นของเสียอันตราย ในการศึกษาแผนการจัดของเสียอันตรายแห่งชาติ โดยบริษัท Engineering Science ได้เสนอต่อสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เมื่อปี พ.ศ.2532 พบว่า จากปี พ.ศ. 2529 – 2544 มีปริมาณกากตะกอน และของแข็งที่เป็นโลหะหนัก ของเสียประเภทมีฤทธิ์เป็นกรดจะมีปริมาณเพิ่มสูงมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของเสียอื่นๆ ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี จากการรวบรวมข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2544 พบว่าของเสียที่เป็นอันตรายมีรวมกันถึง 3 ล้านตัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2539) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณของเสียอันตราย แยกตามประเภทและปี

ประเภทของเสีย	ปริมาณของเสียอันตราย (ตัน/ปี)		
	2534	2539	2544
น้ำมัน (Oils)	188,254	332,779	589,508
กากสารอินทรีย์เหลว (Liquid)	331	522	876
ตะกอนและของแข็งสารอินทรีย์	6,674	11,951	21,533
ตะกอนและของแข็งสารอนินทรีย์	19,163	31,850	53,696
ตะกอนและของแข็งโลหะ	536,322	946,565	1,658,192
ตัวทำละลาย (Solvents)	36,163	66,532	124,306
ของเสียเป็นกรด (Acid)	31,432	53,793	96,105
ของเสียเป็นด่าง (Alkaline)	9,839	16,846	29,019
ผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐาน	25	52	107
พีซีบี (PCB)	*	*	*
กากสารอินทรีย์น้ำ (Aqueous)	242	499	1,037
น้ำเสียล้างอัตรูป	16,348	30,398	57,809
ขยะชุมชน	11,787	19,090	31,093
ขยะติดเชื้อ	76,078	123,219	200,699
รวม	932,658	1,634,096	2,863,980

หมายเหตุ * = ไม่มีการนำเข้าสู่สาร PCB หลังจาก ปี พ.ศ. 2518

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2539)

2. กากตะกอน

กากตะกอนจะเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้ของเสียอันตรายตกตะกอน มีลักษณะคล้ายวุ้น (Gelatinous Sludge) เพราะมีโมเลกุลของน้ำหุ้มอยู่ โดยรอบอนุภาคตะกอน (Lanovuette 1977)

ลักษณะของกากตะกอนที่มีผู้ทำการศึกษากากตะกอนโลหะหนัก จากศูนย์บริการกำจัดกากตะกอนอุตสาหกรรมแสมดำ บางขุนเทียน ดังรายละเอียด ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะกากตะกอนโลหะที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ

คุณลักษณะ	ค่าเฉลี่ย (โดยน้ำหนักตะกอน)		
	(1) 2537	(2) 2541	(3) 2542
ความชื้น	70.24	71.64	71.14
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	29.76	28.36	28.87
ปริมาณของแข็งระเหย (%)	8.48	5.50	5.98
ปริมาณของแข็งที่เหลือจากการเผาที่ 400-500C ^o , (%)	21.28	22.86	22.89
ปริมาณโลหะหนัก (mg/kg) ของน้ำหนักตกตะกอนแห้ง			
โครเมียม (Cr)	14,360.22	21,031.71	11,830.44
นิกเกิล (Ni)	11,517.47	-	-
ทองแดง (Cu)	6,627.02	7,049.65	811.08
สังกะสี (Zn)	52,143.82	21,956.06	7,805.70
แคดเมียม (Cd)	5.38	0	2.02
เหล็ก (Fe)	-	108,794.50	94,643.37
แมงกานีส (Mn)	-	601.98	1,483.38
ตะกั่ว (Pb)	-	426.67	621.98

ที่มา: ผกา (2537); ปกรณ์ (2541); ชัยศรี (2542)

3. กากตะกอนโลหะหนักในการวิจัย

กากตะกอนโลหะหนักในการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้กากตะกอนจากโรงชุบเพชรเกษม ซึ่งเป็นกากอุตสาหกรรมจากการชุบชิ้นงานโลหะด้วยสังกะสี โดยระบบบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมีของโรงงาน สามารถบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 4000-5000 ลบ.ม./วัน ซึ่งกากตะกอนที่ได้จะเป็นกากตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ หลังจากแยกกากออกจากน้ำจะนำมารวมกันแล้วนำส่งไปยังบริษัทเจนโก้ (Genco) เพื่อนำไปกำจัดต่อไป



ภาพที่ 1 ภาพถ่ายแสดงลักษณะตะกอนโลหะหนักที่ได้จากโรงชุบเพชรเกษม

โลหะหนัก (Heavy Metal)

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุโลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมสูงกว่าธาตุแคลเซียม (Atomic number =20) หรือมีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ (ตารางธาตุมีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ) มีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอท มีรูปโลหะ มีทั้งเป็นไอออนและสารประกอบ

โลหะหนักเป็นสารประกอบที่เกิดจากกรรมวิธีการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม โดยแหล่งที่มาของโลหะหนักส่วนหนึ่งเกิดจากน้ำทิ้งจากขบวนการชุบผิวโลหะ หรือการใช้สารเคมี การทำความสะอาดชิ้นงานเกี่ยวกับโลหะต่างๆ เช่น สังกะสี โครเมียม นิกเกิล แคดเมียม เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจเป็นการทำความสะอาดเครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำด้วยโลหะ

1. ปัญหาโลหะหนักในประเทศไทย

ปัญหาโลหะหนักในประเทศไทย นับว่ายังเป็นปัญหาที่น่าจับตามอง เนื่องจากยังมีสถานที่หรือหน่วยงานในการกำจัดไม่มากพอ และบางแห่งก็ยังไม่สามารถบำบัดได้สมบูรณ์ เป็นเพียงการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุเท่านั้น ไม่มีการแก้ปัญหาจากต้นเหตุในเรื่องต่างๆ เช่น การเก็บรวบรวม การลดปริมาณในการผลิต ปัญหาที่มักพบ ได้แก่

1. การจัดการของเสียที่เป็นอันตรายในแหล่งกำเนิด ยังมีการจัดการไม่ดีพอขาดการเอาใจใส่ เป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ
2. การเก็บรวบรวมของเสียยังไม่มีการดูแลหรือจัดการอย่างเหมาะสม บางครั้งพบว่าปะปนมากับขยะมูลฝอยของชุมชน

คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า โลหะหนักที่แสดงความเป็นพิษ แสดงอยู่ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 โลหะต่างๆ ที่มีคุณสมบัติแสดงความเป็นพิษ

โลหะหนัก	คุณลักษณะและตัวอย่างของเสีย
Arsenic (As)	เป็นโลหะที่มีพิษมีอยู่ในของเสียจากขบวนการผลิตสารประกอบ As และจากแหล่งอื่นๆ เช่น As_2S_3 ที่ถูกกำจัดจากเกรดฟอสฟอริก (food grade)
Barium (Ba)	เป็นพิษ
Beryllium (Be)	เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาที่มีพิษ เป็นส่วนประกอบใน beryllium dust
Cadmium (Cd)	เป็นโลหะหนักที่มีพิษ เป็นส่วนประกอบในของเสียจากการผลิตเหล็กบางชนิด
Chromium (Cr)	โลหะหนักที่มีพิษอยู่ในรูปของ Cr^{6+} เป็นส่วนประกอบของของเสียจากการผลิตเม็ดสีชมพูโลหะด้วยไฟฟ้า การผลิตเหล็ก
Lead (Pb)	เป็นโลหะหนักที่มีพิษ เป็นส่วนประกอบในของเสียจากการผลิตเม็ดสี Lead smelting และจากการผลิตโลหะอื่นๆ
Mercury (Hg)	เป็นโลหะหนักที่มีพิษ เป็นส่วนประกอบของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำทิ้งจาก mercury cell ของขบวนการผลิตคลอรีน
Nickel (Ni)	เป็นโลหะหนักที่มีพิษ เป็นส่วนประกอบของขบวนการชุบผิวโลหะ
Selenium (Se)	เป็นโลหะที่เป็นพิษ
Silver (Ag)	เป็นโลหะหนักที่เป็นพิษ
Thallium (Tl)	เป็นโลหะหนักที่เป็นพิษ

ที่มา: Manahan (1990)

2. โลหะหนักที่เป็นพิษ

ความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิด และตัวอย่างของโรคที่เกิดจากโลหะหนัก

2.1 ปรอท (Mercury)

ปรอทจัดเป็น โลหะหนักที่มีความเป็นพิษแตกต่างกันในแต่ละรูป เช่น ปรอทในรูปของ Methyl และ Ethyl จะมีความเป็นพิษมากที่สุด รองลงมาจะเป็นปรอทในรูปโลหะ (Metallic form) และน้อยที่สุดจะเป็นปรอทในรูปของสารประกอบอินทรีย์ แม้ปริมาณความเข้มข้นต่ำก็สามารถก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรง โดยเฉพาะหากปรากฏในห่วงโซ่อาหาร โรคมินามาตะ (Minamata Disease) เป็นตัวอย่างของโรคที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นพิษของสารปรอทที่ปรากฏในห่วงโซ่อาหาร โดยชาวประมงรอบ ๆ อ่าวมินามาตะ ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของเกาะกิวชู ประเทศญี่ปุ่น ที่ยังชีพด้วยการบริโภคปลาและสัตว์น้ำ ซึ่งปนเปื้อนสาร Methyl Mercury ได้ป่วยเป็นโรคกล้ามเนื้ออ่อนแอเพอริส สูญเสียการมองเห็น ระบบการทำงานของสมองเสื่อม และเป็นอัมพาตในรายที่ได้รับสารเป็นจำนวนมากอาจเสียชีวิตได้ (Fujiki, 1972)

Harris et al. (1970) รายงานว่า ความเข้มข้นของ Methyl mercury ที่ 1 ppb ในน้ำทะเลสามารถลดอัตราการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชได้ และที่ 50ppb การสังเคราะห์จะถูกยับยั้ง นอกจากนี้ Ekeles (1962) พบว่า Methyl mercury Phosphate ที่ความเข้มข้น 60ppb สามารถฆ่าแพลงก์ตอนพืชได้

Weir and Hine (1970) กล่าวว่า ปรอทในรูปของโลหะหนักสามารถแสดงความเป็นพิษต่อปลาที่ความเข้มข้นเพียง 0.003 ppm Methyl mercury ที่ระดับความเข้มข้น 1.0 ppm สามารถลดความแข็งแรงของเชื้อสืบพันธุ์ตัวผู้ของปลา

2.2 แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียม เป็นโลหะหนัก มีสีขาว ฟ้า วาว มีลักษณะเนื้ออ่อน สามารถบิดโค้งงอได้ และถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็กๆ ในอากาศที่มีความชื้น แคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์ช้าๆ ให้แคดเมียมออกไซด์ ในธรรมชาติแคดเมียมมักจะอยู่ร่วมกับ

กำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ และ มักปนอยู่ในสินแร่สังกะสี ตะกั่ว หรือทองแดง ฉะนั้นในการทำเหมืองสังกะสี จะได้แคดเมียมซึ่งเป็น ผลพลอยได้ (by product) ได้นำโลหะแคดเมียมมาใช้ในวัสดุแผ่นไฟฟ้าเป็นส่วนผสมของอัลลอยด์ใช้ในการทำนิกเกิลแคดเมียม แบตเตอรี่ เป็นสารคงตัวในโพลีไวนิลคลอไรด์ ใช้ทำสีในพลาสติกและแก้ว เป็นส่วนผสมของอมัลกัม (amalgam) ที่ใช้ในร้านทันตกรรม ผลิตภัณฑ์ที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบถ้าให้ความร้อนเกินจุดหลอมเหลว (321 องศาเซลเซียส) จะเกิดควันของแคดเมียม (Cadmium fumes) การนำเอาแคดเมียมมาใช้ทำให้มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม ทั้งในอากาศ น้ำ ดิน รวมทั้งในอาหารด้วย เมื่อมีมาก ๆ จะเกิดการสะสม โดยเฉพาะมนุษย์หรือสัตว์ ถ้ามีการสะสมของแคดเมียมในร่างกายมากอาจก่อให้เกิดพิษได้

อาการพิษจากแคดเมียม

อาการพิษเฉียบพลันจากการกิน มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย ปวดศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ มีน้ำลายไหล ปวดท้อง ช็อค (Shock) ไตและตับถูกทำลาย

จากการหายใจ (ควันของแคดเมียม) มีอาการเจ็บหน้าอก หายใจสั้น มีกลิ่นโลหะในปาก ไอมีเสมหะเป็นฟองหรือมีเสมหะเป็นเลือด อ่อนเพลีย ปวดเจ็บขา ต่อมาปัสสาวะจะน้อยลง เริ่มมีไข้ มีอาการของปอดอักเสบ

อาการพิษเรื้อรัง จากการหายใจ มีอาการไอ สูญเสียการรับกลิ่น น้ำหนักลด โลหิตจาง (Anemia) หายใจลำบาก ฟันมีคราบเปื้อนสีเหลือง ตับและไตอาจถูกทำลาย (ความรู้สิ่งเป็นพิษ, กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์)

2.3 โครเมียม (Chromium)

โครเมียม (Chromium) มีสูตรเคมี คือ Cr สารโครเมียมนี้สามารถนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง โดยนำมาผสมกับโลหะทำให้เกิดความแข็งแรงมีความเหนียวทนทาน ทำให้โลหะไม่เป็นสนิมทนต่อการผุกร่อน โลหะโครเมียมบริสุทธิ์ใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า สารประกอบของโครเมต (Chromate) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมฟอกหนัง การย้อมสีขนสัตว์ จะเห็นได้ว่าประโยชน์ของโครเมียม และสารประกอบ

ของโครเมียมมีประโยชน์มากมาย แต่อันตรายของโครเมียมก็มีอยู่ไม่น้อย เช่น สูดหายใจเอาฝุ่นละอองหรือควันของกรดโครมิก ก็จะทำให้ระบบทางเดินหายใจส่วนต้นบริเวณจมูก โดยแผ่นกั้นระหว่างจมูกซึ่งเป็นกระดูกอ่อนทำลายและทำให้เป็นมะเร็งที่ปอด นอกจากนี้การสัมผัสกับฝุ่นละออง หรือสารละลายของกรดโครมิกทำให้ผิวหนังอักเสบ

อันตรายของโครเมียม

1) แผลที่เกิดจากโครเมียม (Chrome Ulcers) เกิดจากสะสมของฝุ่นละอองของโครเมียม ซึ่งโดยมากจะเริ่มที่รอยถลอกของผิวหนัง พบมากที่สุดที่โคนเล็บมือ ตามข้อนิ้วมือหรือหลังเท้ามีลักษณะเป็นแผลวงกลม ขอบค่อนข้างบาง บวมเล็กน้อยไปมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร หรือเล็กกว่า มองคล้ายถูกตะปูเจาะ แม้ว่าแผลนั้นจะไม่เจ็บปวดแต่คันมากในเวลากลางคืน ต่อไปแผลนั้นจะเกิดการติดเชื้อขึ้น ทำให้ลุกลามไปถึงข้อต่อใกล้เคียงอาจต้องตัดนิ้วที่ถึงฝุ่นของเกลือโครเมียมหรือควันของกรดโครมิกอาจตกลงบนหนังตาหรือที่ปลายจมูก อาจทำให้เกิดแผลขึ้นได้เช่นเดียวกัน

2) ผิวหนังอักเสบ (Dermatitis) บริเวณมือ แขน ใบหน้า และหน้าอก ผิวหนัง บริเวณนี้จะเกิดอักเสบขึ้น หลังจากคนงานทำงานมาแล้วประมาณ 6 เดือน ในรายที่เป็นมากจะมีสีแดงเข้มและบวมบริเวณที่อักเสบ จะคันมาก มีอาการเจ็บแสบด้วย

3) ผื่นกั้นในจมูกถูกเจาะทะลุ เมื่อสูดหายใจเอาควันของกรดโครมิกหรือฝุ่นของโครเมียมเป็นประจำ อาการที่เกิดขึ้น คือ ลิ้นและฟันจะเปลี่ยนเป็นสีออกเหลืองๆ ถ้าเป็นมากจะทำให้ผิวหนังกั้นในจมูก ถูกทำลายจนเป็นรูทะลุ ซึ่งการทะลุของแผ่นกั้นจมูกนี้ จะไม่รู้สึเจ็บปวดแต่อย่างใด แต่จะรู้ตัวเมื่อมีเสียงอู้อี้ หรือดั่งจมูกแบนลงแล้วเท่านั้น

4) มะเร็งของปอด มักจะเกิดกับคนที่สูดหายใจเอาโครเมียมเข้าไปทุกวันติดต่อกันเป็นเวลานานๆ เป็นอันตรายแก่ชีวิตเพราะไม่มียารักษาให้หายได้ (วิจิตร บุญยะโทตระ, 2538)

2.4 อาร์เซนิก (Arsenic)

การสูดเอาฝุ่นละอองของสารหนูชนิดอินทรีย์ หรือก๊าซซึ่งมีส่วนประกอบของสารหนู มีการใช้สารหนูในทางอุตสาหกรรม เกษตรกรรมและการแพทย์ โดยเฉพาะใช้ในด้านเกษตรกรรม เป็นยาฆ่าแมลงและปราบศัตรูพืช โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารหนูก็ได้แก่ โรงงานย้อมผ้า โรงงานทำสี ทำดอกไม้เพลิง โรงงานพิมพ์ดอกไม้ โรงงานผลิตแก้ว โรงงานผสมตะกั่วกับสารหนู เพื่อให้เนื้อตะกั่วแข็งขึ้น โรงงานทำผงซักฟอก ถ้าคนงานสูดหายใจเอาก๊าซซึ่งมีส่วนประกอบของสารหนูเข้าไปจะมีอาการ คือ

อาการทางทางเดินหายใจ ทำให้ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อเมื่อสูดหายใจเข้าไปบ่อยๆ นานๆ ทำให้เยื่อชั้นจมูกทะเล่ ติดต่อกัน ได้โดยไม่มีอาการเจ็บปวดแต่อย่างใด น้ำมูกแห้งคอแห้ง เสียงแหบ เกิดมะเร็งที่ปอด

อาการทางผิวหนัง ฝุ่นปลิวถูกผิวหนังจะไปรวมอยู่ที่รอยพับที่ขึ้นและของผิวหนัง เช่น รอบๆ จมูก รอบๆ ปาก บริเวณรักแร้และขาหนีบ ทำให้เกิดระคายเคือง อักเสบบวมแดงเป็นตุ่มแข็ง ไสพองหรือผิวหนังแข็งด้าน หรือเป็นหูดซึ่งเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนังได้

อาการทางตา จะเกิดอาการตาแดง ตาอักเสบ เพราะถูกรบกวนจนกระทั่งเส้นโลหิตฝอยแตก อาการทางระบบประสาท เนื่องจากสารหนูเข้าไปสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิต ซึ่งจะมีผลต่อน้ำย่อยที่ช่วยในระบบเผาผลาญของร่างกาย ทำให้การทำงานเสียไป ปลายประสาทอักเสบแขนขาชาและ เป็นอัมพาตในที่สุด

2.5 ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่วที่เจือปนในสิ่งแวดล้อม เมื่อมีมากก็จะทำให้มีโอกาสเจือปนเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้มากขึ้น ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย โดยเฉพาะกับเด็กที่อาศัยอยู่ในอาคารเก่า ชำรุด เนื่องจากเด็กมักชอบกลืนกินสารซึ่งมีโซ่อาหารเข้าไป เช่น ตะกั่วที่ผสมอยู่ในสีเทาอาคาร หรือปูนพลาสเตอร์ สารตะกั่วนี้จะไปทำลายสมอง ประสาทสั่งการบกพร่องจนอาจถึงขั้นเสียดสีหรือเสียชีวิตได้

การนำเอาภาชนะที่มีสารตะกั่วเคลือบอยู่ เช่น ภาชนะประเภท เซรามิกเคลือบสี หากนำเอาอาหารประเภทน้ำที่มีกรด เช่น น้ำผลไม้มาใส่ลงในภาชนะ ฤทธิ์ของกรดในน้ำผลไม้ จะทำให้ตะกั่วที่เคลือบภาชนะละลายหลุดออกมาได้ เป็นสาเหตุที่ทำให้ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายแต่หาก ต้องการให้ปลอดภัยก็ต้องทำตามกรรมวิธีผลิตอย่างถูกต้อง

การจัดการของเสียอันตราย

การจัดการของเสียอันตราย หมายถึง การจัดการกับของเสียที่เป็นอันตรายเพื่อลด ความเป็นพิษ และทำให้มีคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพ และเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้าย ต่อไป ดังนี้

1. วิธีการบำบัดของเสียที่เป็นอันตราย

โดยทั่วไป วิธีการบำบัดของเสียที่เป็นอันตรายอาจแบ่งออกตามลักษณะของของเสียได้ดังนี้

1.1 การบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) เป็นการแยกของแข็งและของเหลวออกจากกันซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การดูดซับด้วยคาร์บอน การกลั่น การเหวี่ยงโดยแรงหนีศูนย์กลาง และการตกตะกอน

1.2 การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) เป็นวิธีการทำลายฤทธิ์ของของเสียที่เป็นอันตรายซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การทำสะเทิน การบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชัน การบำบัดด้วยวิธีรีดักชัน การแลกเปลี่ยนประจุและการตกตะกอนผลึก การตกตะกอน (Precipitation) เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี ที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารที่ละลาย (Dissolve) ให้มาอยู่ในสถานะของแข็ง ซึ่งสามารถแยกสารละลายได้ กระบวนการตกตะกอนขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายของสารนั้น โดยทั่วไปมีหลายวิธี ได้แก่

- 1) ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์
- 2) คาร์บอเนต (Carbonate) โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต
- 3) ซัลไฟด์ (Sulfide) โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์
- 4) โพลีเมอร์ (Polymer) โดยการใช้โพลีเมอร์

1.3 การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) ของเสียที่เป็นอันตรายที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ สามารถใช้การบำบัดทางชีวภาพได้ ซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ แอควิวีเทค สลัดจ์, การย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก, การทำปุ๋ย ทั้งนี้หากมีปริมาณของเสียหรือมีสารที่เป็นพิษต่อระบบชีวภาพต้องทำการบำบัดก่อนที่จะใช้วิธีทางชีวภาพ

1.4 การบำบัดด้วยความร้อน (Thermal Treatment) การใช้ความร้อนในการบำบัดของเสียประเภทสารอินทรีย์ เป็นวิธีการที่ยอมรับกันทั่วไป เช่น การเผาไหม้

1.5 การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secured Landfill) การกำจัดของเสียชนิดต่างๆ มีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับประเภทของเสียนั้นๆ เช่น การกำจัดโดยนำไปทิ้งทะเล เฝ้าในเตาเผา ฝังกลบ อัดลงในชั้นบาดาล ทั้งนี้ของเสียนั้นๆ จะต้องผ่านการบำบัดก่อน เพื่อให้มีความเหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้าย (Youn, 1990)

การฝังกลบเป็นวิธีการที่ใช้กำจัดของเสียที่เป็นอันตราย ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายของเสียที่เป็นของเหลวหรืออยู่ในรูปของสลัดจ์ไม่เหมาะสมที่จะกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ ทั้งนี้เนื่องจากของเหลวในของเสียหรือน้ำชะละลาย อาจปนเปื้อนลงสู่ดิน และน้ำใต้ดินได้ง่าย (Youn, 1990)

โครงสร้างของหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัยนั้นจะต้องมีการป้องกันการรั่วซึมของน้ำและสารอันตรายอย่างรัดกุมมาก ที่ก้นหลุม และด้านข้างหลุมมีการบดอัดด้วยดินเหนียว ซึ่งมีอัตราการไหลซึมของน้ำต่ำ กรณีหลุมฝังของ GENCO ซึ่งมีอัตราการไหลซึมของน้ำชั้นดินเหนียวต่ำกว่า 10^{-7} ซม./วินาที ต่อจากนั้น จึงปูด้วยแผ่นยาง หรือแผ่นพลาสติก เช่น แผ่น HDPE เป็นต้น จำนวน 2 ชั้น เนื้อชั้นแผ่นยางแต่ละชั้นเป็นชั้นระบายน้ำ และเมื่อเกิดการรั่วไหลลงมาน้ำเหล่านี้จะไหลลงท่อเพื่อรวบรวมนำมาบำบัดภายนอกต่อไป เมื่อฝังกลบกากของเสียจนเต็มหลุมแล้ว ต้องทำการปิดหลุมด้วยดินอัดแน่น จากนั้นปูแผ่นยางหรือแผ่นพลาสติกสังเคราะห์ ปูทับด้วยดินอีกชั้นแล้วปลูกพืชคลุมดินไว้ เพื่อลดการชะล้างพังทลายหน้าดินไป นอกจากนั้นแล้ว ด้านบนของหลุมฝังกลบจะต้องมีท่อระบายอากาศ เพื่อระบายก๊าซที่เกิดขึ้นภายในออกสู่ภายนอก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอัดตัวของก๊าซจนถึงขั้นดันหลุมฝังกลบให้มีรอยแตกได้ ด้านข้างของหลุมฝังกลบทั้ง 2 ด้านจะต้องมีบ่อบาดาลเป็นบ่อสังเกตการณ์การรั่วไหลออกสู่ภายนอก โดยต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อทั้งสองมาตรวจสอบปริมาณสารปนเปื้อนอยู่เสมอ

1.6 การปรับเสถียร (Stabilization) การปรับเสถียรกากของเสีย เป็นการผสมสารเคมีที่เหมาะสมเข้ากับของเสีย เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่ของเสียถูกจับไว้ ทำให้ของเสียถูกชะล้างละลาย ออกมาละลายได้น้อยลง การปรับเสถียรกากของเสียอันตรายนี้เป็นการเตรียมของเสียเพื่อนำไปฝัง กลบอย่างปลอดภัย ตัวอย่างการปรับเสถียร ได้แก่ ทำให้เป็นก้อน (Solidification) ซึ่งเป็น กระบวนการนำวัสดุสารมาเติมลงในของเสีย ซึ่งของเสียนั้นอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือตะกอน แล้วทำให้กากของเสียนั้นเป็นก้อนแข็งมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น สามารถขนย้ายหรือขนส่งได้ สะดวก ในระหว่างการทำให้เป็นก้อนมักเกิดการทำให้เสถียรพร้อมกัน เนื่องมาจากมีการ เปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น โดยสารมลพิษถูกทำให้เสถียรและถูกคักจับไว้ ภายในโครงสร้าง โมเลกุลของมวลที่แข็งตัว (Sollars and Perry, 1989)

หลักของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน ก็คือการลดความเป็นพิษ หรือกักเก็บความเป็นพิษ ของของเสียอันตราย และเป็นการป้องกันไม่ให้สารพิษนั้นแพร่กระจายสู่สภาพแวดล้อมหรือถูก ชะล้างไปกับสภาพสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การทำให้ของเสียเป็นของแข็งยังมีวัตถุประสงค์อื่นๆ เช่น

- เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายขนส่ง
- ลดพื้นที่ผิวของของเสีย ซึ่งจะเป็นตัวแพร่กระจายสารพิษในสภาพแวดล้อม
- ลดอัตราการละลายของสารพิษ เมื่อสัมผัสกับสารละลาย

การกำจัดกากตะกอนโลหะหนัก

การกำจัดกากตะกอนโลหะหนักที่เกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม สามารถทำได้ หลายวิธีแต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การทำให้เป็นก้อน (Solidification) เพราะสามารถทำได้ง่าย สะดวกและป้องกันการปนเปื้อนได้ดี วัสดุที่นิยมทำให้เป็นก้อน (Solidification) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) และพลาสติก

การกำจัดกากตะกอน ทำได้โดยนำกากตะกอนโลหะหนักมาหล่อเป็นก้อน ก่อนนำไปฝัง กลบ จะต้องนำมาทดสอบคุณสมบัติการถูกชะละลาย (Leaching Test) ภายใต้สภาวะความเป็นกรด สารละลายที่ผ่านการชะละลายของเสียแล้วจะต้องมีสารปนเปื้อนต่ำกว่าปริมาณมาตรฐานของกรม โรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้

1. การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์

การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ โดยมากจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และปูนขาวเป็นวัสดุประสาน เพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพในการทำให้แข็งตัวและจับยึดความเป็นพิษของเสียที่เป็นของเหลว หรือน้ำในตะกอนของเสียจะเป็นส่วนหนึ่งของน้ำเพื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาความเป็นด่างสูงมาก ยังผลให้โลหะหนักเปลี่ยนรูปเป็นโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์

1.1 ลักษณะของปูนซีเมนต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจาก การเผาส่วนผสมต่างๆ เช่น หินปูนขาวกับดินเหนียว หรือหินดาน จนทำให้มีส่วนผสมที่พอดี สามารถเกิดการก่อตัวและแข็งตัวได้ด้วยปฏิกิริยาที่ผสมกับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ทำให้มีคุณสมบัติในการยึดเกาะและรับแรงได้ดี



ภาพที่ 2 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอน (ซีเมนต์เวสต์)

1.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งมีรวมกันประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 และซัลเฟอร์ (ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน, 2549)

ปริมาณออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบที่เป็นค่าออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

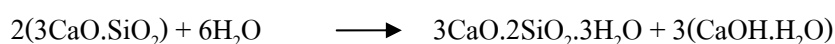
		เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก		
	CaO	60 - 67
	SiO_2	17 - 25
	Al_2O_3	3 - 8
	Fe_2O_3	0.5 - 6
ออกไซด์รอง		
	MgO	0.1 - 5.5
	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5 - 1.3
	TiO_2	0.1 - 0.4
	P_2O_5	0.1 - 0.2
	SO_3	1 - 3

1.3 การก่อตัวและแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ เรียกว่าซีเมนต์เพสต์จะอยู่ในสภาพเหลวและลื่นไหลได้ในเวลาหนึ่ง ช่วงนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเรียกว่า “Dament Period” หลังจากนั้นจะเริ่มจับตัวช่วงนี้จะไม่สามารถไหลได้ เรียกว่าจุดเริ่มแข็งตัว (Initial set) เมื่อคิดระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนถึงจุดนี้เรียกว่าเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ต่อจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะก่อตัวไปเรื่อยๆ จนถึงจุดเป็นของแข็งเรียกว่า Final setting time หลังจากนั้นการก่อตัวจะดำเนินไปจนสามารถรับน้ำหนักได้

1.4 ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (Hydration)

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) โดยสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C2S) ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} : \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{CH}$) สามารถเขียนเป็นสมการดังต่อไปนี้



สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ทำให้ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) เป็นวุ้น (Gel) มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานคล้ายกาว สามารถแข็งตัวและยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม สำหรับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) หมายถึง ของผสมระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

ซีเมนต์วาสต์ (Cement waste) หมายถึง ของผสมระหว่างซีเมนต์ กากตะกอนและน้ำ

มอร์ตาร์ (Mortar) หมายถึง ของผสมระหว่าง ซีเมนต์ น้ำ และวัสดุมวลรวมละเอียด เช่น ทรายมาตรฐาน

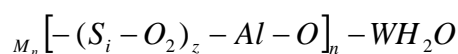
คอนกรีต (Concrete) หมายถึง ของผสมระหว่าง ซีเมนต์ น้ำ วัสดุมวลรวมหยาบ วัสดุ มวลรวมละเอียด

2. การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานทำหน้าที่คล้ายปูนซีเมนต์เกิดจากการทำปฏิกิริยา ระหว่างซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) กับ alkali action เช่น โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้ความร้อนในการกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน วัสดุที่ใช้ ผสมเป็นปอซโซลาน (pozzolanic material) สารปอซโซลานที่นิยมทำจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) เถ้าแกลบ (rice husk ash) และเถ้าตะกรัน (ground blast furnace slag)

กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ ในลักษณะของโพลิเมอร์ (Polymer) โดยวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบจะถูกกระตุ้น ด้วยสารละลาย หลังจากนั้นโซเดียมซิลิเกตจะเข้าไปเป็นตัวทำให้รวมตัวกันในลักษณะ โครงสร้าง แบบสามเหลี่ยมเกิดพันธะ Si-O-Al โดยมีสูตร โมเลกุลดังนี้ (Davidovits, 1999)



โดยที่

M	=	ธาตุอัลคาไล
-	=	พันธะ (bond)
Z	=	จำนวน โมเลกุลของ $S_i - O_2$ เท่ากับ 1, 2, 3
n	=	ปริมาณ โมเลกุลของการทำโมเลกุลลูกโซ่ (degree of Polymerization)
W	=	จำนวน โมเลกุลของน้ำ

3. กลไกการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมในจีโอโพลิเมอร์

ของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ เมื่อทำให้ตกตะกอนจะได้กากตะกอนโลหะหนักมีลักษณะคล้ายโคลน (Sludge) ซึ่งเป็นของเสียอันตราย การทำให้อยู่ในรูปของแข็ง โดยการผสมในจีโอโพลิเมอร์จะเป็นการทำลายหรือลดความเป็นพิษของกากตะกอนที่โลหะหนักผสมอยู่ การเก็บกักในจีโอโพลิเมอร์มีกลไกการเก็บกักคล้ายกับปูนซีเมนต์ Lagreger et al. (2001) เสนอกลไกการเก็บกักโลหะหนักในซีเมนต์และวัสดุพอลิโพรพิลีนดังนี้

- เพื่อเป็นการเจือจาง (Dilution) ความเป็นพิษของกากตะกอนเนื่องจากการเติมวัสดุลงในกากของเสีย
- โครงสร้างของซีเมนต์และวัสดุพอลิโพรพิลีนจะเก็บกักโลหะหนักที่เป็นของเหลวไว้
- มีปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) ระหว่างโลหะหนักที่อยู่ในรูปของเหลวกับซีเมนต์และวัสดุพอลิโพรพิลีน
- ความเป็นด่างในปูนซีเมนต์และวัสดุพอลิโพรพิลีน จะทำให้โลหะหนักที่อยู่ในตะกอนมีอัตราการละลายต่ำ
- เมื่อเป็นก้อนของแข็งจะเป็นลดพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลาย เช่น น้ำ มีผลทำให้ลดการชะละลายลง (Leachate)

4. การทดสอบการชะละลาย (Leachate)

ของเสียอันตราย เช่น โลหะหนัก เมื่อเก็บกักโดยทำให้แข็งตัวเป็นก้อน เช่น เก็บกักในปูนซีเมนต์แล้วนำไปฝังในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) อาจเกิดการปนเปื้อนจากการเก็บกักได้ เช่น ละลายปนกับน้ำ หรือแพร่กระจายออกไปทำให้โลหะหนักเหล่านี้ปนเปื้อนลงสู่ น้ำใต้ดิน ในธรรมชาติได้ ดังนั้นการทดสอบการชะละลาย (Leachate) เป็นการทดสอบโดยจำลองสภาวะในธรรมชาติเมื่อของเสียในหลุมฝังกลบเปลี่ยนจากสภาวะปกติในธรรมชาติเมื่อของเสียในหลุมฝังกลบเปลี่ยนจากสภาวะปกติมาเป็นสภาวะความเป็นกรด ทดสอบโดยใช้สารละลายอะซิติก

ไปชะละลายของเสียที่ถูกเก็บกักในสภาพของแข็ง สารชะละลายที่เป็นของเหลวจะนำเอาของเสียปนเปื้อนออกมา เรียกว่าการสกัดหรือการชะละลาย (Lagreggea et al., 2001)

US EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการทดสอบการชะละลายของเสียที่ถูกเก็บกักอยู่ในหลุมฝังกลบ การทดสอบเพื่อหาสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่ถูกการชะละลายออกมาจะอยู่ในสถานะของเหลว ของแข็ง หรืออื่นๆ การทดลองโดยใช้วิธี TCLP จะทดสอบโดยการใส่สารละลายชะละลายเป็นเวลา 18 ± 1 ชั่วโมง

5. เกณฑ์มาตรฐานและคุณสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน

US EPA (1992) ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปฝังในหลุมฝังกลบหรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว หลังจากตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธีการชะละลาย (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP, 1992) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Extract Solution) ตามมาตรฐานของ EPA แล้ว ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นพิษ ตามประเภทของเสียในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่ามาตรฐานจาก US EPA

Heavy metal	Regulatory level in
	TCLP Extract (mg/l)
Arsenic	5.0
Cadmium	1.0
Chromium	5.0
Lead	5.0
Zinc	250

ที่มา: US EPA (1992)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก DENVER APX 1502 และ DENVER TB 224
2. Drying Oven Maximum Temp 550 °c CARBOLITE ELP 11/14B
3. Drying Oven Maximum Temp 100 °c BINDER ED 53/E2
4. Muffle Furnace
5. เติลเคเตอร์ พร้อมสารดูดความชื้น
6. ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve) ขนาด 3/8 นิ้ว
7. Hotplate
8. Magnetic Stirrer & Bar
9. ปีกเกอร์ ขนาด 10, 20, 50, 100 cc
10. Membrane Filter Sterile ขนาดช่อง 0.45 ไมครอน
11. ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum Filtration Set)
12. pH meter DENVER 215
13. Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS.)
14. เครื่องมือทดสอบแรงอัด สำหรับลูกบาศก์ (Versa Tester)
15. เครื่องมือทดสอบแรงอัด 200 Tons (Universal testing machine)
16. Cement Mixer
17. แท่นบีบคายน้ำ (Pore Water Expresser)
18. Volumetric Flask ขนาด 25, 50, 100 ml
19. แบบหล่อตัวอย่างซีเมนต์ ลูกบาศก์ ขนาด 50x50x50 มม.
20. ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว หรือ 40 มม. สูง 80 มม.

วัสดุและสารเคมี

1. กากตะกอนโลหะหนักที่ผ่าน Filter Press ได้จากโรงชุบเพชรเกษม
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
3. เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

4. ทรายมาตรฐาน
5. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เกรดสำหรับงานวิเคราะห์ (AR)
6. กรดไนตริกเข้มข้น เกรดสำหรับงานวิเคราะห์ (AR)
7. กรดอะซิติกเข้มข้น เกรดสำหรับงานวิเคราะห์ (AR)
8. โซเดียมซัลเฟต
9. สารละลายมาตรฐาน Zn, Cr
10. น้ำกลั่น (Demonized Water)
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดสำหรับงานวิเคราะห์ (AR)

วิธีการ

ศึกษาคุณสมบัติของกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษม และเก็บตัวอย่าง
โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

1. ศึกษาคุณสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก

ตารางที่ 6 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก

การวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
ปริมาณความชื้น (Water Content)	หาค่าหนักของน้ำจากน้ำหนักทั้งหมด
ค่า pH ของกากตะกอน	โดยใช้เครื่อง pH Meter
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	Standard method for the examination of water and wastewater 20 th ed.
ปริมาณของแข็งคงตัว (Fixed Solids)	Standard method for the examination of water and wastewater 20 th ed.
ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids)	Standard method for the examination of water and wastewater 20 th ed.
หาปริมาณสังกะสีและโครเมียม โดยวิธีการชะละลาย (Leaching test)	Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP(US EPA,1992)

2. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนโลหะหนักและเถ้าลอย

2.1 หาองค์ประกอบออกไซด์ของกากตะกอนและเถ้าลอย

2.2 หาปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนและเถ้าลอย โดยวิธีการย่อย (Digest) โดยทดสอบตาม method 303 ของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th ed

3. ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของก้อนตัวอย่างผสมกากตะกอนและการชะละลาย

3.1 ทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์

3.1.1 นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I ผสมกับกากตะกอน ในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40, 60 และ 70% โดยควบคุมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) จากการทดสอบ Normal Consistency

3.1.2 นำส่วนผสมของซีเมนต์กับกากตะกอน (Cement West) ใส่ในแบบหล่อ หลังจาก 24 ชม. นำไปบ่มที่อายุ 3, 7, 14, 28 วัน

สำหรับก้อนตัวอย่างทรง ลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. เพื่อหาค่ากำลังอัดและทดสอบการชะละลาย สำหรับแบบหล่อท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. สูง 80 มม. นำไปทดสอบปริมาณสังกะสีและโครเมียมในช่องว่าง (Pore water)

3.2 ทำให้เป็นก้อนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

3.2.1 นำจีโอโพลิเมอร์ ผสมกับกากตะกอน ในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30 และ 40%

3.2.2 ใส่ในแบบหล่อขนาด 5x5x5 ซม. หลังจาก 24 ชม. นำไปบ่มที่อายุ 1, 3, 7, 28 วันเพื่อหาค่ากำลังอัดและทดสอบการชะละลาย

3.3 การทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-99, 2001

3.4 ทดสอบการชะละลาย (Leachate Test) ตามมาตรฐาน Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP (US EPA, 1992)

4. ศึกษาหลักการเก็บกักสังกะสีและโครเมียม

ทดสอบหาปริมาณสังกะสีและโครเมียมในก้อนตัวอย่าง

4.1 ทดสอบปริมาณสังกะสีและโครเมียมในช่องว่าง โดยการบีบน้ำจากก้อนตัวอย่างและทดสอบปริมาณสังกะสีและโครเมียมในน้ำหรือของเหลวด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ตามวิธีของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (20th Edition 1992)

4.2 ทดสอบการชะละลาย (Leachate Test) ของก้อนตัวอย่าง หลังจากบีบน้ำด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ตามวิธีของ Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP (US EPA, 1992)

4.3 ทดสอบหาปริมาณสังกะสีและโครเมียมในเนื้อซีเมนต์ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS.) ตามวิธีของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (20th Edition 1992) หลังจากทำการย่อย (Digest) ก้อนตัวอย่าง

ผลและวิจารณ์

ผล

1. คุณสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก

1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนโลหะหนักของโรงชุบเพชรเกษม

ลักษณะทั่วไปของกากตะกอนโลหะหนัก จากลักษณะภายนอกพบว่า ตะกอนจากโรงชุบเพชรเกษมที่นำมาวิจัยในครั้งนี้เป็นตะกอนเปียก มีสีน้ำตาลแดง ลักษณะคล้ายดินโคลน หรือดินเหนียวเลนดังแสดงในภาพที่ 3 และภาพที่ 4 แสดงตะกอนหลังผ่านการอบไล่ไอน้ำ ตะกอนดิบที่เก็บมามีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย เมื่อนำมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ประมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งคงที่ ปริมาณของแข็งระเหยได้ และปริมาณโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ สังกะสี โครเมียม เหล็ก ทองแดง แคดเมียม แมงกานีส ตะกั่ว ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยแสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนองค์ประกอบทางกายภาพของกากตะกอนไว้ในภาพที่ 5 และเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนดังภาพที่ 6



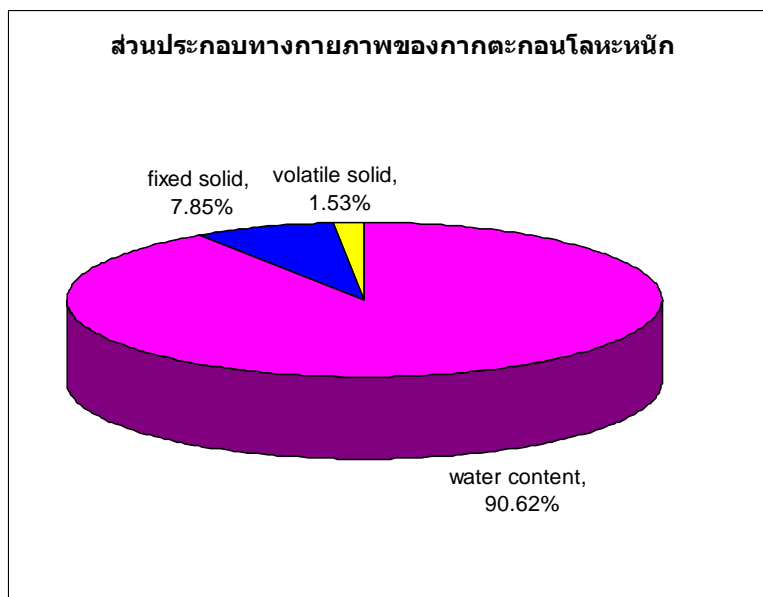
ภาพที่ 3 กากตะกอนโลหะหนัก (เปียก)



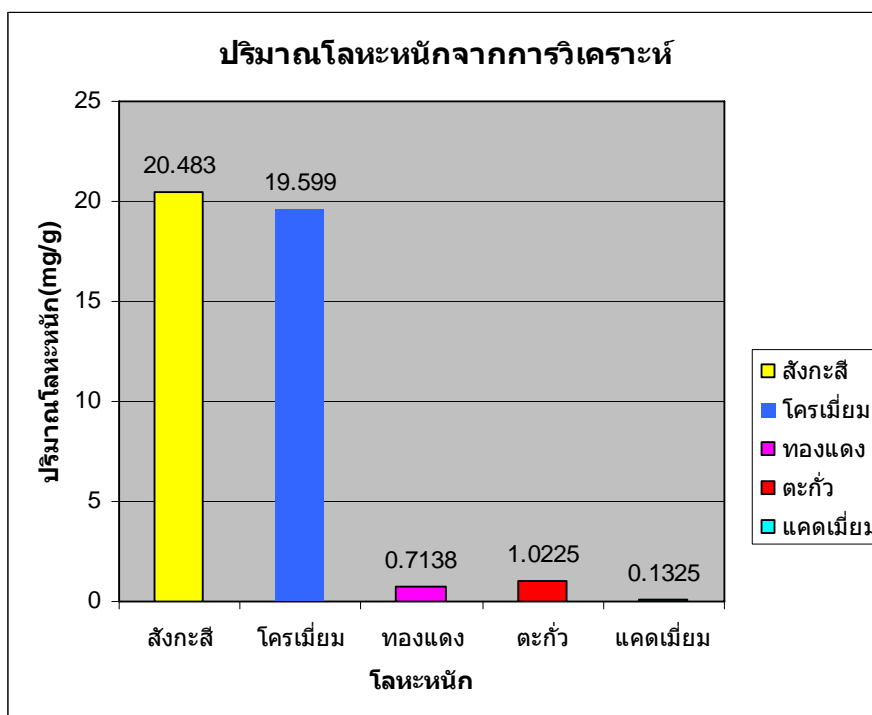
ภาพที่ 4 กากตะกอนโลหะหนักที่อบแห้ง

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของกากตะกอนโลหะหนักของโรงชุบเพชรเกษม

คุณลักษณะ	ค่าเฉลี่ย
pH	8.80
ปริมาณความชื้น (%)	90.62
ปริมาณของแข็งรวม (%)	9.38
ปริมาณของแข็งคงที่ (%)	7.85
ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%)	1.53
ปริมาณโลหะหนัก (มก./ก.) ของน้ำหนักตะกอนแห้ง	
- สังกะสี (Zn)	284.10
- โครเมียม (Cr)	38.90
- ทองแดง (Cu)	0.7138
- ตะกั่ว (Pb)	1.0225
- แคดเมียม (Cd)	0.1325
- แมงกานีส (Mn)	-



ภาพที่ 5 ส่วนประกอบทางกายภาพของกากตะกอนโลหะหนักโรงชุบเพชรเกษม



ภาพที่ 6 ปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการวิเคราะห์กากตะกอนโลหะหนักโรงชุบเพชรเกษม

จากการนำตะกอนเปียกมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 + 5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ภาพที่4) แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (2.35 มม.) ค้างบนตะแกรงเบอร์ 50 (300 ไมครอน) พบว่า กากตะกอนมีคุณสมบัติเป็นด่าง pH=8.80 มีปริมาณน้ำสูงมาก มีของแข็งรวมทั้งหมด (Total solid) อยู่เพียง 9.38% โดยส่วนมากจะเป็นสารอนินทรีย์ (Fixed solid 7.85%) มีองค์ประกอบ เป็นสารอินทรีย์ (volatile solid 1.53%) ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักพบว่า โลหะหนักที่มีมากที่สุดคือ สังกะสี รองลงมาเป็น โครเมียม และปริมาณโลหะหนักที่พบค่อนข้างน้อยคือ แคดเมียม (Cd) โลหะหนักที่ไม่พบในตะกอน ได้แก่ แมงกานีส (Mn) ทั้งนี้เป็นไปได้ว่า โรงชุมชนเพชรเกษมเป็นโรงงานที่ใช้กระบวนการผลิตจากสังกะสีและโครเมียมเป็นส่วนใหญ่ จึงพบปริมาณของโลหะหนักชนิดที่เกิดจากการผลิต เช่น สังกะสี และโครเมียม และปริมาณโลหะหนักอื่นๆ บ้างเล็กน้อย

1.2 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนโลหะหนัก ของโรงชุมชนเพชรเกษมและถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

1.2.1 องค์ประกอบออกไซด์ของถ้ำลอยและกากตะกอนโลหะหนัก

การวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของถ้ำลอย (FA) และกากตะกอนโลหะหนัก (HS) ด้วยเครื่อง XRF พบว่าถ้ำลอยมีปริมาณองค์ประกอบออกไซด์เกือบทุกชนิดมากกว่าตะกอนโลหะหนัก โดยเฉพาะปริมาณซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ถ้ำลอยที่นำมาใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์ มีสมบัติเป็นปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618-91 ได้กำหนดว่าถ้ำที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ จะมีสมบัติเป็นปอซโซลานเมื่อผลรวมของปริมาณซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 ผลรวมของปริมาณซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ของถ้ำลอยที่อยู่ร้อยละ 74 ส่วนกากตะกอนโลหะหนักไม่มีสมบัติเป็นปอซโซลาน โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกากตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าลอยและตะกอนโลหะหนัก

Component	FA (% by weight)	HS (% by weight)
SiO ₂	48.07	6.55
Al ₂ O ₃	13.26	0.42
Fe ₂ O ₃	12.66	8.23
CaO	17.14	1.27
K ₂ O	2.43	0.60
MgO	1.58	<0.01
SO ₃	2.72	1.79
P ₂ O ₅	0.12	1.14
Cr ₂ O ₃	0.02	5.87
MnO ₂	0.11	0.40
ZnO	0.05	31.06
Cl	0.03	0.65
อื่น ๆ	1.81	41.98

1.2.2 ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนและเถ้าลอย

- ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีการย่อยตะกอน

จากการทดสอบปริมาณ Cd, Pb, Cr และ Zn ในเถ้าลอย (FA) และตะกอนโลหะหนัก (HS) จากโรงชุบเพชรเกษม โดยใช้วิธีย่อยตะกอนแสดงในตารางที่ 9 พบว่าเถ้าลอยมีปริมาณ Cd, Zn, Pb และ Cr ต่ำกว่าตะกอนโลหะหนักโดย Cr, Zn ในกากตะกอนโลหะหนักนั้นมีปริมาณสูงมากเมื่อเทียบกับ Cd และ Pb

ตารางที่ 9 ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยและตะกอนโลหะหนักโดยวิธีการย่อยตะกอน

Heavy metals	Cd (mg/g)	Zn (Mg/g)	Pb (mg/g)	Cr (mg/g)
FA	0.08	1.359	0.94	0.005
HS	0.13	284.10	1.02	38.90

1.2.3 ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีการชะละลาย

วิธีการชะละลายตามมาตรฐาน TCLP (US EPA, 1992) ได้กำหนดให้ใช้ 0.1 M Acetic Acid เป็นสารชะละลายในการศึกษานี้ใช้ 0.1 M Acetic Acid ในถ้ำลอยและตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษม จากผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 10 พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายจากกากตะกอนต่ำกว่าที่ถูกชะละลายจากถ้ำลอย อีกทั้งยังต่ำกว่าปริมาณจากการย่อยเนื้อกากตะกอนด้วย สาเหตุเพราะกากตะกอนโลหะหนักผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยการทำให้เป็นค่างมาก่อนแล้วโลหะหนักจึงอยู่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ยากแก่การชะละลาย

ตารางที่ 10 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายจากถ้ำลอย และตะกอนโลหะหนัก ด้วยกรดอะซิติก

Heavy metals	Cd (mg/L) _{TCLP}	Cd (mg/g) _{cd}	Pb (mg/L) _{TCLP}	Pb (mg/g) _{Pb}	Cr (mg/L) _{TCLP}	Cr (mg/g) _{cr}	Zn (mg/L) _{TCLP}	Zn (mg/g) _{cr}
FA (Acetic)	0.08	0.020	0.14	0.003	-	-	-	-
HS (Acetic)	0.09	0.014	0.005	<0.001	37.0	0.74	756.4	15.13

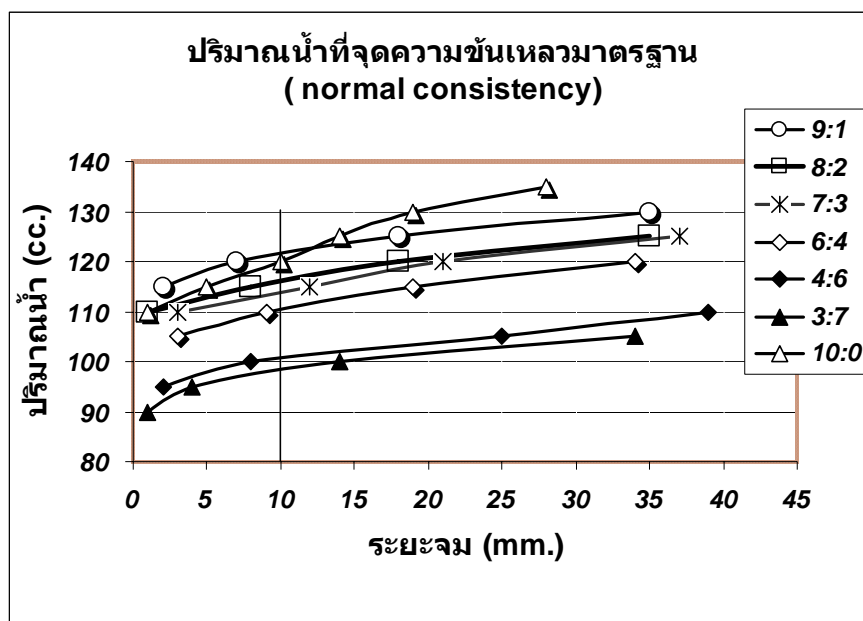
2. ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล

2.1 คุณสมบัติเชิงกลปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากตะกอน

การทำตะกอนโลหะหนักให้อยู่ในรูปของแข็ง หรือทำให้เสถียร โดยการทดลองผสมสัดส่วนของกากตะกอนโลหะหนัก ในรูปของอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับกากตะกอนโลหะหนัก Cement : Sludge (C:S) ในอัตราส่วน 10:0 (0%), 9:1 (10%), 8:2 (20%), 7:3 (30%), 6:4

(40%), 4:6 (60%), 3:7 (70%) โดยการทดลองในแต่ละส่วนผสมสามารถก่อตัวและทรงรูปได้จากการถอดแบบ (Mould) แล้วสามารถนำไปบ่มได้ ส่วนอัตราส่วน 2:8 หรือคิดเป็นกากตะกอน 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการก่อตัวเป็นรูปทรงไม่ค่อยดีเป็นก้อนลูกปุ่นที่แตกหักง่าย รูปทรงไม่สม่ำเสมอขาดการก่อตัวที่ดี จึงไม่สามารถนำมาวิจัยได้ ดังนั้น จึงเลือกส่วนผสมที่ทำได้ คือ 0, 10, 20, 30, 40, 60, 70 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองการทำให้เสถียรหรือในรูปของแข็ง จะทำการทดลองโดยมีตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของกากตะกอน (0 %) เป็นชุดควบคุม หรือเป็นตัวเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่มีกากตะกอนผสมอยู่ตามสัดส่วน และทุกส่วนผสมตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 40, 60, 70 เปอร์เซ็นต์ จะควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้การผสมที่จุดความชื้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency) ให้มีระยะจม 10 มม. สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7 และสรุปปริมาณน้ำ (w/c) ที่จะใช้ในการผสมก้อนตัวอย่างสำหรับสัดส่วนต่างๆ ตามตารางที่ 11



ภาพที่ 7 กราฟแสดงปริมาณน้ำที่จุดความชื้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency)

ตารางที่ 11 แสดงปริมาณน้ำที่จุดความชื้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency)

ส่วนผสม (C:S)	เปอร์เซ็นต์ส่วนผสม (กากตะกอน)	ปูนซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (ml)	water cement ratio (w/c)
10:0	0	500	120.0	0.24
9:1	10	450	121.5	0.27
8:2	20	400	116.0	0.29
7:3	30	350	114.0	0.33
6:4	40	300	111.2	0.37
4:6	60	200	100.5	0.50
3:7	70	150	98.5	0.66

สำหรับลักษณะทั่วไปของตัวอย่างซีเมนต์ผสมกากตะกอน(ซีเมนต์เวสต์) ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. ที่ไม่มีกากตะกอนผสมอยู่ มีลักษณะเป็นสีเทาเหมือนคอนกรีตทั่วไป และเมื่อทำการใส่ส่วนผสมที่มีกากตะกอน โลหะหนักลงไปตั้งแต่ 10 -70 เปอร์เซ็นต์ สีของตัวอย่างจะเปลี่ยนเป็นสีเทาแกมน้ำตาลแดงตามปริมาณกากตะกอน โลหะหนักที่เติมลงไป ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ภาพแสดงลักษณะตัวอย่างซีเมนต์ที่ผสมกากตะกอน โลหะหนัก (ซีเมนต์เวสต์)

2.1.1 พฤติกรรมของการพัฒนากำลังอัด

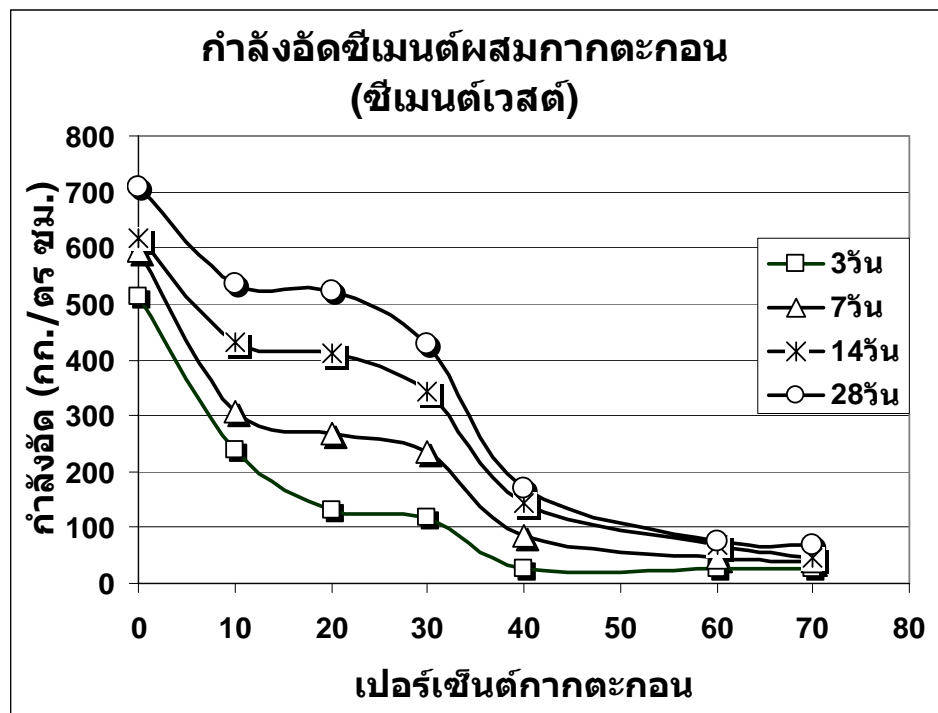
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักตั้งแต่ 0 - 70 เปอร์เซ็นต์ ในตารางที่ 12 และภาพที่ 9 เห็นได้ว่าพฤติกรรมของการพัฒนากำลังอัดจะมากขึ้นตามอายุของตัวอย่างเหมือนการพัฒนาำลังอัดของซีเมนต์เพสในชุดควบคุม (0%) กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างทุกอัตราส่วนมีความแข็งแรงเพียงพอตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ที่ 14 กก./ซม² สำหรับนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบ (Secured Landfill) ได้แม้จะมีอายุเพียง 3 วัน

2.1.2 ผลของปริมาณกากตะกอนโลหะหนักต่อกำลังรับแรงอัด (สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1)

การนำกากตะกอนโลหะหนักมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่ากำลังอัดเฉลี่ยจะลดลงโดยเห็นได้จากตัวอย่างที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีกำลังอัดเฉลี่ยสูงกว่าตัวอย่างที่ผสมกากตะกอนโลหะหนัก 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการผสมกากตะกอนโลหะหนักในปูนซีเมนต์ จึงเป็นการลดสัดส่วนของปูนซีเมนต์ลงซึ่งปูนซีเมนต์เป็นสารประเภท Binder เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบมีสถานะเป็นของแข็ง มีแรงยึดเกาะสูง ถ้าผสมกากตะกอนโลหะหนักเข้าไปในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับว่าเป็นการเพิ่มปริมาณ หรือเป็นสารเพิ่มเนื้อ (filler) เมื่อผสมในสัดส่วนที่มากก็จะเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ หลังจากผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างซีเมนต์เพสลดลง

ตารางที่ 12 กำลังรับแรงอัดปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอนโลหะหนัก (ซีเมนต์เวสต์)

ปริมาณตะกอน		กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย กก./ตร.ซม. ที่อายุ (วัน)			
(%)	C:S	3	7	14	28
0	10:0	514	593	618	710
10	9:1	237	306	430	535
20	8:2	129	269	413	523
30	7:3	117	235	343	428
40	6:4	27	86	145	169
60	4:6	26	45	69	75
70	3:7	26	38	46	67

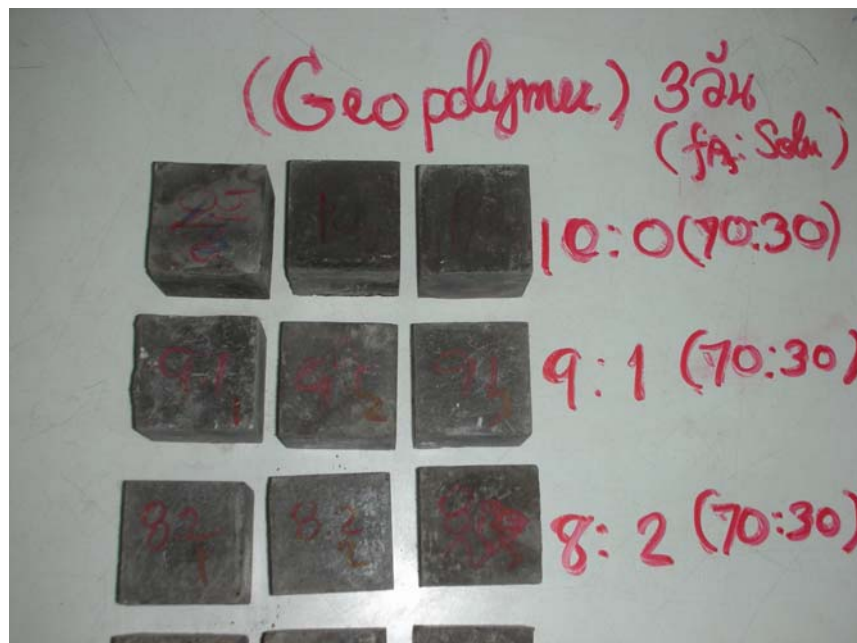


ภาพที่ 9 กำลังรับแรงอัดซีเมนต์ผสมกากตะกอน โลหะหนัก (ซีเมนต์เวสต์)

2.2 คุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ผสมกากตะกอน

ตัวอย่างลูกปูนที่นำมาศึกษาหรือวิจัยในครั้งนี้ นอกจากจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แล้ว ยังสามารถใช้จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งมีส่วนผสมของสารละลายกับเถ้าลอย (fly ash) สำหรับสารละลายจะประกอบไปด้วยโซเดียมซิลิเกตผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1.5:1 โดยเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 Molar

การใช้จีโอโพลิเมอร์ผสมกับกากตะกอนโลหะหนัก ได้ทำการทดสอบโดยทดลองใช้ส่วนผสมตั้งแต่ 0%(10:0), 10%(9:1), 20%(8:2), 30%(7:3), 40%(6:4), 60%(4:6), 70%(3:7) หลังจากทำการผสมตามมาตรฐานแล้วนำมาหล่อในแบบหล่อขนาด 5 x 5 x 5 ซม. และปล่อยให้เกิดการก่อตัวเป็นเวลา 24 ชม. พบว่าก้อนตัวอย่าง 0 - 40 เปอร์เซ็นต์สามารถก่อตัวเป็นรูปทรงได้ หลังจากถอดแบบแล้ว ในขณะที่ส่วนผสมกากตะกอน 60 - 70 เปอร์เซ็นต์ หลังจากถอดแบบหล่อแล้วไม่สามารถคงตัวอยู่ได้ งานวิจัยจึงเลือกใช้ส่วนผสมกากตะกอนในสัดส่วน 0, 10, 20, 30, 40 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 10 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่าง Geopolymer ที่ผสมด้วยกากตะกอนโลหะหนัก

2.2.1 พฤติกรรมการรับกำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอน

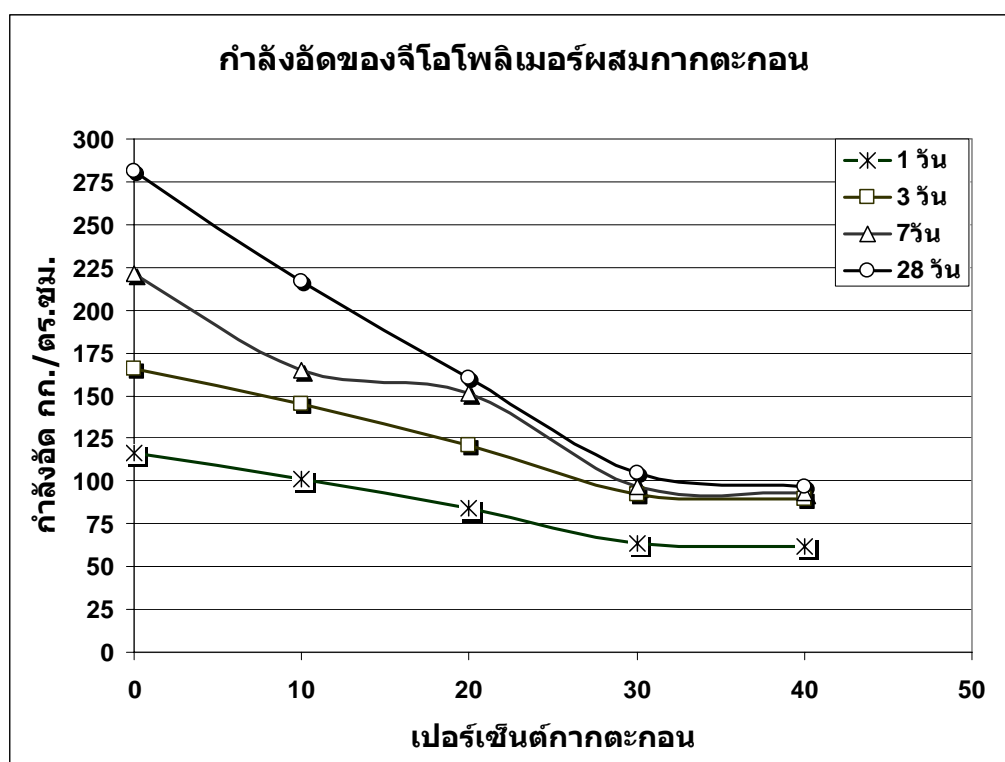
พฤติกรรมการรับกำลังอัด (Compressive Strength) ของตัวอย่าง Geopolymer ที่มีกากตะกอนผสมอยู่ตั้งแต่ 0-40 เปอร์เซ็นต์โดยมีอายุการบ่ม 1, 3, 7, 28 วัน ตามตารางที่ 13 และภาพที่ 11 เห็นได้ว่าพฤติกรรมการพัฒนากำลังอัดจะมากขึ้นตามอายุของตัวอย่างเหมือนตัวอย่างการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษผสมกากตะกอน กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างทุกอัตราส่วนมีความแข็งแรงเพียงพอตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ที่ 14 กก./ซม² สำหรับนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) ได้แม้จะมีอายุเพียง 1 วัน

ตารางที่ 13 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง Geopolymer ผสมกากตะกอน

ปริมาณกากตะกอน (%)	G:S	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) ที่ระยะเวลาการบ่ม (วัน)			
		1	3	7	28
0	10:0	116	166	221	281
10	9:1	101	145	165	217
20	8:2	84	121	151	160
30	7:3	64	91	97	105
40	6:4	64	90	93	97

หมายเหตุ G = Geopolymer

S = กากตะกอนแห้ง (sludge)



ภาพที่ 11 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง Geopolymer ผสมกากตะกอน

2.2.2 ผลของปริมาณตะกอนโลหะหนักที่ผสมในตัวอย่าง Geopolymer

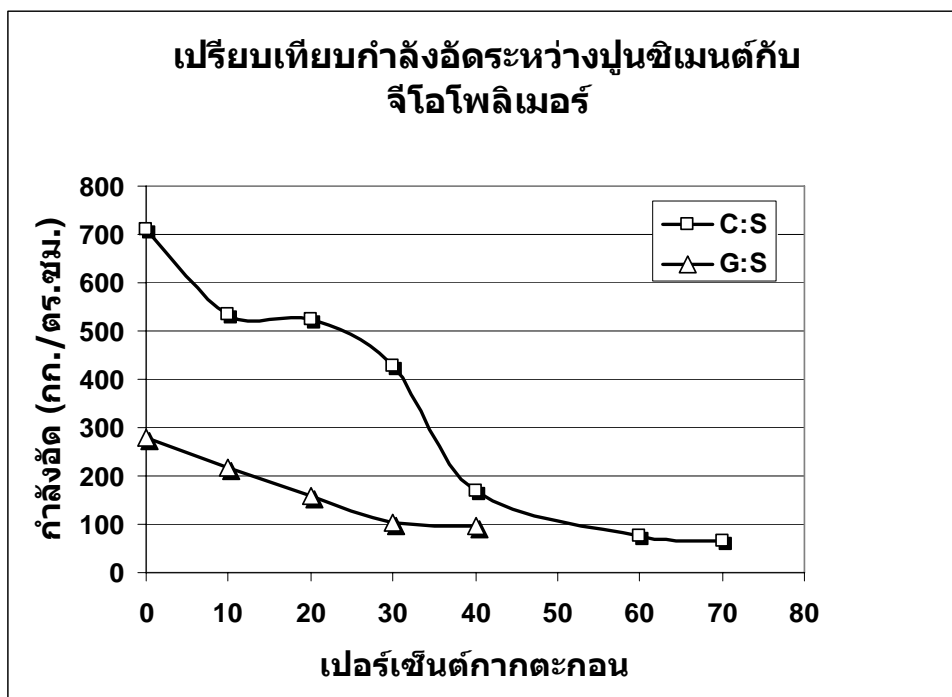
ผลการทดสอบตัวอย่าง Geopolymer ที่ไม่มีส่วนผสมของกากตะกอน (10:0 หรือ 0 เปอร์เซ็นต์) พบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 281 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อนำกากตะกอนโลหะหนักมาผสมในอัตราส่วน 10 - 40 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของ Geopolymer ลดลง การเพิ่มปริมาณกากตะกอนโลหะหนักมากขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงตามไปด้วย สำหรับจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอน 40 เปอร์เซ็นต์อายุ 1 วัน มีค่าเท่ากับ 64 กก./ชม² เป็นค่าต่ำสุดซึ่งมากกว่าค่ากำลังอัดมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดไว้ที่ 14 กก./ชม² สามารถนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย (Secured landfill) ได้

2.2.3 การเปรียบเทียบกำลังอัดของส่วนผสมปูนซีเมนต์กับจีโอโพลิเมอร์

สำหรับกำลังอัดของซีเมนต์เวสต์ (C:S) กับจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอน(G:S) ในตารางที่ 14 และภาพที่ 12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมกากตะกอนในปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์ในสัดส่วนเท่ากัน ปูนซีเมนต์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า เนื่องจากปูนซีเมนต์มีกำลังยึดเหนี่ยวมากกว่า แต่เมื่อผสมปริมาณกากตะกอนมากขึ้นกำลังอัดของปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จะมีความสามารถในการรับกำลังอัดลดลงเหมือนกัน

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เวสต์กับจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอน

ปริมาณกากตะกอน		กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ชม. ²) ที่อายุ 28 วัน	
(%)	สัดส่วน	C:S	G:S
0	10:0	710	281
10	9:1	535	217
20	8:2	523	160
30	7:3	428	105
40	6:4	169	97
60	4:6	75	-
70	3:7	67	-



ภาพที่ 12 เปรียบเทียบกำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์และจีโอโพลิเมอร์ผสมกับกากตะกอน

2.2.4 ผลของความหนาแน่นที่มีต่อกำลังอัด

ปริมาณช่องว่างของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์และจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของปริมาณกากตะกอน โดยทั่วไปคอนกรีตจะมีค่าความหนาแน่น (density) เท่ากับ 2300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (2300 กก./ม³) โดยประมาณ สำหรับซีเมนต์เพสต์ซึ่งไม่มีส่วนผสมของทรายและหิน จะมีค่าเท่ากับ 2100 กก./ม³ โดยประมาณ จากผลการทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีส่วนผสมของกากตะกอน (C:S = 10:0) ที่อายุ 28 วันจะมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2129 กก./ม³ และเมื่อทำการผสมกากตะกอนในอัตราส่วนต่างๆ ค่าความหนาแน่นลดลงตามอัตราส่วนคูได้จากตารางที่ 15 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผสมกากตะกอนลงไปเนื้อซีเมนต์เพสต์ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยความหนาแน่นจะค่อยๆ ลดลงโดยพิจารณาจากอัตราส่วน C:S เท่ากับ 10:0 (0%) ถึง 3:7 (70%) การที่ความหนาแน่นลดลงก็ย่อมจะทำให้ค่าความแข็งแรงหรือกำลังอัดลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมกากตะกอนจะมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยลดลงตามตารางที่ 14

สำหรับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ผสมกากตะกอนและผสมกากตะกอนมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เนื่องจากอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลาย (70:30) คงที่ทุกอัตราส่วนการนำกากตะกอนผสมลงไปอาจมีการเปลี่ยนแปลงบ้าง ซึ่งแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ในขณะเดียวกันความแข็งแรงจะลดลงเนื่องจากกากตะกอนไม่สามารถรับน้ำหนักได้

ตารางที่ 15 ความหนาแน่นเฉลี่ยของซีเมนต์เวสต์และจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอน

สัดส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก./ม. ³) ที่อัตราส่วนผสมกากตะกอน						
	0%	10%	20%	30%	40%	60%	70%
C:S	2129.00	2110.33	2059.00	2060.00	1965.33	1935.33	1864.00
G:S	1931.00	1939.67	1959.33	1891.67	1966.33	-	-

2.3 ความสามารถในการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมโดยการชะละลาย

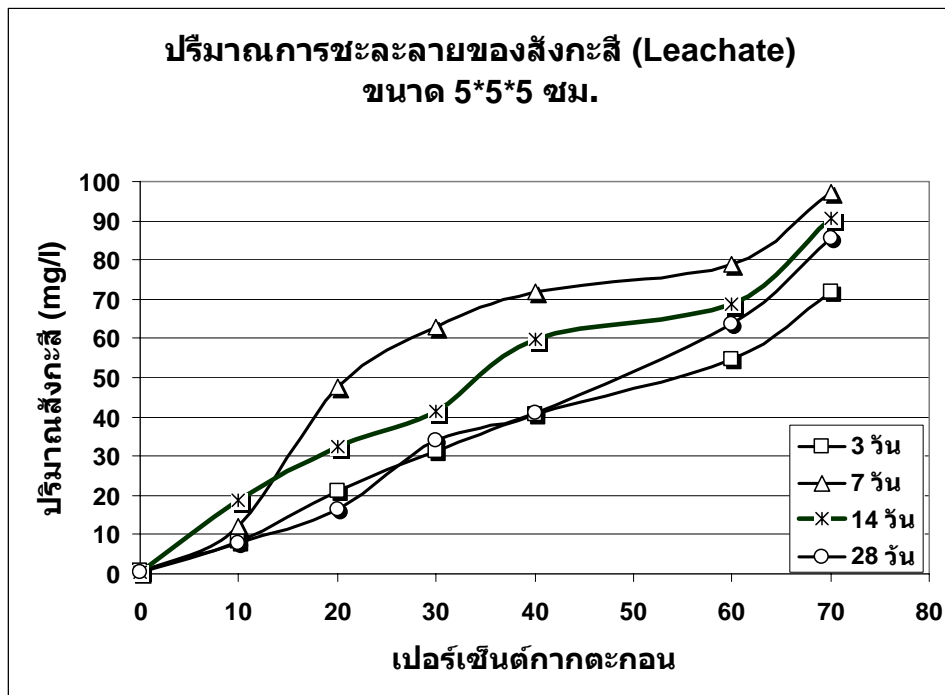
ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบจากก้อนตัวอย่างที่เก็บกักโดยใช้วัสดุ 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้มาตรฐาน TCLP (US EPA, 1992) ได้กำหนดให้ใช้กรดอะซิติกเป็นสารชะละลาย ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะของการนำตัวอย่างไปทำการฝังกลบในหลุมฝังกลบร่วมกับขยะชุมชนทั่วไป โดยปกติในขบวนการย่อยสลายขยะชุมชนจะมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อนำมาฝังกลบร่วมกันจะทำให้เกิดกรดอินทรีย์จำพวกกรด อะซิติกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีความสามารถในการละลายโลหะหนักออกจากตัวอย่างในการศึกษาจึงทดสอบโดยใช้มาตรฐาน TCLP (US EPA, 1992) หาสังกะสีและโครเมียม ผลการทดลองแสดงได้ในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การชะละลายของสังกะสีในก้อนตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP

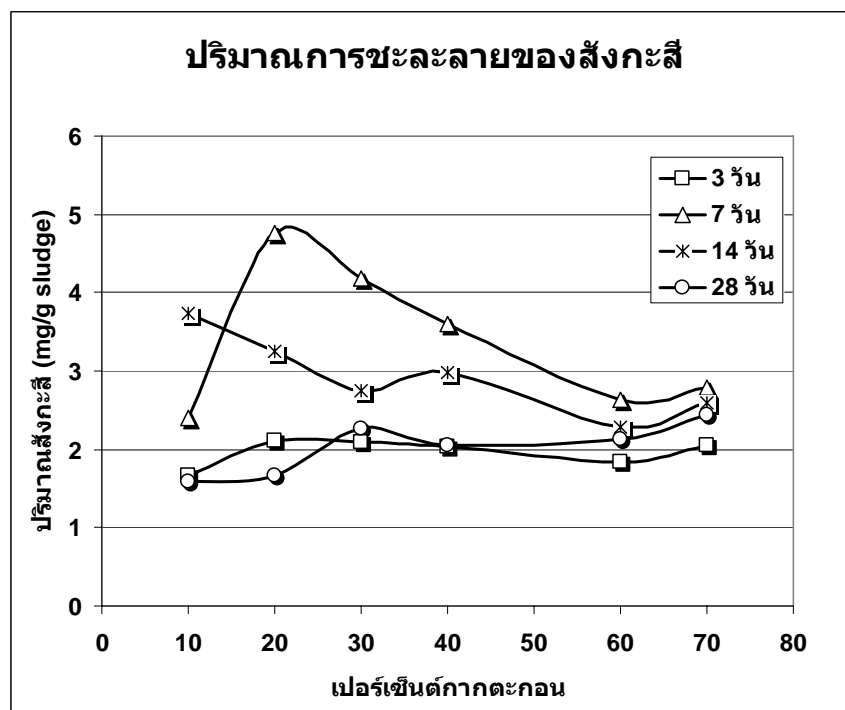
ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุตัวอย่าง (วัน)			
		ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (มก./ล.)			
(%)	C:S	3	7	14	28
0	10:0	0.928	0.43	0.345	0.245
10	9:1	8.315	12	18.69	7.92
20	8:2	21.11	47.66	32.5	16.6
30	7:3	31.4	62.8	41.3	34.08
40	6:4	40.5	72	59.88	41.2
60	4:6	54.8	79	68.68	63.6
70	3:7	72	97.2	90.8	85.7
100	0:10	-	-	-	756.4

ตารางที่ 17 การชะละลายของสังกะสีในก้อนตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP

ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุตัวอย่าง (วัน)			
		ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (มก./ก. sludge)			
(%)	C:S	3	7	14	28
0	10:0	-	-	-	-
10	9:1	1.663	2.400	3.73	1.58
20	8:2	2.11	4.76	3.25	1.66
30	7:3	2.10	4.18	2.75	2.27
40	6:4	2.03	3.6	2.99	2.06
60	4:6	1.83	2.63	2.29	2.12
70	3:7	2.06	2.78	2.59	2.44
100	0:10	-	-	-	15.13



ภาพที่ 13 ปริมาณสิ่งกะสี้ที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP



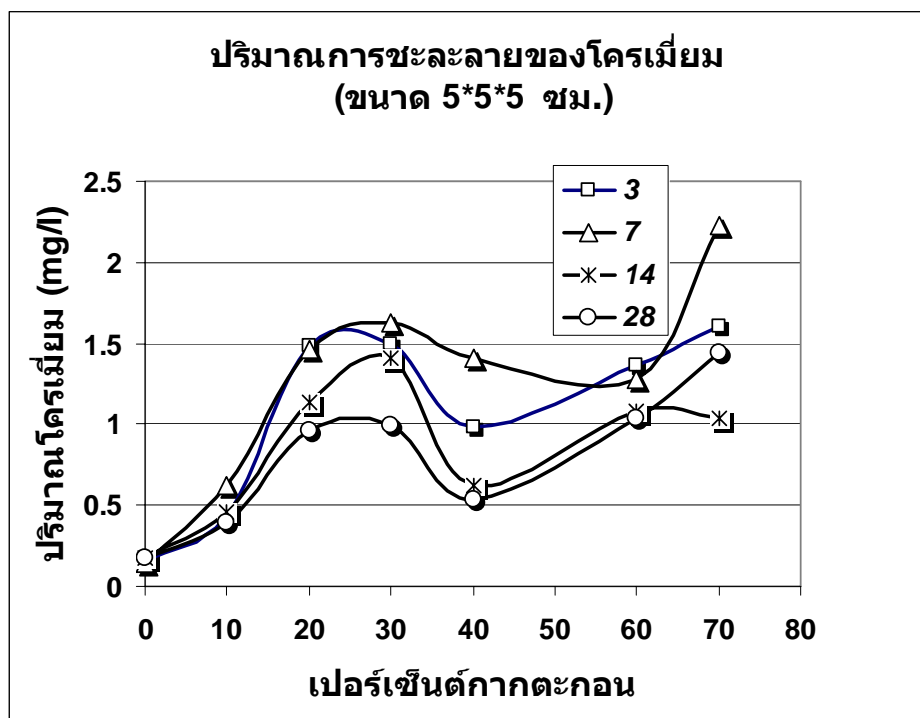
ภาพที่ 14 การชะละลายของสิ่งกะสี้ในตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP

ตารางที่ 18 การชะละลายของโครเมียมในก้อนตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP

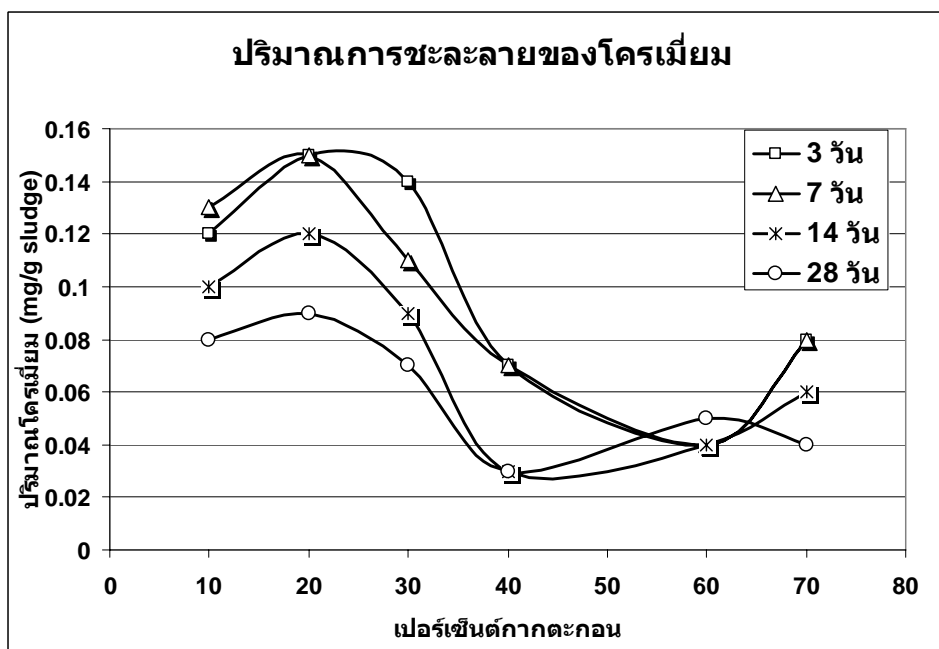
ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุตัวอย่าง (วัน)			
		ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (มก./ล.)			
(%)	C:S	3	7	14	28
0	10:0	0.15	0.14	0.17	0.18
10	9:1	0.43	0.63	0.46	0.39
20	8:2	1.49	1.46	1.14	0.96
30	7:3	1.49	1.63	1.41	0.99
40	6:4	0.98	1.40	0.62	0.53
60	4:6	1.37	1.28	1.09	1.03
70	3:7	1.61	2.78	2.08	1.44
100	0:10	-	-	-	37

ตารางที่ 19 การชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP

ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ (วัน)			
		ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (มก./ก. sludge)			
(%)	C:S	3	7	14	28
0	10:0	-	-	-	-
10	9:1	0.12	0.13	0.1	0.08
20	8:2	0.15	0.15	0.12	0.09
30	7:3	0.14	0.11	0.09	0.07
40	6:4	0.07	0.07	0.03	0.03
60	4:6	0.04	0.04	0.04	0.05
70	3:7	0.08	0.08	0.06	0.04
100	0:10	-	-	-	0.74



ภาพที่ 15 ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP



ภาพที่ 16 ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก./ก.sludge) โดยวิธี TCLP

จากผลการทดสอบการชะละลายของสังกะสีและโครเมียมโดยวิธี TCLP (US EPA, 1992) สำหรับตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอนในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 16 ถึง 19 พบว่าเมื่อก่อนตัวอย่าง (Cement waste) มีอายุการบ่มมากขึ้นการชะละลายของตัวอย่างจะลดลง เนื่องจากการพัฒนาในการรับน้ำหนักตามอายุตัวอย่างเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มกากตะกอนมากขึ้น จะพบว่ามี การชะละลายไม่มากเพราะเมื่อกำลังลดลงตัวยึดเกาะก็จะน้อยตามไปด้วย ซึ่งการชะละลายของสังกะสีกับโครเมียมจะเหมือนกัน

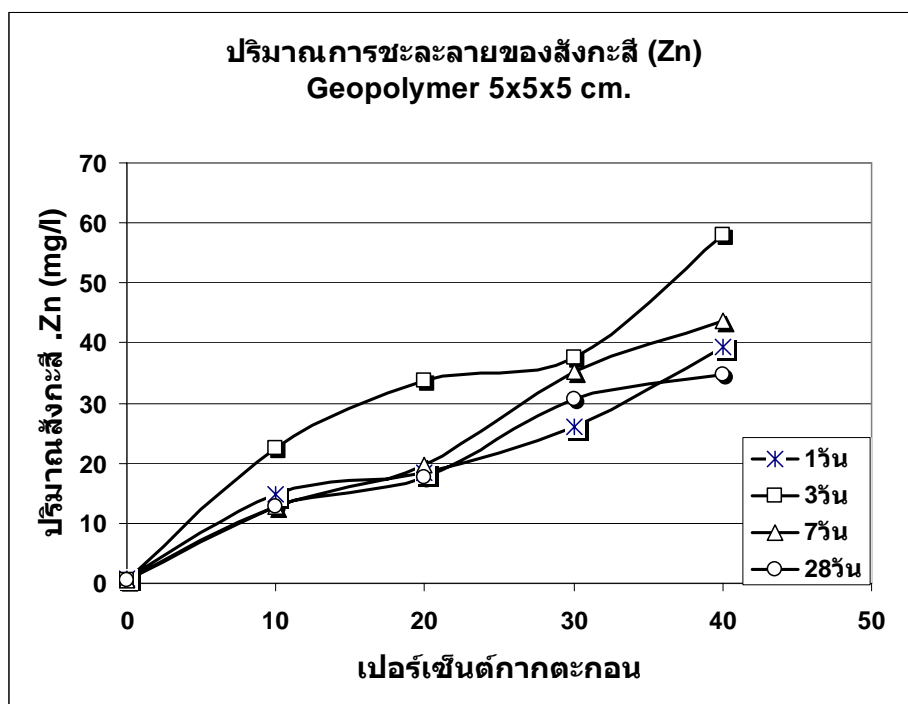
2.4 ผลการชะละลายของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอน แสดงได้ในตารางที่ 20 ถึงตารางที่ 23

ตารางที่ 20 ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ที่ผสมกากตะกอน (มก./ล.) โดยวิธี TCLP

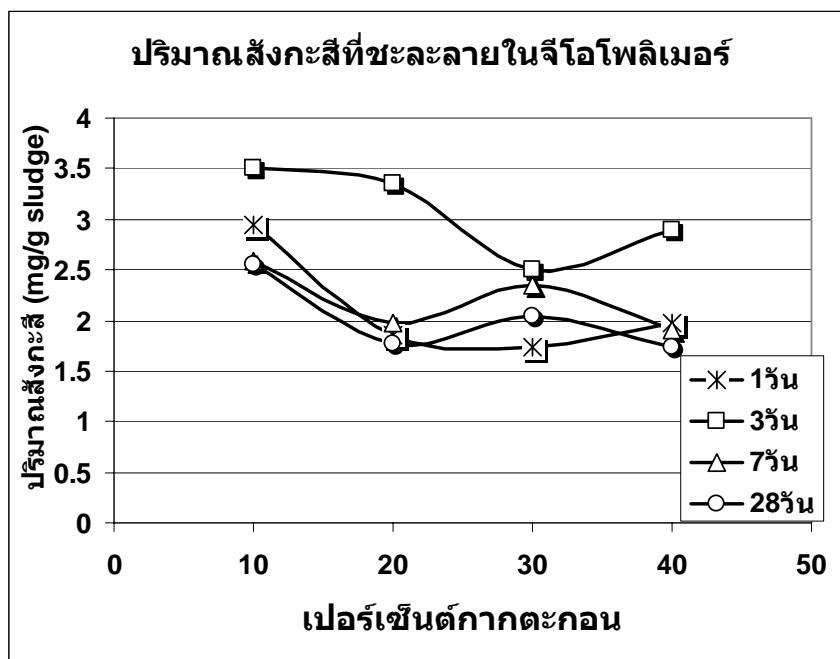
ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุตัวอย่าง (วัน)			
		ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (มก./ล.)			
(%)	G:S	1	3	7	28
0	10:0	0.7	0.503	0.482	0.482
10	9:1	14.72	17.5	12.88	12.8
20	8:2	18.5	33.6	19.68	17.7
30	7:3	25.94	37.6	35.32	30.6
40	6:4	39.36	57.92	43.6	34.64
100	0:10				756.4

ตารางที่ 21 ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ที่ผสมกากตะกอน (มก./ก.sludge)
โดยวิธี TCLP

ปริมาณกากตะกอน (%)	C:S	ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุตัวอย่าง (วัน) ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (มก./ก.sludge)			
		1	3	7	28
0	10:0	0.700	0.05	0.048	0.05
10	9:1	2.94	3.50	2.58	2.56
20	8:2	1.85	3.36	1.97	1.77
30	7:3	1.73	2.51	2.35	2.04
40	6:4	1.97	2.90	1.90	1.73
100	0:10				15.13



ภาพที่ 17 ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ที่ผสมกากตะกอน (มก./ล.)
โดยวิธี TCLP



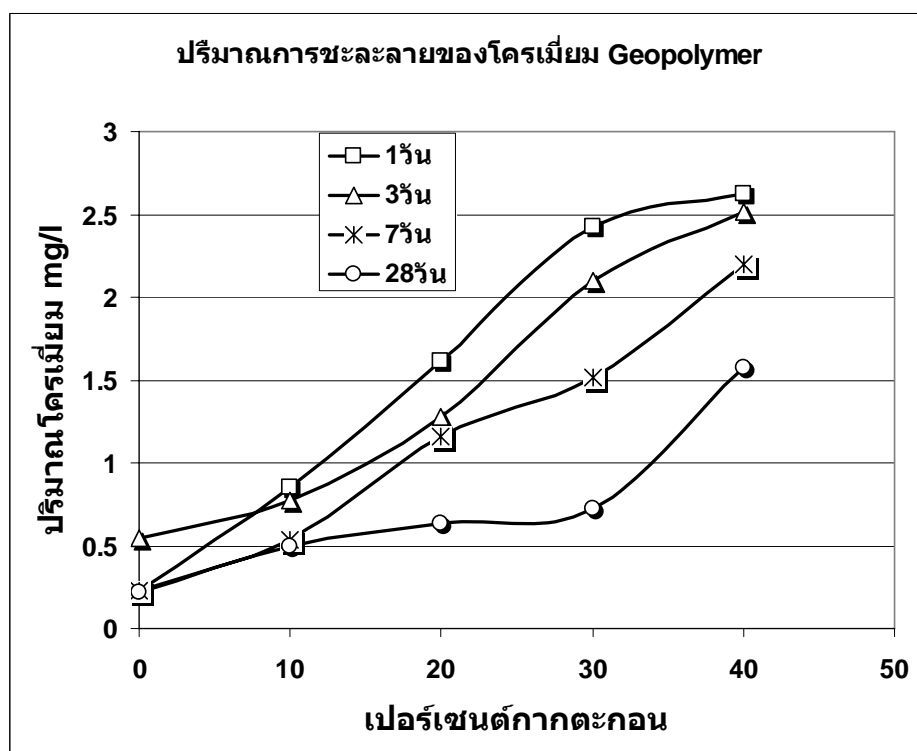
ภาพที่ 18 ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer (มก./ก sludge) โดยวิธี TCLP

ตารางที่ 22 ปริมาณ โครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ที่ผสมกากตะกอน (มก./ล.) โดยวิธี TCLP

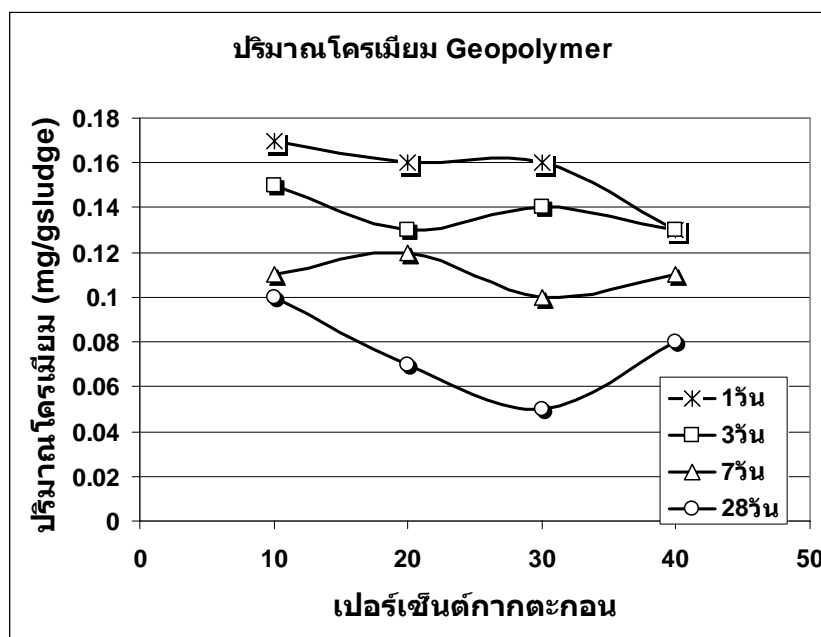
ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุตัวอย่าง (วัน)			
		ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (มก./ล.)			
(%)	G:S	1	3	7	28
0	10:0	0.23	0.55	0.23	0.22
10	9:1	0.85	0.77	0.53	0.49
20	8:2	1.62	1.28	1.16	0.63
30	7:3	2.43	2.10	1.51	0.72
40	6:4	2.62	2.51	2.20	1.57
100	0:10	-	-	-	37.0

ตารางที่ 23 ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ผสมกากตะกอน
(มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP

ปริมาณกากตะกอน (%)	G:S	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุตัวอย่าง (วัน) ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (มก./ก. sludge)			
		1	3	7	28
0	10:0	-	-	-	-
10	9:1	0.17	0.15	0.11	0.10
20	8:2	0.16	0.13	0.12	0.07
30	7:3	0.16	0.14	0.10	0.05
40	6:4	0.13	0.13	0.11	0.09
100	0:10	-	-	-	0.74



ภาพที่ 19 ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ผสมกากตะกอน (มก./ล.)
โดยวิธี TCLP



ภาพที่ 20 ปริมาณ โครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ Geopolymer ผสมกากตะกอน (มก./ก. sludge) โดยวิธี TCLP

จากตารางที่ 20 ถึงตารางที่ 23 พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ผสมกากตะกอน มีปริมาณสังกะสีและโครเมียมจากการถูกชะละลายมากขึ้น มากขึ้นตามสัดส่วนการเพิ่มปริมาณ ส่วนผสมของกากตะกอน ลักษณะคล้ายกับตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ คือถูกชะบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของ ตัวอย่าง ค่าการชะละลายในหน่วย มก./ล. จึงมีปริมาณสังกะสีและโครเมียมเพิ่มขึ้น และถ้าพิจารณา ในหน่วยของ มก./ก. sludge พบว่ามีค่าลดลงเหมือนกับซีเมนต์เวสต์ ซึ่งตัวอย่าง Geopolymer จะแตกต่างกับซีเมนต์เวสต์ตรงที่จีโอโพลิเมอร์จะมีเกลือที่มีส่วนผสมของโลหะหนัก เช่น สังกะสี และโครเมียมปะปนอยู่แล้ว ดังนั้นสังกะสีกับโครเมียมจึงมีค่าสูงกว่าตัวอย่างซีเมนต์เวสต์เล็กน้อย

3. กลไกการเก็บกักปริมาณสังกะสีและโครเมียม

ในงานวิจัยนี้ทำการเก็บกักปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอน โดยการทำให้กาก ตะกอนอยู่ในรูปของแข็ง โดยผสมในซีเมนต์เพสต์ตามอัตราส่วนต่างๆ ที่เหมาะสม การที่กาก ตะกอนผสมอยู่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์ โดยมีเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นตัวห่อหุ้มกากตะกอน เนื้อซีเมนต์เพสต์ ย่อมมีช่องว่าง (void) ของตัวเองอยู่ ปริมาณช่องว่างที่มีอยู่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์ จะมีปริมาณมากหรือน้อยอาจขึ้นอยู่กับอัตราความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์ และปริมาณกากตะกอนที่ผสม ปริมาณ

ช่องว่างที่จะประกอบไปด้วยน้ำ และอากาศ ในกรณีที่ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์อิมตัว (แช่อยู่ในน้ำ) ปริมาณช่องว่างจะเต็มไปด้วยน้ำ ไม่มีอากาศ ถ้าตัวอย่างอยู่ในสภาพไม่อิมตัวก็อาจมีทั้งน้ำและอากาศปะปนกันอยู่ เมื่อมีปริมาณช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์ โลหะหนักที่ถูกเก็บกักอาจอยู่ใน 3 ส่วนคือในน้ำในช่องว่าง (pore water) เกาะบนผิวซีเมนต์เพสต์ หรือถูกยึดไว้ในเนื้อซีเมนต์เพสต์

3.1 การเก็บกักปริมาณสังกะสี

การทดลองหาปริมาณสังกะสี เป็นการศึกษาว่าปูนซีเมนต์สามารถเก็บกักสังกะสีที่มีอยู่ในกากตะกอน โลหะหนักโดยเก็บกักไว้ใน โครงสร้างของเนื้อซีเมนต์ซึ่งจะพบได้ในการชะละลายหรือเกิดการยิดเกาะไว้ในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่จะพบได้จากการย่อย หรืออาจมีบางส่วนอยู่ในช่องว่างระหว่างเนื้อซีเมนต์เพสต์

3.1.1 ปริมาณสังกะสีในน้ำในช่องว่าง (pore water)

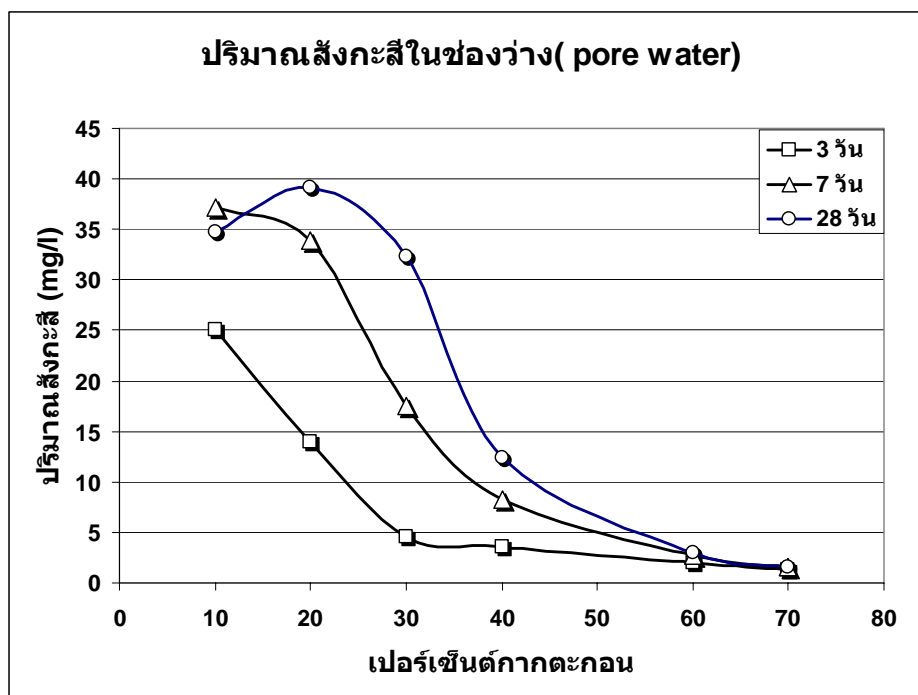
ผลการทดลองปริมาณสังกะสีในช่องว่างสำหรับตัวอย่างซีเมนต์เวสต์จะเห็นว่าปริมาณสังกะสีในน้ำในช่องว่างแตกต่างกันไม่มากนักที่อายุการบ่มต่างๆ กัน แต่ปริมาณสังกะสีในช่องว่างจะแปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่ลงไป โดยที่ปริมาณกากตะกอนยิ่งสูง ปริมาณสังกะสี (mg/l) จะลดลงทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณสังกะสีถูกเก็บกักในเนื้อซีเมนต์เวสต์โดยมีส่วนน้อยที่อยู่ในช่องว่าง แต่เมื่อใช้ตะกอนมากๆ ความแข็งแรงของก้อนตัวอย่างจะลดลงเมื่อบีบน้ำจะได้ ปริมาณสูงกว่าที่สัดส่วนตะกอนต่ำ ซึ่งมีผลให้ความเข้มข้นของสังกะสี (mg/l) ในช่องว่างต่ำลง สามารถแสดงได้ในตารางที่ 24 และ 25

ตารางที่ 24 ปริมาณสังกะสี (mg/l) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)

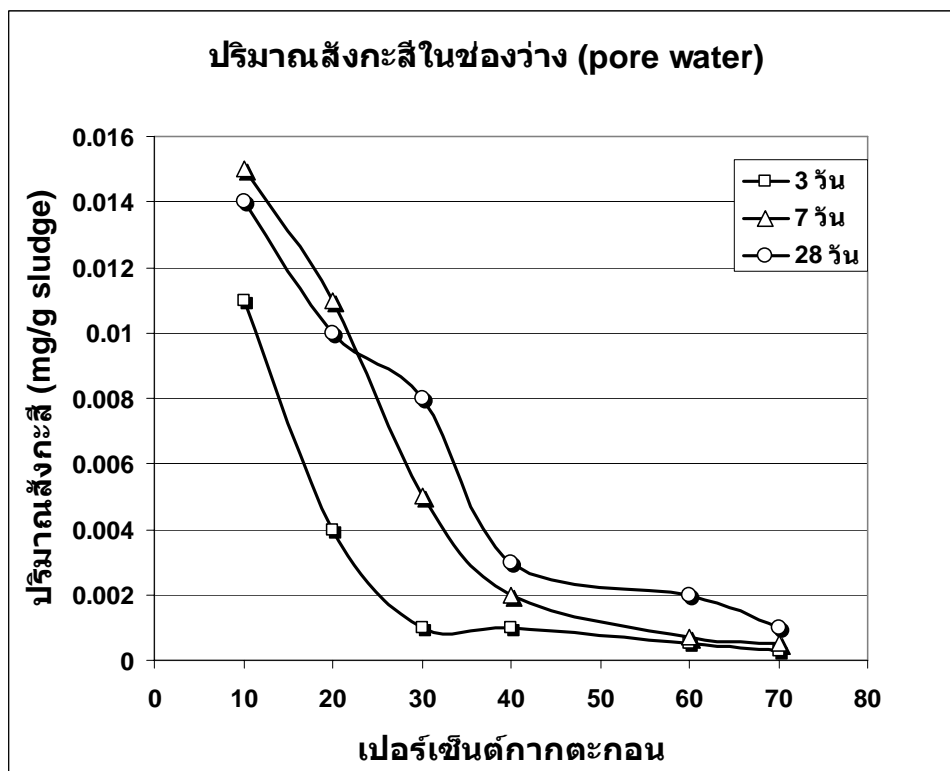
ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณสังกะสีที่อยู่ในช่องว่างตามอายุ (วัน)		
(%)	C:S	(mg/l)		
		3	7	28
10	9:1	25.12	37.10	34.72
20	8:2	13.90	33.84	39.16
30	7:3	4.62	17.54	32.26
40	6:4	3.576	8.20	12.36
60	4:6	1.96	2.62	2.75
70	3:7	1.32	1.51	1.57
100	0:10	-	-	5682

ตารางที่ 25 ปริมาณสังกะสี (mg/g sludge) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)

ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณสังกะสีที่อยู่ในช่องว่างตามอายุ (วัน)		
(%)	C:S	(mg/g sludge)		
		3	7	28
10	9:1	0.011	0.015	0.014
20	8:2	0.004	0.011	0.010
30	7:3	0.001	0.005	0.008
40	6:4	0.001	0.002	0.003
60	4:6	0.0005	0.0007	0.002
70	3:7	0.0003	0.0005	0.001
100	0:10	-	-	284.10



ภาพที่ 21 ปริมาณสังกะสี (mg/l) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)



ภาพที่ 22 ปริมาณสังกะสี (mg/g sludge) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)

3.1.2 ปริมาณสังกะสีจากการชะละลาย (Leachate) จากก้อนตัวอย่าง หลังจากบีบน้ำ

ปริมาณสังกะสีในเนื้อซีเมนต์เวสต์ของตัวอย่างที่บีบน้ำออกจากตัวอย่าง หลังจากบีบน้ำออกจากตัวอย่างแล้ว นำตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ไปทดสอบการชะละลายหาสังกะสี ตามมาตรฐาน TCLP, 1992 ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ในตารางที่ 26 และ 27

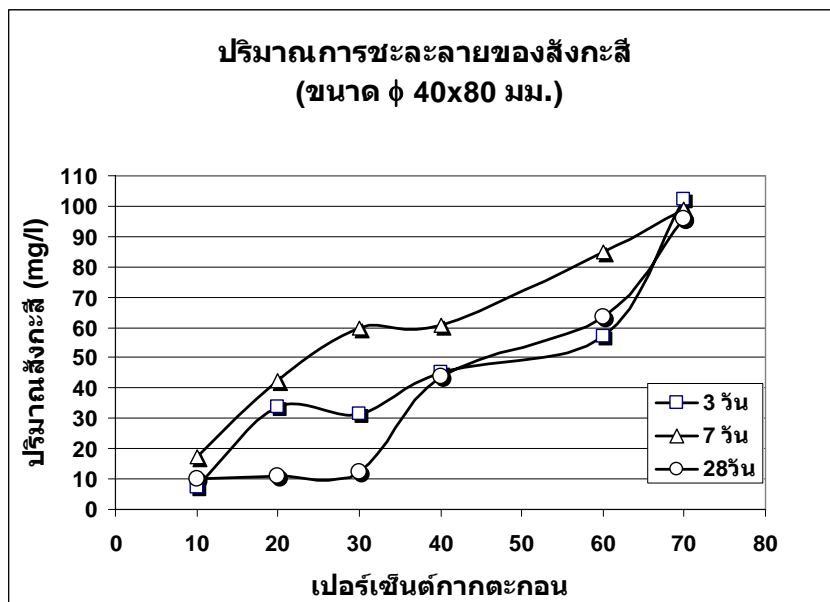
ตารางที่ 26 ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก./ล.) โดยวิธี TCLP

ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ (วัน)		
		φ 40 x 80 มม. (mg/l)		
(%)	C:S	3	7	28
10	9:1	7.125	17.40	9.975
20	8:2	34.0	42.56	11.065
30	7:3	31.28	59.84	12.14
40	6:4	45.16	60.64	43.76
60	4:6	57.20	85.0	63.60
70	3:7	102.16	98.64	95.84
100	0:10	-	-	756.40

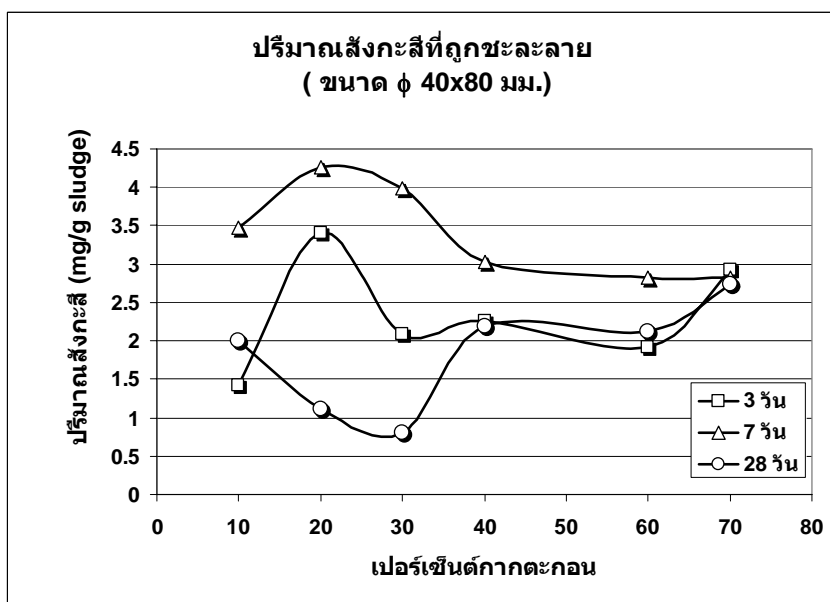
ตารางที่ 27 ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/g sludge) โดยวิธี TCLP

ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุ (วัน)		
		φ 40 x 80 มม. (mg/g sludge)		
(%)	C:S	3	7	28
10	9:1	1.425	3.48	1.995
20	8:2	3.40	4.26	1.110
30	7:3	2.09	3.99	0.809
40	6:4	2.26	3.03	2.19
60	4:6	1.91	2.83	2.12
70	3:7	2.92	2.82	2.74
100	0:10	-	-	15.13

ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายจะน้อยลงเล็กน้อยตามอายุการบ่ม แต่เมื่อพิจารณาผลของปริมาณตะกอน จะเห็นว่าที่สัดส่วนตะกอนยิ่งสูงสังกะสีก็จะถูกชะละลายออกมามากขึ้น



ภาพที่ 23 ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (มก. /ล.) โดยวิธี TCLP



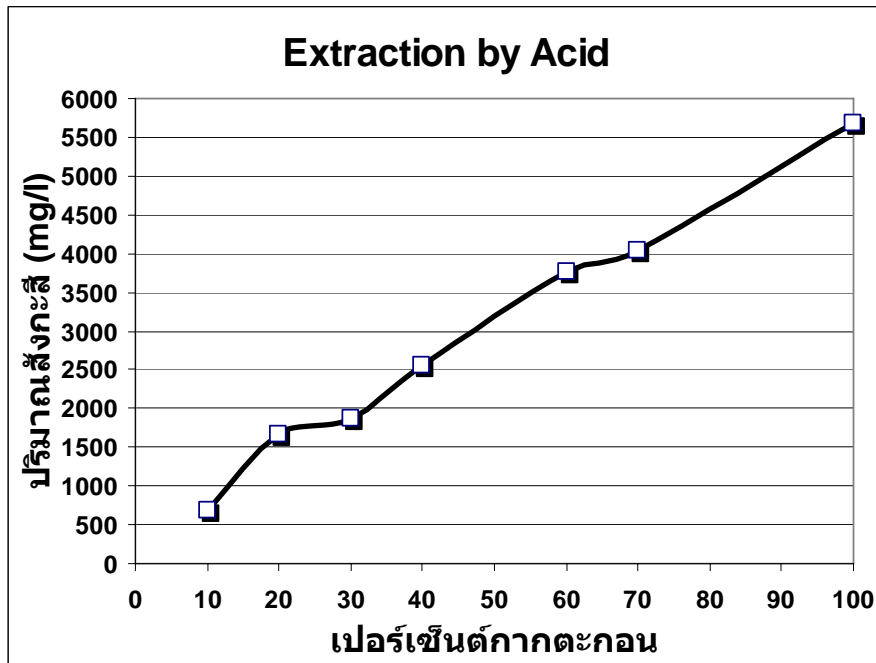
ภาพที่ 24 ปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/g sludge) โดยวิธี TCLP

3.1.3 ปริมาณสังกะสี จากการย่อยด้วยกรดในเนื้อซีเมนต์เวสต์

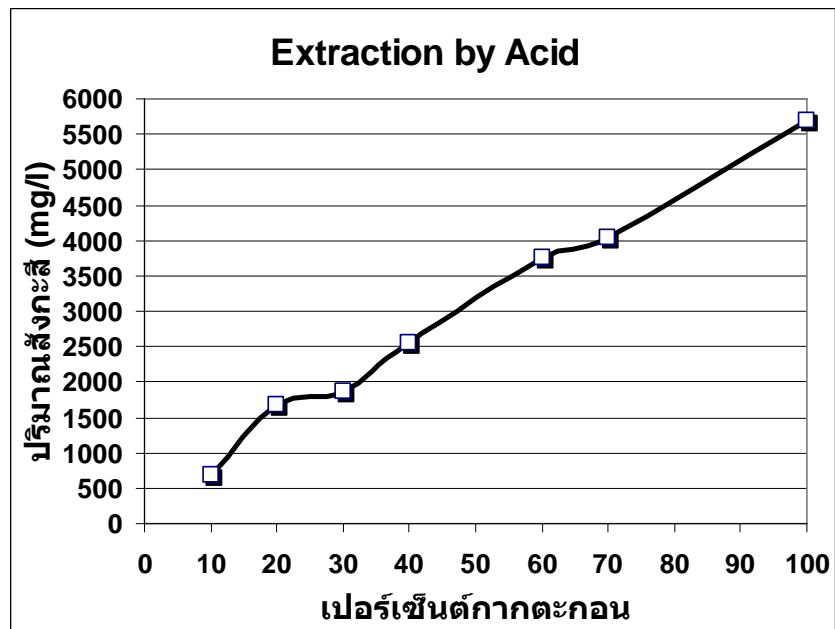
การหาปริมาณสังกะสีในเนื้อซีเมนต์เวสต์โดยการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 28 ปริมาณสังกะสีในก้อนตัวอย่าง (mg/g sludge) ควรจะมีค่าไม่ต่างกันมากนักเพราะใช้ตะกอนเดียวกัน แต่จากผลที่ได้พบว่า ปริมาณสังกะสีมีค่าแตกต่างกันตามปริมาณตะกอนและปูนซีเมนต์ โดยที่ส่วนผสมที่มีซีเมนต์มากสังกะสีจะมาก ในส่วนที่มีซีเมนต์น้อยสังกะสีจะน้อยเช่นกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปูนเป็อนมาจากสังกะสีในซีเมนต์

ตารางที่ 28 ปริมาณสังกะสีจาก Extraction by Acid ของซีเมนต์เวสต์ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ปริมาณสัดส่วนกากตะกอน (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณสังกะสี	
		(mg / l)	mg / g (Sludge)
1	10	694	347.00
2	20	1670	417.50
3	30	1873	312.16
4	40	2546	318.25
5	60	3754	312.83
6	70	4037	288.37
7	100 (Raw Sludge)	5682	284.10



ภาพที่ 25 ปริมาณสังกะสี (mg/l) จากการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid)



ภาพที่ 26 ปริมาณสังกะสี (mg/g sludge) จากการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid)

3.2 การเก็บกักปริมาณโครเมียม

การทดลองหาปริมาณสังกะสี เป็นการศึกษาว่าปูนซีเมนต์สามารถเก็บกักสังกะสีที่มีอยู่ในกากตะกอนโลหะหนักโดยเก็บกักไว้ในโครงสร้างของเนื้อซีเมนต์ซึ่งจะพบได้ในการชะละลายหรือเกิดการยิดเกาะไว้ในเนื้อซีเมนต์เฟสซึ่งพบได้ในการย่อยหมดหรืออาจมีบางส่วนอยู่ในช่องว่างระหว่างเนื้อซีเมนต์เฟส

3.2.1 ปริมาณโครเมียมในน้ำในช่องว่าง (pore water)

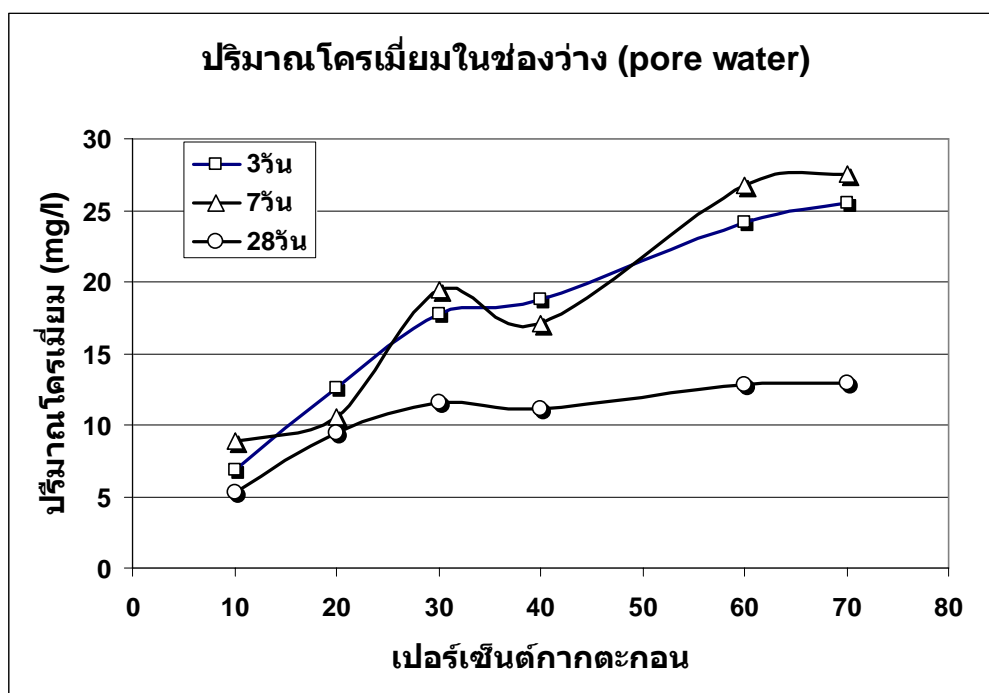
ผลการทดลองปริมาณโครเมียมในช่องว่างสำหรับตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ จะเห็นได้ว่าปริมาณโครเมียมในน้ำในช่องว่างจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อายุการบ่มต่างๆ กัน ปริมาณโครเมียมในช่องว่างจะแปรผันตามปริมาณกากตะกอนที่ใส่ลงไปโดยที่ปริมาณกากตะกอนยิ่งสูง ปริมาณโครเมียม (mg/l) จะมากขึ้น สามารถแสดงในตารางที่ 29 และ 30

ตารางที่ 29 ปริมาณโครเมียม (mg/l) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)

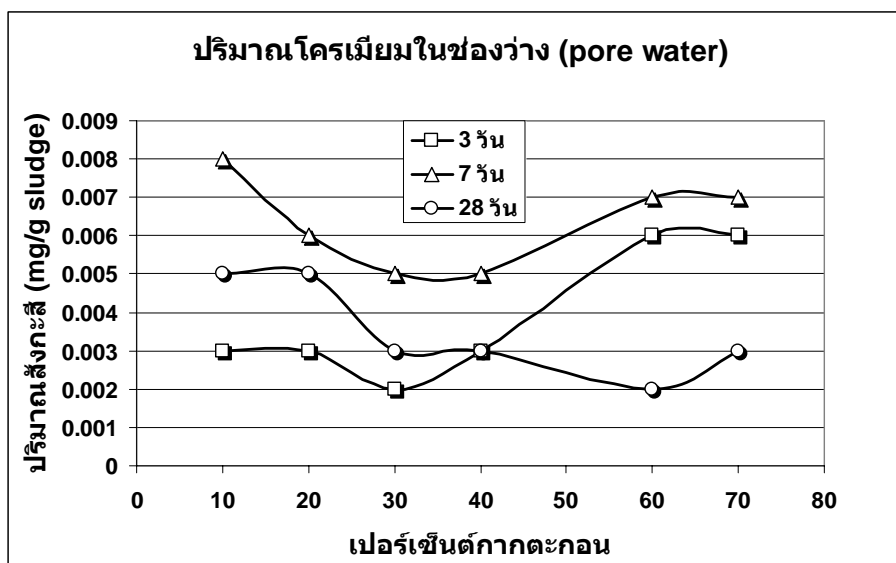
ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณโครเมียมที่มีอยู่ในช่องว่างตามอายุ (วัน)		
		(mg/l)		
(%)	C:S	3	7	28
10	9:1	6.86	17.85	10.86
20	8:2	8.18	20.20	13.73
30	7:3	6.39	19.49	12.58
40	6:4	10.20	17.10	11.12
60	4:6	25.46	27.52	9.54
70	3:7	24.19	26.77	12.91
100	0:10	-	-	778.0

ตารางที่ 30 ปริมาณโครเมียม (mg/g sludge) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)

ปริมาณกากตะกอน (%)	ปริมาณกากตะกอน C:S	ปริมาณโครเมียมที่มีอยู่ในช่องว่างตามอายุ (วัน) (mg/g sludge)		
		3	7	28
10	9:1	0.003	0.008	0.005
20	8:2	0.003	0.006	0.005
30	7:3	0.002	0.005	0.003
40	6:4	0.003	0.005	0.003
60	4:6	0.006	0.007	0.002
70	3:7	0.006	0.007	0.003
100	0:10	-	-	38.90



ภาพที่ 27 ปริมาณโครเมียม (mg/l) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)



ภาพที่ 28 ปริมาณ โครเมียม (mg/g sludge) ที่มีอยู่ในช่องว่าง (pore water)

3.2.2 ปริมาณ โครเมียมจากการชะละลาย (Leachate) จากก้อนตัวอย่าง หลังจากบีบน้ำ

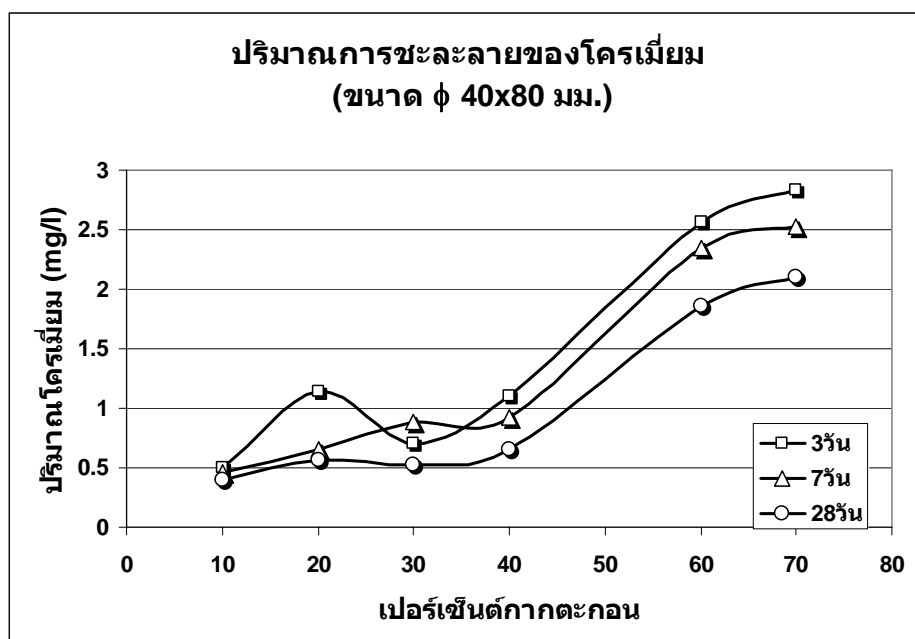
ปริมาณ โครเมียมในเนื้อซีเมนต์เวสต์ของตัวอย่างที่บีบน้ำออกจากตัวอย่าง หลังจากบีบน้ำออกจากตัวอย่างแล้ว นำตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ไปทดสอบการชะละลายหาโครเมียม ตามมาตรฐาน TCLP, 1992 ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ในตารางที่ 31 และ 32

ตารางที่ 31 ปริมาณ โครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/l) โดยวิธี TCLP

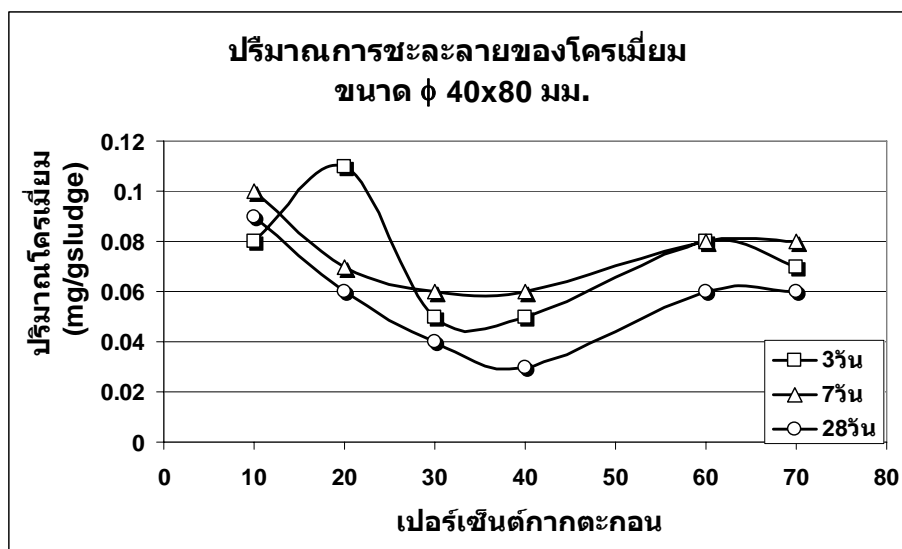
ปริมาณกาตะกอน (%)	C:S	ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ (วัน)		
		φ 40 x 80 มม. (mg/l)		
		3	7	28
10	9:1	0.5	0.46	0.4
20	8:2	1.14	0.67	0.56
30	7:3	0.70	0.88	0.52
40	6:4	1.09	0.92	0.66
60	4:6	2.56	2.65	1.86
70	3:7	2.83	3.0	2.10
100	0:10			37

ตารางที่ 32 ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/g. sludge) โดยวิธี TCLP

ปริมาณกากตะกอน		ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุ (วัน) φ 40 x 80 มม. (mg/g sludge)		
(%)	C:S	3	7	28
10	9:1	0.08	0.1	0.09
20	8:2	0.11	0.07	0.06
30	7:3	0.05	0.06	0.04
40	6:4	0.05	0.06	0.03
60	4:6	0.08	0.08	0.06
70	3:7	0.07	0.08	0.06
100	0:10	-	-	0.74



ภาพที่ 29 ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/l) โดยวิธี TCLP

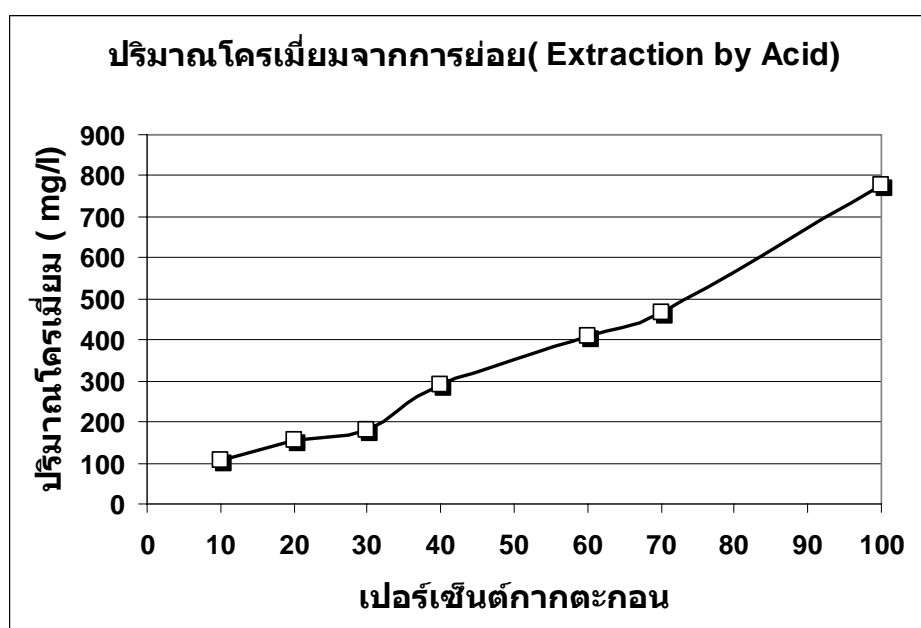


ภาพที่ 30 ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามอายุของซีเมนต์เวสต์ (mg/g sludge) โดยวิธี TCLP

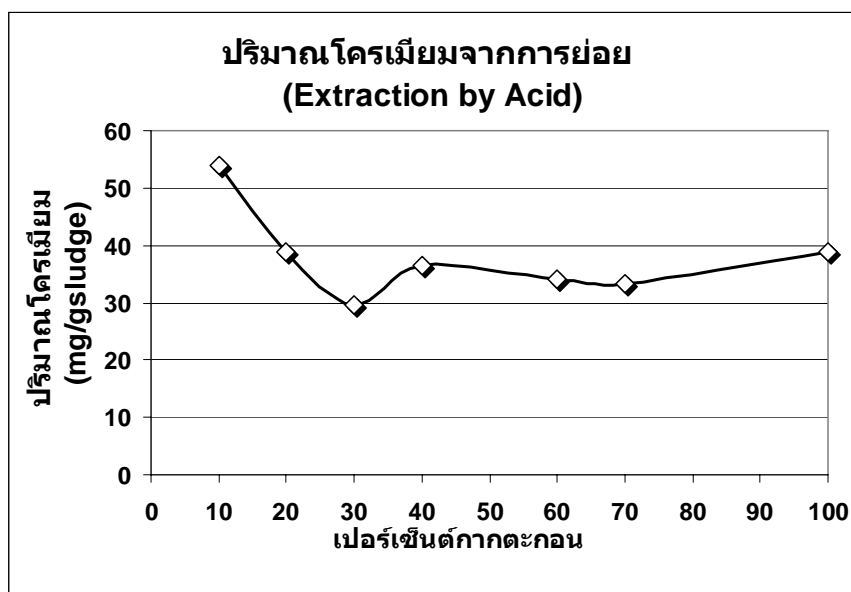
3.2.3 ปริมาณโครเมียมในเนื้อซีเมนต์เวสต์ สามารถทดสอบได้โดยทำการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid) โครเมียมจากการย่อยที่ถูกกักเก็บมีค่าตั้งแต่ 107 ถึง 467 mg/l หรือ 30 ถึง 54 mg/g sludge ในส่วนที่ไม่ได้เก็บกักด้วยปูนซีเมนต์มี โครเมียม 778 mg/l หรือ 39 mg/g sludge จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณโครเมียม (mg/l) มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในซีเมนต์เวสต์ เมื่อพิจารณาโครเมียม mg/g sludge พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกันเนื่องจากเป็นตะกอนเดียวกัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 33

ตารางที่ 33 ปริมาณโครเมียมจากย่อย (Extraction by Acid) ของซีเมนต์เวสต์ อายุ 28 วัน

ตัวอย่างที่	ปริมาณสกัดส่วนกาก		ปริมาณโครเมียม	
	ตะกอน (เปอร์เซ็นต์)	mg / l	mg / g sludge	
1	10	107.70	53.85	
2	20	155.30	38.83	
3	30	178.20	29.70	
4	40	291.40	36.43	
5	60	410.20	34.18	
6	70	467.50	33.39	
7	100	778.00	38.90	



ภาพที่ 31 ปริมาณโครเมียม (mg/l) จากการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid)



ภาพที่ 32 ปริมาณโครเมียม (mg/g sludge) จากการย่อยด้วยกรด (Extraction by Acid)

3.3 การเปรียบเทียบการเก็บกักปริมาณสังกะสีและโครเมียมในส่วนต่างๆ ของก้อนตัวอย่าง

ปริมาณสังกะสีและโครเมียม (mg/g sludge) จาก 3 ส่วนของก้อนตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้ถูกแยกออกมาเปรียบเทียบ เพื่อใช้ในการพิจารณากลไกการเก็บกักปริมาณสังกะสีและโครเมียม ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ในตารางที่ 34 และ 35

จะเห็นได้ว่าปริมาณสังกะสีและโครเมียมอยู่ในส่วนที่ได้จากการย่อยก้อนซีเมนต์เวสต์มากที่สุด โดยอยู่ในช่องว่าง (pore water) และได้จากการชะละลายในสัดส่วนที่น้อยมาก แสดงให้เห็นว่าปริมาณสังกะสีและโครเมียมถูกเก็บกักอย่างแข็งแรง หรือถูกเก็บกักไว้ในเนื้อซีเมนต์เพส

ตารางที่ 34 สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสี (28 วัน)

ตัวอย่างที่	เปอร์เซ็นต์ถาก		ปริมาณสังกะสี mg/g (Sludge)		
	ตะกอน	Extract by Acid	Leachate	Pore water	
1	10	347.00	2.00	0.014	
2	20	417.50	1.11	0.010	
3	30	312.16	1.62	0.008	
4	40	318.25	1.19	0.003	
5	60	312.83	2.12	0.002	
6	70	288.36	2.74	0.001	
7	100	284.10	15.13	-	

ผลการศึกษาปริมาณสังกะสีในตัวอย่าง จากตารางที่ 34 พบว่าปริมาณสังกะสีมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์จะอยู่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์เพียง 0.003 เปอร์เซ็นต์ที่อยู่ในน้ำในช่องว่าง (pore water) การชะละลายหลังการเก็บกักในซีเมนต์เพสต์สังกะสี 13 เปอร์เซ็นต์ ที่ถูกชะละลายออกมา เมื่อพิจารณาสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมามากที่สุด จากสัดส่วนกากตะกอน 70 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 102 mg/l น้อยกว่าค่ามาตรฐาน โดยวิธี TCLP ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 250 mg/l

ตารางที่ 35 สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (28 วัน)

ตัวอย่างที่	เปอร์เซ็นต์ถาก		ปริมาณโครเมียม (mg/g sludge)		
	ตะกอน	Extract by Acid	Leachate	Pore water	
1	10	53.85	0.09	0.005	
2	20	38.83	0.06	0.005	
3	30	29.70	0.04	0.003	
4	40	36.43	0.03	0.003	
5	60	34.18	0.06	0.002	
6	70	33.39	0.06	0.003	
7	100	38.90	0.74	-	

ปริมาณโครเมียมในตัวอย่าง จากตารางที่ 35 พบว่าปริมาณโครเมียมมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ จะอยู่ในเนื้อซีเมนต์เวสต์มีเพียง 0.01 เปอร์เซ็นต์ที่อยู่ในน้ำในช่องว่าง (pore water) การชะละลาย หลังการเก็บกักมีโครเมียม 8 เปอร์เซ็นต์ที่ถูกชะละลายออกมาหรือป้องกันการชะละลายได้ 92 เปอร์เซ็นต์ โครเมียมที่ถูกชะละลายออกมามากที่สุด จากสัดส่วนกากตะกอน 70 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณ 3 mg/l น้อยกว่าค่ามาตรฐาน โดยวิธี TCLP ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 5 mg/l

ดังนั้นกลไกการเก็บกักกากตะกอนในรูปซีเมนต์เวสต์จากตัวอย่างที่มีกากตะกอนผสม อยู่ 10, 20, 30, 40, 60, 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่ ปริมาณสังกะสีและโครเมียมจะถูกเก็บกักในเนื้อ ซีเมนต์เพสมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ มีเพียงส่วนน้อยประมาณ 0.003 เปอร์เซ็นต์ (สังกะสี) และ 0.01 เปอร์เซ็นต์ (โครเมียม) ที่อยู่ในน้ำของช่องว่างและสามารถเก็บกักสังกะสีและโครเมียมในการถูก ชะละลายได้มากกว่า 87 เปอร์เซ็นต์

ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงหลังการชะละลายของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ และจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่างซีเมนต์เพสที่ผสมกากตะกอนในอัตราส่วนต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลง หลังการชะละลาย (Leachate) จากการคุมค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 2.88 เมื่อทำ การทดสอบกับตัวอย่างเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ค่า pH จะเปลี่ยนแปลง สามารถดูได้ในภาคผนวก

4. การเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

4.1 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อสภาพแวดล้อม

การเลือกสัดส่วนที่เหมาะสม สำหรับสภาพแวดล้อมหรือการนำไปใช้โดยไม่ ก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม ควรคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆ เช่น กำลังอัด (Compressive Strength) ปริมาณที่โลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาและค่าใช้จ่าย เป็นต้น การพิจารณาเลือก สัดส่วนสามารถพิจารณาเป็นข้อสรุปต่างๆ ได้ดังนี้

4.1.1 พิจารณากำลังอัด (compressive strength)

สำหรับกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานการนำไปทิ้งในบ่อฝังกลบคือ 14 กก./ซม.² ตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์กำจัด ฝัง ทิ้ง เคลื่อนย้าย และการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ฉบับที่ 1) พ.ศ. 2531 อัตราส่วนผสมทุกอัตราส่วนสามารถนำไปฝังกลบแบบปลอดภัย (Secured landfill) ได้ แต่อัตราส่วนผสมที่ประหยัดคือ 3:7 เนื่องจากมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งาน และก้อนจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนก็มีกำลังอัดเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกอัตราส่วนสามารถนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบ (Secured Landfill) ได้อย่างปลอดภัย

4.1.2 พิจารณาการชะละลาย (Leaching)

จากตารางที่ 26 เมื่อนำปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายมาพิจารณาอัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบที่อายุ 28 วัน ซึ่งปริมาณสังกะสีที่อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 90% (9:1) จะมีปริมาณสังกะสีเท่ากับ 9.97 มก./ล. คิดเป็น 2 มก./ก. (sludge) หรือ 13% ของกากตะกอนที่ละลายออกมา ซึ่งอัตราส่วนผสมนี้ แม้จะมีกำลังอัดเฉลี่ยสูงและปริมาณสังกะสีอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่ามาตรฐาน (TCLP US EPA, 1992 เท่ากับ 250 มก./ล.) ก็จะมีค่าใช้จ่ายสูงตามด้วย เมื่อพิจารณาอัตราส่วนผสมที่ 3:7 (C:S) ที่มีปริมาณสังกะสีเท่ากับ 95.84 มก./ล. คิดเป็น 2.74 มก./ก. (sludge) หรือ 13% ของกากตะกอนที่ละลายออกมา จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนผสม 3:7 (C:S) มีอัตราการชะละลายอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและกำลังอัดเฉลี่ยก็ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม 3:7 เหมาะสมในการนำไปใช้

สำหรับตารางที่ 31 ปริมาณโครเมียมส่วนผสมที่ 9:1 (C:S) มีกำลังอัดเฉลี่ยและการชะละลายสูงเกินมาตรฐานมาก จึงจะพิจารณาที่อัตราส่วน 3:7 ซึ่งมีปริมาณโครเมียมเท่ากับ 2.1 มก./ล. คิดเป็น 0.06 มก./ก. (sludge) หรือ 8 % ของโครเมียมที่ละลายออกมา ซึ่งปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายตามมาตรฐานไม่เกิน 5 มก./ล. ดังนั้นในการพิจารณาสามารถสรุปได้ว่าการนำอัตราส่วนผสม 3:7 (C:S) ไปใช้งานสามารถนำไปฝังกลบได้อย่างปลอดภัยไม่ปนเปื้อนสู่สภาพแวดล้อม และประหยัดค่าใช้จ่าย ที่สำคัญได้ตามมาตรฐานการนำไปใช้งาน

ส่วนจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) จะพิจารณาปริมาณสังกะสีที่อัตราส่วนผสม 6:4 ที่มีปริมาณเท่ากับ 34.64 มก./ล. คิดเป็น 1.73 มก./ก. (sludge) หรือเท่ากับ 11 % ที่สังกะสีละลายออกมาและปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาเท่ากับ 1.57 มก./ล. คิดเป็น 0.09 มก./ก. (sludge) หรือเท่ากับ 12 % ที่โครเมียมละลายออกมา ดังนั้นจากข้อมูลในการพิจารณาสรุปได้ว่า อัตราส่วนผสม 6:4 ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์สามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัยและได้ค่าตามมาตรฐาน

4.2 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้าง

การพิจารณากากตะกอนโลหะหนักไปใช้ในงานก่อสร้าง เช่น อิฐบล็อก หรือ ซีเมนต์บล็อก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือความแข็งแรงด้านกำลังอัด และการชะละลาย (Leaching test) ซึ่งเป็นคุณสมบัติในการควบคุม ไม่ให้เกิดอันตรายต่อการใช้งาน

4.2.1 สำหรับกำลังอัดมาตรฐาน เพื่อนำไปใช้งานก่อสร้างจะต้องมีกำลังไม่ต่ำกว่า 200 กก./ตร.ซม. (Khomgrit, 1993) จากผลการทดสอบในตารางที่ 12 สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม C:S ที่ 6:4 4:6 และ 3:7 มีกำลังอัดเฉลี่ย 169, 75 และ 67 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ แสดงว่าอัตราส่วนผสมนี้มีความแข็งแรงไม่เพียงพอการนำไปใช้งานก่อสร้าง

อัตราส่วนผสม C:S ที่ 9:1 8:2 และ 7:3 มีกำลังอัดเฉลี่ย 535, 523, 428 กก./ตร.ซม. มีกำลังอัดเฉลี่ยเกิน 200 กก./ตร.ซม. ซึ่งสามารถนำไปใช้งานก่อสร้างได้

และจากตารางที่ 13 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ที่นำมาผสมกากตะกอนหากใช้ในงานก่อสร้าง ก็ต้องมีกำลังอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 200 กก./ตร.ซม. เมื่อพิจารณาจากตารางพบว่าอัตราส่วนผสม G:S ที่ 8:2, 7:3, 6:4 มีกำลังอัดเฉลี่ยที่ 160, 105, 97 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดไม่ถึง 200 กก./ตร.ซม. จึงไม่สามารถนำไปใช้งานก่อสร้างได้ จะมีเฉพาะ G:S ที่ 9:1 เท่านั้นที่มีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 217 กก./ตร.ซม. ที่สามารถนำไปใช้งานได้

4.3 ปัจจัยในการเลือกใช้งานระหว่างปูนซีเมนต์กับ Geopolymer

เมื่อพิจารณาการนำกากตะกอนมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I และ Geopolymer สามารถพิจารณาความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน โดยพิจารณาจากปัจจัยหลายๆ ด้านสามารถสรุปได้ดังนี้

4.3.1 ด้านกำลังอัด (Ultimate compressive)

จากการทดสอบโดยเลือกอัตราส่วนผสมเดียวกัน จาก 0-70% พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะให้ค่าความแข็งแรงด้านกำลังอัดสูงกว่าทุกอัตราส่วน ดังนั้นกำลังอัดปูนซีเมนต์กับกากตะกอน (ซีเมนต์เวสต์) จึงย่อมดีกว่า

4.3.2 ด้านการชะละลาย (Leaching)

จากผลการทดลอง จะเห็นว่าปริมาณสังกะสีและโครเมียมที่ถูกชะออกมามีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่ส่วนผสมของซีเมนต์เวสต์จะมีความสามารถในการเก็บกักได้ดีกว่าเล็กน้อย

4.3.3 ด้านการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถนำมาใช้งานได้ทันที แต่ควรเก็บรักษาอย่าให้สัมผัสกับความชื้น ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์จะต้องเตรียมสารละลายระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมซิลิเกตก่อน 24 ชั่วโมงแล้วนำมาผสมกับเถ้าลอย หลังจากนั้นจึงนำกากตะกอนมาผสม

ดังนั้นพอสรุปได้ว่า การนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับจีโอโพลิเมอร์มาใช้สำหรับเก็บกักกากตะกอน โลหะหนักสามารถระบุได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเหมาะสมกว่าการใช้จีโอโพลิเมอร์ โดยเฉพาะเรื่องค่าใช้จ่ายที่ถูกลง แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ในสัดส่วนที่ต่ำหรือใช้สารละลายในการผสมน้อยที่สุด เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต การเลือกใช้อัตราส่วนเถ้าลอย (Fly ash) กับสารละลาย ในอัตราส่วน 70:30 เป็นสัดส่วนที่พอเหมาะในการนำมาทดสอบการเก็บ

กักกาคตะกอนโลหะหนักสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากอัตราส่วนผสมนี้สามารถใช้งานได้ ซึ่งถ้าเพิ่มส่วนผสมให้สูงขึ้น เช่น 40:60, 50:50 หรือ 60:40 ก็สามารถใช้งานได้ผลที่ตามมาคือค่าใช้จ่ายจะเพิ่มตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าส่วนผสม 70:30 เมื่อเทียบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I แล้วปูนซีเมนต์จะดีกว่า แต่หากใช้ Geopolymer ที่ส่วนผสมอื่นคุณสมบัติด้านกำลังอัด หรือการถูกชะก็น่าจะดีขึ้น และค่าใช้จ่ายก็อาจสูงขึ้นตามไปด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทดลองและศึกษาเกี่ยวกับการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมในซีเมนต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณสังกะสีและโครเมียมในกากตะกอนจะถูกเก็บกักในเนื้อซีเมนต์เวสต์มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ มีอยู่ในช่องว่าง (pore water) เพียง 0.003 เปอร์เซ็นต์ และ 0.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่ถูกชะละลาย 13 เปอร์เซ็นต์และ 8 เปอร์เซ็นต์ หรือป้องกันการถูกชะละลาย ได้ 87 เปอร์เซ็นต์ และ 92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ
2. ปูนซีเมนต์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักมีพฤติกรรมการรับกำลังอัด เช่นเดียวกับ ปูนซีเมนต์ หรือซีเมนต์เพสต์ทั่วไป ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ระหว่าง 67 – 535 กก./ตร.ซม. เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมกากตะกอน จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง
3. จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักมีพฤติกรรม เช่นเดียวกับ ปูนซีเมนต์ โดยมีกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ระหว่าง 97 – 217 กก./ตร.ซม. เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเหมือนปูนซีเมนต์
4. เมื่อเติมกากตะกอนโลหะหนัก (sludge) มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์และ จีโอโพลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยเป็นวัสดุพื้นฐาน แปรผันตามสัดส่วนของปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนโลหะหนัก จะเริ่มพัฒนาตั้งแต่ 1-3 วัน และมากสุดใน 28 วัน ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด สำหรับส่วนผสม ปูนซีเมนต์กับกากตะกอนโลหะหนัก 3:7 เท่ากับ 26 กก./ตร.ซม. และส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์กับ กากตะกอนโลหะหนัก 6:4 เท่ากับ 64 กก./ตร.ซม. โดยที่มาตรฐานตามประกาศกรมโรงงาน อุตสาหกรรม ซึ่งได้กำหนดสิ่งปฏิกูลที่ทำให้เป็นก๊อตันต้องมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 14 กก./ตร.ซม. ดังนั้นปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักในทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ มาตรฐานกำหนด

5. การชะละลาย (Leachate) ของกรดอะซิติก ที่มีผลการชะละลายของสังกะสีและโครเมียม จากก้อนตัวอย่างของปูนซีเมนต์และจีโอ โพลีเมอร์ ที่ควบคุมค่า pH ที่ 2.88 ตามมาตรฐาน TCLP, 1992 สำหรับตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์กับกากตะกอนโลหะหนัก และจีโอ โพลีเมอร์กับกากตะกอน มีผลการชะละลายเหมือนกัน คือแปรผันตามสัดส่วนของปริมาณกากตะกอนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น สำหรับจีโอ โพลีเมอร์ที่มีเถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุพื้นฐานซึ่งมีสังกะสีกับโครเมียมปะปนอยู่ จึงมีค่าสูงกว่าส่วนผสมของปูนซีเมนต์เล็กน้อย สำหรับค่าสูงสุดในการชะละลายของปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอนโลหะหนัก (3:7) มีสังกะสี 102.16 mg/l, โครเมียม 3.0 mg/l และส่วนผสมจีโอ โพลีเมอร์กับกากตะกอนโลหะหนัก (6:4) มีสังกะสี 57.92 mg/l โครเมียม 2.62 mg/l โดยที่มาตรฐาน TCLP กำหนดให้การชะละลายของสังกะสีไม่เกิน 250 mg/l และ โครเมียมไม่เกิน 5 mg/l ดังนั้น ส่วนผสมของปูนซีเมนต์และจีโอ โพลีเมอร์ทุกอัตราส่วนจึงมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ทำให้การชะละลายไม่ทำลายสภาพแวดล้อมทั่วไปหากมีการชะละลายออกมา

6. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการเก็บกักสังกะสีและโครเมียม ด้วยปูนซีเมนต์และจีโอ โพลีเมอร์ จากผลการทดลองการเก็บกักในปูนซีเมนต์ พบว่า สามารถนำกากตะกอน โลหะหนักผสมในปูนซีเมนต์คิดเป็นสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอน โลหะหนักเท่ากับ 3:7 หรือนำกากตะกอนโลหะหนักผสมได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ สำหรับจีโอ โพลีเมอร์สามารถนำกากตะกอนโลหะหนักผสมในอัตราส่วน จีโอ โพลีเมอร์: กากตะกอน โลหะหนักเท่ากับ 6:4 หรือนำกากตะกอนโลหะหนักผสมได้ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยกำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม และการชะละลายด้วยกรดอะซิติก โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP, 1992) สามารถเก็บกักสังกะสีและโครเมียม ซึ่งค่าชะละลายต่ำกว่ามาตรฐานของ TCLP (US EPA, 1992) กำหนดไว้ ดังนั้นปูนซีเมนต์และจีโอ โพลีเมอร์ (สำหรับส่วนผสม $\text{Na}_2\text{O}_3\text{SiO}/\text{NaOH}$ คือ 1.5:1) สามารถนำมาเก็บกักสังกะสีและโครเมียมได้อย่างปลอดภัย

ข้อเสนอแนะ

1. นำปอชโฆลานชนิดอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ดินขาว ตะกอนน้ำประปา มาเป็นส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเก็บกักสังกะสีและโครเมียมหรือโลหะหนักอื่นๆ จากกากตะกอนโลหะหนัก

2. นำปอซโซลานชนิดอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ดินขาว ตะกอนน้ำประปา มาเป็นวัสดุพื้นฐานในการทำอิโพลิเมอร์ เพื่อเป็นทางเลือกในการเก็บกักสังกะสี โครเมียม หรืออื่นๆ จากกากตะกอนโลหะหนัก

3. นำโลหะหนักชนิดอื่นๆ เช่น แคดเมียม สารหนู ตะกั่ว ปรอท มาทดลองเก็บกักด้วยปูนซีเมนต์และอิโพลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยเป็นวัสดุพื้นฐาน

4. นำอิโพลิเมอร์ที่ใช้สำหรับทดลองที่มีส่วนผสมโซเดียมซัลเฟตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{SiO}/\text{NaOH}$) ในอัตราส่วนผสมอื่นๆ มาทดลองเก็บกักสังกะสี โครเมียม เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเก็บกักกากตะกอนโลหะหนักต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2531. ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ
ทำลายฤทธิ์กำจัด ฝั ง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ฉบับที่ 1)
พ.ศ. 2531. ม.ป.ท.

_____. 2539. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2539. กระทรวงอุตสาหกรรม,
กรุงเทพฯ.

_____. 2548. ตำราระบบการจัดการมลพิษกากอุตสาหกรรม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. 2538. ความรู้สิ่งเป็นพิษ. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวง
สาธารณสุข.

ชัยศรี สุขสาโรจน์. 2542. การเก็บกักของเสียอันตรายด้วยซีเมนต์-ซีเมนต์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปกรณ์ ส่วนภาษา. 2541. การศึกษาความเป็นไปได้ในการทำของเสียอันตรายให้เสถียร โดยใช้
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวิต. 2536. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. ม.ป.ท.

พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย. 2536. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2531)
สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

มัลลิกา ปัญญาคะโป. 2542. เอกสารประกอบวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม “ของเสียอันตราย”.
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ไขพกา เพ็ชรศรีวัชรา. 2537. ความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนโลหะหนักมาใช้เป็นวัตถุดิบ
สำหรับผลิตกระเบื้องดินเผาปูพื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิจิตร บุญยะโทตระ. 2538. **ชีวิตและสิ่งแวดล้อม**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.

วินิต ช่อวิเชียร. 2529. **คอนกรีตเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์**
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

เริงศักดิ์ นนทิมธากุล และ อติศักดิ์ จุฑาศิริวงศ์. 2549. **ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน**.
พิมพ์ครั้งที่ 3. ม.ป.ท.

ศักดิ์ดา วรพิพัฒน์. 2538. **การทำเสถียรตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอย่างแร่สังกะสี**. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

American Public Health Association (APHA). 1989. **Standard Method for the Examination of**
Water and Wastewater. 17th ed, APHA, Washinton DC 1527P.

American Society for Testing and Meterials. 1986a. **Standard Method of Testing of**
Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar C109-86. ASTM Publication,
Philadephia.

American Society for Testing and Materials, ASTM C187-98. 2001. **Standard Test Method**
for Normal Consistency of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards,
hiladelphia Vol. 04.01: 177-180.

American Society for Testing and Materials, ASTM C109/C109M-99. 2001. **Standard Test**
Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50
mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Vol. 04.01:
83-88.

American public Health. Association (APHA). 1992. **Standard Method for the Examination**
of water and Wastewater. 20th Edition APHA Washington DC.

- Eckenfelder, W.W. 1980. **Principle of Water Quality Management**. CBI Publishing Company Inc., United State of America.
- Harris, R., D.B. White and R.B. Mafariane. 1970. **Mercury Compounds Reduce photosynthesis byplankton**. Publisher.
- LaGrega, M.D.P.L. Buckingham and J.C. Evans. 1994. **Hazardous Waste Management**. McGraw Hill Inc, Singapore.
- Lanouette, K.H. 1977. Heavy Metals Removals. **Chem Eng.** 84 (21): 73-80.
- Mahaman, S.E. 1990. **Hazardous Waste Chemistry, Toxicology and Treatment**. Lewis Publisher, line, Michigan.
- Murdock, L.J., K.M. Brook and J.D. Dervar. 1991. **Concrete Material and Practice**. 6th ed. Edward Arnold, Great Britain.
- Sollars, C.J. and R. Perry. 1989. Cement – based Stabilization of wastes: Practical and theoretical considerations. **Journal of the Institution of Water and Environment Management** 9:125 – 131
- Sujiwatthana, P. 1987. **Affecting Solidification of Hazardous Waste Material**. M.S. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- United State Environmental Protection Agency. 1992. **Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)**. SW-846, Appendix II- Method 1311
- _____. 1999. Identification and Listing of Hazardous Waste Toxicity Characteristic, 40 CFR 261.24, **Federal Register**. (18) 261: 55-56

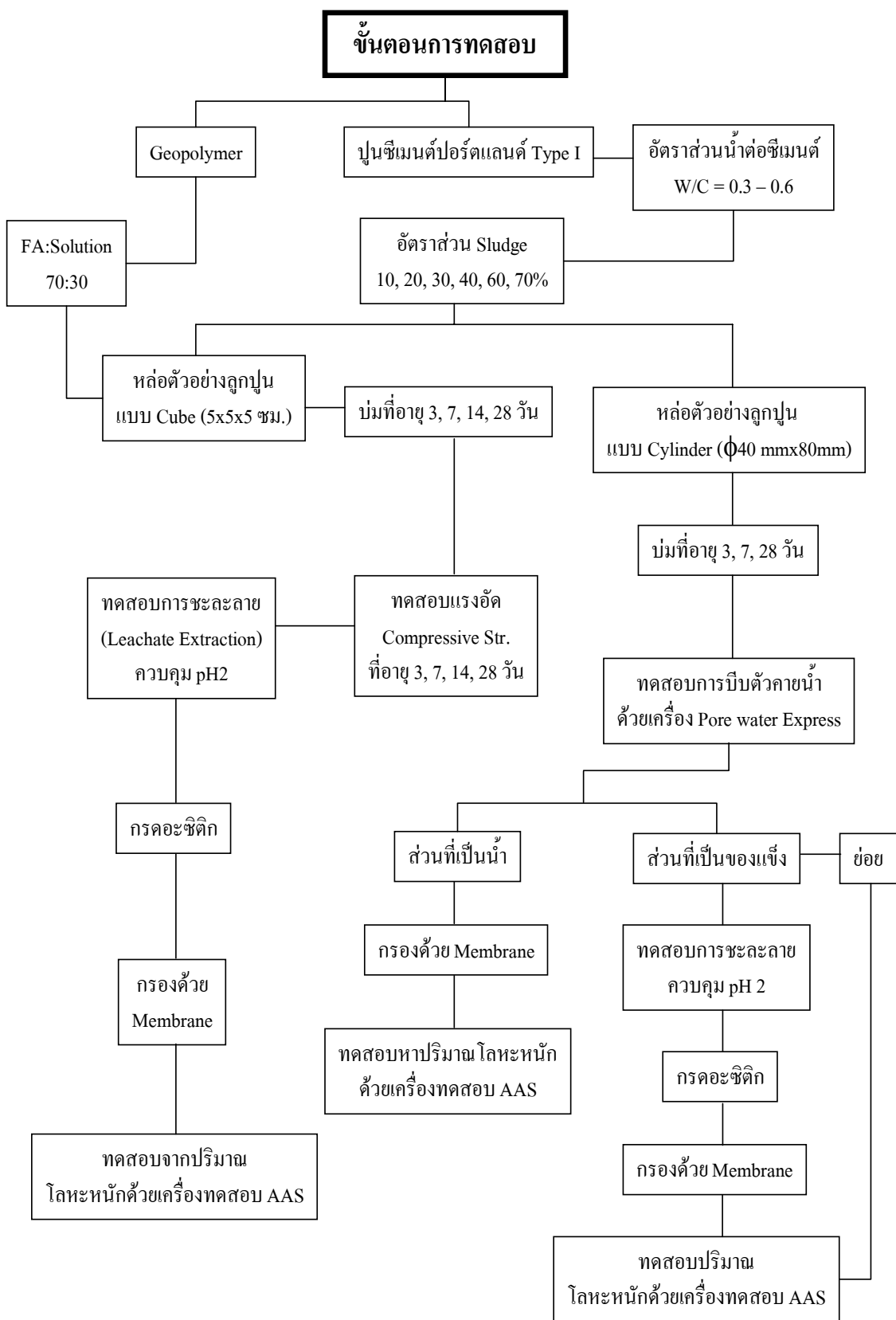
Weir, P.A. and C.H. Hine. 1970. Effect of various methods on behavior of conditioned quiddisk
Arek. **Environment Health**. 20: 45-51.

Wood, W.G. 1982. **Metal Hazardous Vol 5: Surface Cleaning Finishing and Coating**. 9th ed
American Society for Metal, United State of America.

Yang, G.C.C. and K.L. Kao. 1994. **Feasibility of using a mixture of an electroplating Sludge
and a Calcium Carbonate Sludge Solidification**. Hazardous Material 36.

Youn, J.H. 1990. **Solidification of Laboratory Waste by Using Ordinary Portland Cement
and Line rice husk ash Cement**. M.S. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.

ภาคผนวก



ภาพผนวกที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบ

วิธีการ

ศึกษาคุณสมบัติของกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษม และถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

1. ศึกษาคุณสมบัติของกากตะกอน

ตามมาตรฐานการทดสอบของ Standard method for the Examination of Water and Wastewater 20th ed.

1.1 ปริมาณความชื้น

วิธีวิเคราะห์

1) เริ่มจากนำกระป๋อง (Can) มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า ความละเอียด 0.01 กรัม แล้วนำกากตะกอนมาใส่กระป๋อง (Can) ประมาณ 100 – 200 กรัม นำไปชั่งน้ำหนักบันทึกข้อมูลไว้

2) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) นำออกจากเตาอบ ทิ้งไว้ให้เย็นสักครู่ แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกข้อมูลไว้

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น \%} = \frac{(\text{น้ำหนักตะกอนเปียก} + \text{กระป๋อง}) - (\text{น้ำหนักตะกอนแห้ง} + \text{กระป๋อง})}{\text{น้ำหนักตะกอนแห้ง}} \times 100$$

1.2 หาค่า pH ของกากตะกอน โดยใช้เครื่องวัด pH meter

1.3 หาปริมาณของแข็งทั้งหมด

วิธีวิเคราะห์

1) การเตรียมจานระเหย จานที่จะใช้ต้องอบให้แห้งก่อนในเตาอบ (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักภาชนะเปล่า (Tare, Weight) = A

2) ใช้ปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่เหมาะสม โดยปกติใช้ 50 หรือ 100 มล. ควรได้สารเหลือ หลังการระเหยน้ำประมาณ 25-250 มก. ถ้าไม่ถึงให้เพิ่มปริมาณน้ำตัวอย่าง

3) ค่อย ๆ รินน้ำตัวอย่างลงในถ้วยระเหย แล้วนำไปตั้งบนเครื่องอังไอน้ำ เมื่อไอน้ำระเหยออกหมด นำจานระเหยไปอบต่อในตู้อบ ที่อุณหภูมิ $103^{\circ} - 105^{\circ}\text{C}$ จนน้ำหนักของของแข็งที่เหลือในจานคงที่

4) นำจานระเหยที่ออกจากเตาอบไปเก็บในเดสิคเคเตอร์ เมื่อจานระเหยเย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง ให้นำไปชั่งหาน้ำหนักละเอียด โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

5) ใส่จานระเหยกลับไปในเตาอบอีก และทำซ้ำข้อ 4 จนกระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนไปไม่เกิน 4% ของน้ำหนักเดิม หรือ 0.5 มก. (อย่างใดอย่างหนึ่งที่มีค่าน้อยกว่า) น้ำหนักที่ได้คือ น้ำหนักของภาชนะรวมกับน้ำหนักของแข็ง = B

การคำนวณ

ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มก./ลิตร) = $(B-A) \times 1000/\text{มล.}$ ของน้ำตัวอย่าง

1.4 ปริมาณของแข็งคงตัว (Fixed Solids) ส่วนใหญ่เป็นพวกสารอนินทรีย์

วิธีวิเคราะห์

1) นำตัวอย่างที่เหลือจากการทดลองปริมาณของแข็งทั้งหมดที่อยู่ในจานระเหย ไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 550°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15 – 20 นาที)

2) ปล่อยให้เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้องในเคสิกเกตเตอร์ แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักสารที่เหลืออยู่ในจานระเหย ซึ่งเป็นน้ำหนักของของแข็งคงตัว

การคำนวณ

ปริมาณของแข็งคงตัว = น้ำหนักของแข็งคงตัว (มก.) x 1000/มล. ของน้ำตัวอย่าง

1.5 ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids) คือ ปริมาณของแข็งที่สลายตัวที่อุณหภูมิ 550°C

การคำนวณ

ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด = ปริมาณของแข็งทั้งหมด - ปริมาณของแข็งคงตัว

1.6 การทดสอบการชะละลาย (Leachate test)

US. EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) โดยการใช้สารละลาย ชะละลายเป็นเวลา 18±2 ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) นำตัวอย่างที่ทดสอบมาทดสอบค่าความเป็นกรดด่าง (pH) โดยใช้ตัวอย่างขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ปริมาณ 5 กรัม ใส่ในปิกเกอร์เติมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตรกวนด้วยแมกนีติกบาร์เป็นเวลา 5 นาที นำไปวัดค่า pH ถ้าน้ำกลั่นที่แช่ตัวอย่างมีค่า pH น้อยกว่า 5 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 1 ถ้าค่า pH มากกว่า 5 ให้เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล 3.50 มิลลิลิตรปิดด้วยกระจกนาฟิกานำไปให้ความร้อนที่ 50°C เป็นเวลา 10 นาที รอให้เย็นแล้วนำไปวัดค่า pH ถ้ามีค่าน้อยกว่า 5 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 1 ถ้า pH มากกว่า 5 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 2

2) การเตรียมสารละลาย

สารละลายชนิดที่ 1 เตรียมโดยการเติมกรดอะซิติค 5.7 มิลลิลิตรและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มัล เท่ากับ 64.3 มิลลิลิตรลงใน Volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ค่า pH ของสารละลายที่ได้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 4.93 ± 0.05

สารละลายชนิดที่ 2 เตรียมโดยการเติมกรดอะซิติค 5.7 มิลลิลิตรลงใน Volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ค่า pH ของสารละลายที่ได้ควรมีค่าอยู่ในช่วง 2.88 ± 0.05

3) นำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว หรือ 9.5 มม. มาแช่ในสารละลายในอัตราส่วน 1:20 ปิดฝาภาชนะที่ใส่ตัวอย่างนำไปแช่ในเครื่องเขย่าที่อัตรา 30 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง

4) นำตัวอย่างที่แช่ด้วยสารละลายแล้วมากรองผ่าน Membrane ขนาด $0.45 \mu\text{m}$ แล้วปรับค่า pH ให้ต่ำกว่า 2 โดยการเติมกรดไนตริกเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียสแล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณ โลหะหนักในน้ำด้วยเครื่อง AAS

2. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนโลหะหนักและเถ้าลอย

2.1 หางค์ประกอบออกไซด์ของกากตะกอนและเถ้าลอย

2.2 หาปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนและเถ้าลอย โดยวิธีการย่อย (Digest) โดยทดสอบตาม method 303 ของ Standard Method for the examination of water and wastewater 20th ed.

การย่อย (Digest) มีวิธีการดังนี้

1) บดก้อนตัวอย่างซีเมนต์ผสมกับกากตะกอนตามอัตราส่วนให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร ประมาณ 2 กรัมใส่ในปิเปกเกอร์ชนิดทนไฟ

2) ใส่กรดไนตริก (HNO_3) และน้ำกลั่น 10 ml ต้มให้เดือด 15 นาทีทิ้งให้เย็นแล้วเติมกรดไนตริกอีก 5 ml ต้มเดือด ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นเติมน้ำกลั่น 2 ml และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 3 ml ต้มจนไอสีแดงน้ำตาลหายไป แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5 ml เติมน้ำกลั่น 10 ml ต้ม 15 นาที ทิ้งให้เย็น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 100 ml

3) นำไปกรองผ่าน Membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ หาค่าปริมาณสังกะสีและโครเมียม โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ตามวิธีของ Standard Method for the examination of water and wastewater 20th ed.

การวิเคราะห์ปริมาณสังกะสี (Zn)

- 1) เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการย่อย
- 2) ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าเครื่อง Flame Atomic Absorption
- 3) วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Zn ที่ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร โดยใช้ Air + ก๊าซ C_2H_2
- 4) คำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Zn ในตัวอย่างจากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (Cr)

- 1) เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการย่อย
- 2) ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าเครื่อง Flame Atomic Absorption

3) วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Cr ที่ความยาวคลื่น 357.9 นาโนเมตร โดยใช้ Air + ก๊าซ C_2H_2

4) คำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Cr ในตัวอย่างจากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration curve)

3. ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของก้อนตัวอย่างผสมกากตะกอนและการชะละลาย

3.1 การเตรียมตัวอย่าง สำหรับปูนซีเมนต์

ก. นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I ผสมกับกากตะกอน ในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40, 60 และ 70% โดยควบคุมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) จากการทดสอบ Normal consistency ที่ระยะจมของเข็มเท่ากับ 10 มม.

ข. นำส่วนผสมของซีเมนต์กับกากตะกอน (Cement test) ใส่ในแบบหล่อลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 ซม.

ค. หลังจากหล่อได้ 24 ชม. นำไปบ่มที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน เพื่อหาค่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่าง

3.1.1 การหาปริมาณน้ำที่จุดความชื้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency)

การควบคุมปริมาณความชื้นเหลวของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมกับกากตะกอน ASTM C187-98, 2001 ในสัดส่วน 0, 10, 20, 30, 40, 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำได้โดยการผสมปูนซีเมนต์กับกากตะกอน โดยใช้น้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม ในเครื่องผสม ตามมาตรฐานการผสมซีเมนต์เพส แล้วนำมาใส่แบบ รูปทรงกรวยปาดหน้าให้เรียบแล้วนำมาตรวจสอบความชื้นเหลว โดยใช้เครื่องทดสอบ Vicat ใช้แท่งเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. วางบนผิวหน้าตัวอย่างที่ผสมแล้ว หลังจากนั้นปล่อยให้จมลงเป็นเวลา 30 วินาที อ่านระยะการจมจากขีดวัดระยะจุดความชื้นเหลวมาตรฐาน คือ จุดที่มีระยะการจมเท่ากับ 10 มม.

3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับจีโอโพลิเมอร์

หาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารละลายต่างโซเดียมซิลิเกตผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอย

ในการทดลองนี้เป็นการเตรียมจีโอโพลิเมอร์โดยใช้วัสดุหลักเป็นถ้ำลอยผสมกับสารละลายต่าง (Alkaline activation) ที่สัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5:1 และใช้อัตราส่วนระหว่างถ้ำลอยต่อสารละลายต่าง (FA:Solution) เท่ากับ 70:30 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นแล้วสามารถก่อตัวเป็นรูปร่างได้และรับกำลังอัดพอประมาณ การทดลองนี้ไม่ได้เลือกใช้อัตราส่วนที่ดีที่สุด เนื่องจากต้องการกำลังอัดที่มากกว่า 14 กก./ซม² ตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายของสารเคมี การใช้จีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนมีวิธีการดังนี้

3.2.1 เตรียมสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 M (Na_2O_3 , SiO/NaOH) เท่ากับ 1.5:1 โดยน้ำหนัก ผสมทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง

3.2.2 วิธีการผสมจีโอโพลิเมอร์กับกากตะกอน โดยการนำส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ผสมกับกากตะกอน มาทำการผสมในเครื่อง Hobart mixer ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) เติมสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมแล้วกับถ้ำลอยลงในเครื่องผสม

2) ใช้ใบพายของเครื่องกวนผสมถ้ำลอยและสารละลายอย่างช้าๆ ให้ผสมทั่วกัน 30 วินาที (เป็น Geopolymer)

3) เปิดเครื่องกวนผสม ใส่กากตะกอนตามอัตราส่วน ทำการกวนเร็ว 1 นาที และกวนช้า 2 นาที

4) เทจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมกากตะกอนลงในแบบ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ถอดแบบออก

5) หุ้มก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันความชื้นระเหย และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อกำล้างอัดของก้อนตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน

การหาอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลาย และอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์กับกากตะกอนโลหะหนักสามารถแสดงได้ในตารางผนวกที่ 1

ตารางผนวกที่ 1 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลาย และอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์ (เถ้าลอยต่อสารละลาย) กับกากตะกอนโลหะหนัก

FA:Solution (Geo)		Solution		จีโอโพลิเมอร์กับกากตะกอน		
(70:30)		Na ₂ O ₃ SiO : NaOH (1.5:1)				
FA	solution	Na ₂ O ₃ SiO	NaOH	Geo:S	จีโอโพลิเมอร์	กากตะกอน
(g)	(g)	(g)	(g)		(g)	(g)
2100	900	540	360	10:0	3000	0
1890	810	486	324	9:1	2700	300
1680	720	432	288	8:2	2400	600
1470	630	378	252	7:3	2100	900
1260	540	324	216	6:4	1800	1200

FA : เถ้าลอย (fly ash)

Geo : Geopolymer

S : กากตะกอน (sludge)

3.3 ทดสอบกำลังอัด

3.3.1 นำก้อนตัวอย่างของซีเมนต์กับกากตะกอน และ Geopolymer ผสมกับกากตะกอน ที่ส่วนผสม 0, 10, 20, 30, 40, 60 และ 70% หลังจากบ่มได้อายุแล้วนำมาวัดขนาดกว้าง ยาวและสูง

3.3.2 ชั่งน้ำหนักให้ได้ละเอียด 0.01 กรัม

3.3.3 นำไปทดสอบกำลังอัด โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัด (Versa Tester)

3.3.4 บันทึกผลการทดสอบตามอัตราส่วนผสมและอายุของก้อนตัวอย่าง

การคำนวณกำลังอัด

กำลังอัด (กก./ตร.ซม.) = แรงกดสูงสุด (กก.) / พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)

3.4 ทดสอบการชะละลาย (Leachate Test) มาตรฐานวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP (US EPA, 1992)

3.4.1 นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดแล้วมาบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้วหรือ 9.5 มม.

3.4.2 หลังจากร่อนผ่านตะแกรงนำไปแช่ในกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนตัวอย่างกับสารละลายเท่ากับ 1:20 โดยน้ำหนัก

3.4.3 นำตัวอย่างกับสารละลายในปีกเกอร์ไปเขย่าบนเครื่องเขย่าแบบหมุนที่มีอัตราการหมุน 30 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 18±2 ชั่วโมง

3.4.4 กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่น Membrane ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน ปรับสารละลายให้ pH ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริก เก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4°C

3.4.5 นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณสังกะสี และโครเมียม ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4. ศึกษากลไกการเก็บกักสังกะสีและโครเมียม

4.1 วิเคราะห์ปริมาณสังกะสีและโครเมียมในช่องว่าง (pore water)

4.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

1) นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I ผสมกับกากตะกอนในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40, 60 และ 70% โดยควบคุมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) จากการทดสอบ Normal consistency ที่ระยะจมของเข็มเท่ากับ 10 มม.

2) นำส่วนผสมของซีเมนต์กับกากตะกอน (Cement west) ใส่ในแบบหล่อท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. สูง 80 มม.

3) หลังจากหล่อได้ 24 ชม. นำไปบ่มที่อายุ 3, 7, 28 วัน แล้วนำมาบิบบ้อนตัวอย่าง ด้วยแท่นบิบบตัวคายน้ำ (Pore Water Expresser)

4) นำของเหลวหรือน้ำที่ได้จากการบิบบ้อนตัวอย่าง ไปทดสอบหาปริมาณสังกะสีและโครเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ตามวิธีของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th ed.

4.2 ทดสอบการชะละลาย (Leachate Test) โดยวิธี ตามมาตรฐาน Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP (US EPA, 1992) แล้วนำไปหาปริมาณสังกะสีและโครเมียมด้วย เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4.3 ทดสอบหาปริมาณสังกะสีและโครเมียมในเนื้อซีเมนต์เวสต์ด้วยการย่อย (Digest) ตามวิธีของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th ed. แล้วนำสารละลายที่ได้ไปหาปริมาณสังกะสีและโครเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)



ภาพผนวกที่ 2 ตัวอย่างซีเมนต์พิเศษผสมกากตะกอนโลหะหนัก
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มม. X 80 มม.



ภาพผนวกที่ 3 แท่นบีบตัวคายน้ำ (Pore water Expresser)



ภาพผนวกที่ 4 การวางตัวอย่างทดสอบบนแท่นบีบตัวคายน้ำ (Pore water Expresser)



ภาพผนวกที่ 5 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal testing machine)



ภาพผนวกที่ 6 ภาพถ่ายแสดงการอัดตัวอย่างซีเมนต์เวสต์



ภาพผนวกที่ 7 ภาพถ่ายแสดงน้ำที่ไหลจากการอัดตัวอย่างซีเมนต์เวสต์

การทดสอบการชะละลาย (Leachate)

ของเสียอันตราย เช่น โลหะหนัก เมื่อเก็บกักโดยทำให้แข็งตัวเป็นก้อน เช่น เก็บกักในปูนซีเมนต์แล้วนำไปฝังในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) อาจเกิดการปนเปื้อนจากการเก็บกักได้ เช่น ละลายปนกับน้ำ หรือแพร่กระจายออกไปทำให้โลหะหนักเหล่านี้ปนเปื้อนลงสู่หน้าดินในธรรมชาติได้ ดังนั้นการทดสอบการชะละลาย (Leachate) เป็นการทดสอบโดยจำลองสภาวะในธรรมชาติเมื่อของเสียในหลุมฝังกลบเปลี่ยนจากสภาวะปกติในธรรมชาติเมื่อของเสียในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) เปลี่ยนจากสภาวะปกติมาเป็นสภาวะความเป็นกรด การทดสอบสามารถทำได้โดยใช้สารละลายอะซิติก ไปชะละลายของเสียที่ถูกเก็บกักในสภาพของแข็ง สารละลายที่เป็นของเหลวจะนำเอาของเสียปนเปื้อนออกมา เรียกว่าการสกัดหรือการชะละลาย (Lagreggea et al., 2001)

US. EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการทดสอบการชะละลายของเสียที่ถูกเก็บกักอยู่ในหลุมฝังกลบ การทดสอบเพื่อหาสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่ถูกการชะละลายออกมาจะอยู่ในสภาวะของเหลว ของแข็ง หรืออื่นๆ การทดลองโดยใช้วิธี TCLP จะทดสอบโดยการใส่สารละลายชะละลายเป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. นำตัวอย่างที่ทดสอบมาทดสอบค่าความเป็นกรดด่าง (pH) โดยใช้ตัวอย่างขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ปริมาณ 5 กรัม ใส่ในปิเกตอร์เติมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร กวนด้วยแมกนีติกบาร์เป็นเวลา 5 นาที นำไปวัดค่า pH ถ้าน้ำกลั่นที่แช่ตัวอย่างมีค่า pH น้อยกว่า 5 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 1 ถ้าค่า pH มากกว่า 5 ให้เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล 3.50 มิลลิลิตรปิดด้วยกระจกนาฟีกานำไปให้ความร้อนที่ 50°C เป็นเวลา 10 นาที รอให้เย็นแล้วนำไปวัดค่า pH ถ้ามีค่าน้อยกว่า 5 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 1 ถ้า pH มากกว่า 5 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 2

2. การเตรียมสารละลาย

สารละลายชนิดที่ 1 เตรียมโดยการเติมกรดอะซิติก 5.7 มิลลิลิตรและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มัล เท่ากับ 64.3 มิลลิลิตรลงใน Volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ค่า pH ของสารละลายที่ได้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 4.93 ± 0.05

สารละลายชนิดที่ 2 เตรียมโดยการเติมกรดอะซิติก 5.7 มิลลิลิตรลงใน Volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ค่า pH ของสารละลายที่ได้ควรมีค่าอยู่ในช่วง 2.88 ± 0.05

3. นำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว หรือ 9.5 มม. มาแช่ในสารละลาย ในอัตราส่วน 1: 20 ปิดฝาภาชนะที่ใส่ตัวอย่างนำไปแช่ในเครื่องเขย่าที่อัตรา 30 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง

4. นำตัวอย่างที่แช่ด้วยสารละลายแล้วมากรองผ่าน Membrane ขนาด $0.45 \mu\text{m}$ แล้วปรับค่า pH ให้ต่ำกว่า 2 โดยการเติมกรดไนตริก เก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำด้วยเครื่อง AAS.

ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงหลังการชะละลายของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ และจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์ หลังการชะละลาย (Leachate) จากการคุมค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 2.88 เมื่อทำการทดสอบกับตัวอย่างเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ค่า pH จะเปลี่ยนแปลง สามารถแสดงได้ตาม ตารางผนวกที่ 2

ตารางผนวกที่ 2 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) หลังแช่กรดของซีเมนต์เวสต์ ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.

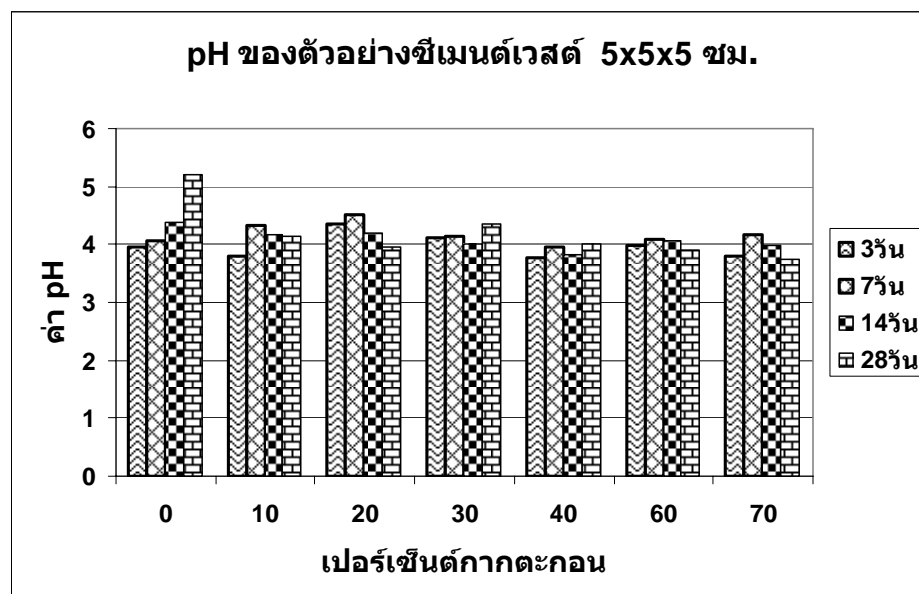
ปริมาณกากตะกอน (%)	C:S	pH เริ่มต้น (pH)	ค่า pH หลังแช่กรดที่อายุ (วัน)			
			3	7	14	28
0	10:0	2.88	3.95	4.06	4.38	5.20
10	9:1	2.88	3.80	4.32	4.18	4.15
20	8:2	2.88	4.36	4.51	4.20	3.96
30	7:3	2.88	4.11	4.14	4.00	4.35
40	6:4	2.88	3.78	3.95	3.81	4.00
60	4:6	2.88	3.98	4.10	4.07	3.90
70	3:7	2.88	3.80	4.18	3.98	3.74

ตารางผนวกที่ 3 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) หลังแช่กรดของซีเมนต์เวสต์ ขนาด ϕ 40 x 80 มม.

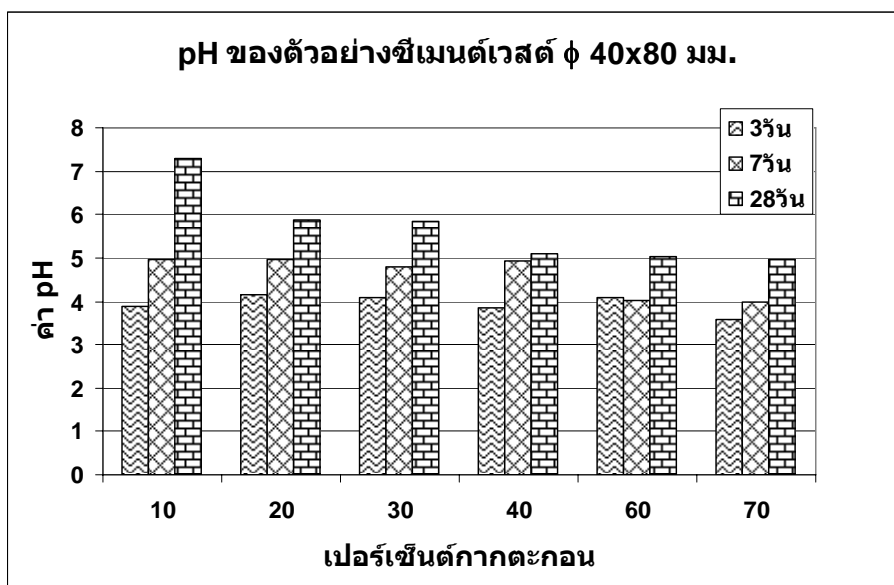
ปริมาณกากตะกอน (%)	C:S	pH เริ่มต้น (pH)	ค่า pH หลังแช่กรดที่อายุ (วัน)		
			3	7	28
10	9:1	2.88	3.89	4.97	7.30
20	8:2	2.88	4.16	4.96	5.88
30	7:3	2.88	4.09	4.80	5.83
40	6:4	2.88	3.86	4.93	5.10
60	4:6	2.88	4.08	4.02	5.02
70	3:7	2.88	3.58	3.97	4.97

ตารางผนวกที่ 4 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของ Geopolymer หลังแช่กรด ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.

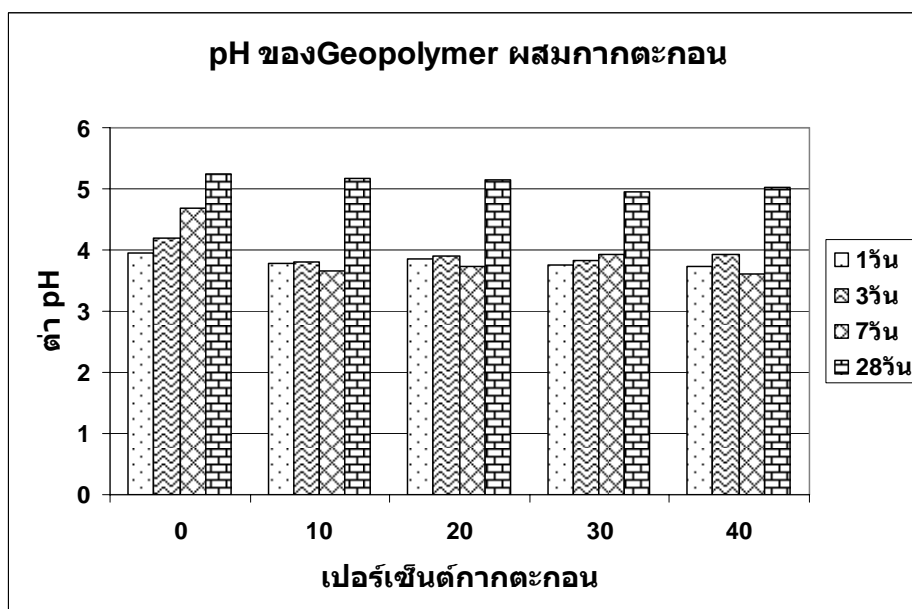
ปริมาณกากตะกอน (%)	C:S	pH เริ่มต้น (pH)	ค่า pH หลังแช่กรดตามอายุ (วัน)			
			3	7	14	28
0	10:0	2.88	3.95	4.06	4.38	5.20
10	9:1	2.88	3.79	3.80	3.67	5.17
20	8:2	2.88	3.86	3.90	3.73	5.15
30	7:3	2.88	3.75	3.83	3.92	4.96
40	6:4	2.88	3.73	3.92	3.61	5.03
60	4:6	2.88	3.67	3.88	3.78	4.83



ภาพผนวกที่ 8 กราฟแสดงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์
ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (หลังแช่กรดอะซิติก)



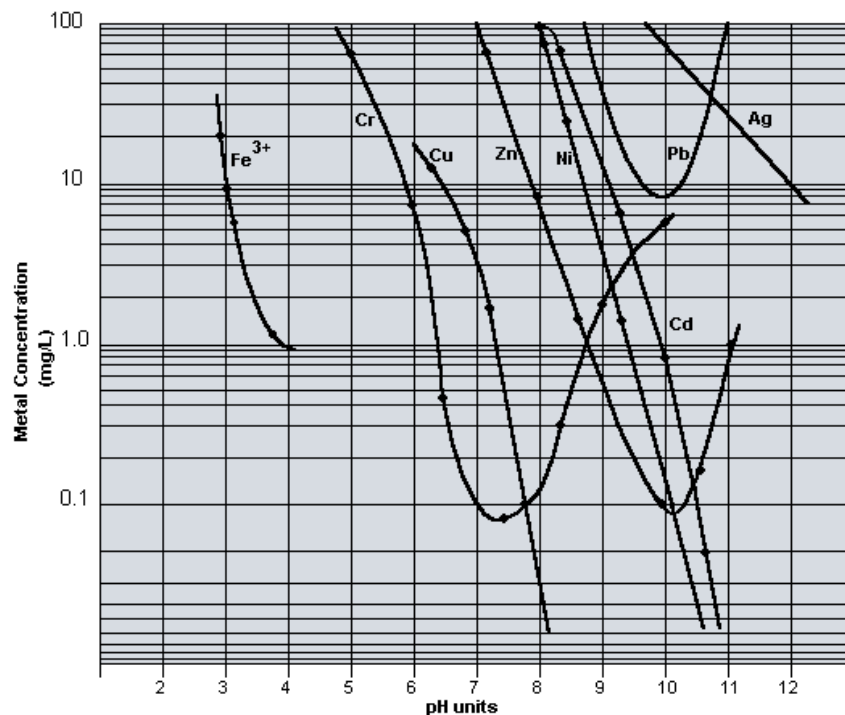
ภาพผนวกที่ 9 กราฟแสดงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์
ขนาด ϕ 40 x 80 มม. (หลังแช่กรดอะซิติก)



ภาพผนวกที่ 10 กราฟแสดงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่าง Geopolymer ผสมกาก
ตะกอน ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. (หลังแช่กรดอะซิติก)

จากตารางผนวกที่ ก2 ถึงตารางผนวกที่ ก4 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์และจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) พบว่าตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมภาคตะกอนในอัตราส่วน 0,10,20,30,40,60 และ 70 เปอร์เซ็นต์หลังการชะละลาย ครบ 18 ชั่วโมง ค่า pH ของตัวอย่างทุกอัตราส่วนจะสูงขึ้น โดยตัวอย่างที่ทดสอบเมื่ออายุ 28 วัน ค่า pH จะเปลี่ยนสภาพจากกรดแก่มาอยู่ในสภาวะกรดอ่อนเหมือนในสภาวะของหลุมฝังกลบ (Secured Landfill) อย่างไรก็ตามค่า pH ของสารชะละลายยังคงอยู่ในช่วงเดียวกัน

จากการที่ได้ทำการศึกษา โลหะหนักจะตกตะกอนได้ที่ค่า pH ต่างๆ กัน ดังภาพผนวกที่ ก11 เมื่อในน้ำเสียที่มีโลหะหนักมากกว่า 1 ชนิด ค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนของโลหะเพียงบางชนิด



ภาพผนวกที่ 11 ความสามารถในการละลายของโลหะที่ pH ต่างๆ

ที่มา: <http://www.hoffland.net/src/tks/3.xml>

ผลของ pH จากการทดลองพบว่า ค่า pH ของตัวอย่างซีเมนต์เวสต์และจีโอ โพลีเมอร์ผสม กากตะกอน เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนมีผลทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอายุของก้อนตัวอย่าง และจะอยู่ในสภาพเป็นกรดอ่อนใกล้เคียงกัน ($\text{pH} = 5$) เมื่อก้อนตัวอย่างอายุ 28 วัน