



วิทยานิพนธ์

การเก็บกักโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์

HEAVY METAL CONTAINMENT IN GEOPOLYMER

นางสาวบุษราภรณ์ ทรัพย์ห่วย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา

เรื่อง การเก็บกักโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์

Heavy Metal Containment in Geopolymer

نامผู้วิจัย นางสาวบุษราภรณ์ ทรัพย์ห่วย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.Appl.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเก็บกักโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์

Heavy Metal Containment in Geopolymer

โดย

นางสาวบุษราภรณ์ ทรัพย์ห่วย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2550

บุษราภรณ์ ทรัพย์ห้วง 2550: การเก็บกักโลหะหนักในจีโอโพลีเมอร์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์

ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.Appl.Sc. 108 หน้า

จีโอโพลีเมอร์เตรียมได้จากปฏิกิริยา polymerization ของซิลิกาและอลูมินาภายใต้สภาวะการกระตุ้นด้วยสารละลายต่างสูง เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นจีโอโพลีเมอร์อาจมีความสามารถในการเก็บกักโลหะหนักจากของเสียต่างๆ ไว้ได้ งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้จีโอโพลีเมอร์เพื่อเก็บกักโลหะหนัก โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุหลักในการทำจีโอโพลีเมอร์เพื่อเก็บกักโลหะหนักจากตะกอนน้ำเสียโรงชุบสังกะสี ที่สัดส่วน เถ้าลอย:ตะกอนโลหะหนักเท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และใช้ alkaline activator เป็นสารละลายผสม $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 / \text{NaOH}$ ที่สัดส่วน 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 ทดสอบความแข็งแรงในรูปกำลังรับแรงอัดและหาปริมาณโลหะหนักแคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม ที่ถูกชะละลายจากจีโอโพลีเมอร์ โดยใช้กรดอะซิติกและกรดไนตริกเป็นสารชะละลาย จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยล้วนมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดอยู่ในช่วง 446-487 กก./ตร.ซม. ตะกอนโลหะหนักมีผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยและตะกอนโลหะหนักมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 29 - 235 กก./ตร.ซม. สัดส่วนสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูง และสามารถเก็บกักโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ 1.0

จากการทดสอบการชะละลายด้วยกรดอะซิติก โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure พบว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมตะกอนโลหะหนักในทุกๆ สัดส่วนสามารถเก็บกักโลหะหนักแคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม ไว้ได้ โดยให้ค่าการชะละลายต่ำกว่าค่ามาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม ความแรงของกรดมีผลต่อการชะละลายตะกั่ว และโครเมียม โดยกรดไนตริกที่มีความแรงมากกว่าสามารถชะละลายตะกั่ว และโครเมียม ได้มากกว่ากรดอะซิติก ส่วนแคดเมียมให้ค่าการชะละลายโลหะหนักจากกรดทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกัน

Butsaraporn Suphuang 2007: Heavy Metal Containment in Geopolymer. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Patcharaporn Suwanvitaya, M.Apl.Sc. 108 pages.

Geopolymer is a product from polymerization of silica and alumina under alkaline activation condition. The strength of the product is comparable to Portland cement product, with the possible capability of containing heavy metal in its matrix. In this study fly ash based geopolymer was used for heavy metal containment of sludge from zinc-plated factory. The trial mixes of fly ash:sludge ratio of 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 and 1:0.5. and alkaline activator using $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ to NaOH at the ratios of 0.67, 1.00, 1.50 and 2.33 Compressive strengths of geopolymer from fly ash with sludge ($29 - 235 \text{ kg/cm}^2$) were found to be less than those of fly ash based geopolymer ($446-487 \text{ kg/cm}^2$). The ratio of $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ to NaOH that yielded maximum compressive strength was 1.00. Leaching tests with acetic acid (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) showed that Cd, Pb and Cr were securely contained in geopolymer. Concentration of Cd, Pb and Cr in leachant conformed to DOI Standard. Nitric acid was found to leach more heavy metals out than acetic acid.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรศ.ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา และรศ.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา ประธานและกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในการทดลองต่างๆ การหาแหล่งเงินทุนสนับสนุน การทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการนำบทความไปเผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12 ขอบขอบคุณศูนย์พัฒนาและวิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในการให้แหล่งเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้า และขอขอบคุณ คุณเฉลิมชัย ตระกูลสุคผ่อง จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ความอนุเคราะห์มอบภาคตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษมให้ข้าพเจ้าใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา ทุกๆ ท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าพเจ้าในการทดลองและการใช้เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ต่างๆ ในภาควิชา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ป.โทภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ป.ตรีวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และเพื่อนๆ โรงเรียนดอนเมืองจาตรจินดา ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านการเรียน การทดลอง ฯลฯ โดยเฉพาะคุณบุญฤทธิ์ ที่ช่วยทำการทดลองผสมจีโอโพลิเมอร์ คุณสยาม มล คุณวรรณนิภา คุณวิริยา และคุณวรรณัฏ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อณเรศน์ คุณแม่ดวงรัตน์ และทุกๆ คนในครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะต่างๆ ให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนข้าพเจ้าตลอดมา

บุษราภรณ์ ทรัพย์ห้วง

กันยายน 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
สรุป	64
ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก ข้อมูลระบบบำบัดน้ำเสียของโรงชุมชนเพชรเกษม	71
ภาคผนวก ข กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์	74
ภาคผนวก ค ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายจากจีโอโพลีเมอร์	100
ภาคผนวก ง การศึกษาค่าความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามวิธี Two sample T-test (Independent-Samples) ด้วยโปรแกรม SPSS	105
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	104

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยลิกไนต์และปริมาณโลหะหนักในน้ำที่แช่ถ้ำลอยลิกไนต์	11
2	มาตรฐานความเข้มข้นของ Cd, Pb และ Cr ในน้ำสกัด (Extract Solution) สำหรับของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว	22
3	ค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับจีโอโพลีเมอร์	24
4	ปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายจากของเสียจากเหมืองแร่และจีโอโพลีเมอร์	24
5	ปริมาณสารละลายและวัสดุที่ใช้ในส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ เพื่อเก็บกักกากตะกอน โลหะหนัก	33
6	pH, ปริมาณความชื้น, ปริมาณของแข็งระเหยได้ และปริมาณของแข็งที่เหลือจากการเผาที่ 550 องศาเซลเซียส ของกากตะกอนโลหะหนัก	37
7	องค์ประกอบออกไซด์ของถ้ำลอยและตะกอนโลหะหนัก	39
8	ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยและตะกอนโลหะหนักโดยวิธีการย่อยตะกอน	39
9	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายจากถ้ำลอย และตะกอนโลหะหนัก ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก	41
10	ปริมาณ Cd, Pb และ Cr จากการชะละลายเทียบกับน้ำหนักจีโอโพลีเมอร์ผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	55
11	ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนัก	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข1	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67	75
ข2	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00	76
ข3	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50	77
ข4	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.33	78
ข5	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 4.00	79
ข6	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.1 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67	80
ข7	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.2 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67	81
ข8	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.3 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67	82
ข9	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.4 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67	83
ข10	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67	84
ข11	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.1 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00	85
ข12	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.2 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

[illegible]

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข25 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.33	99
ค1 ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ (1:20) อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67 ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก	101
ค2 ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ (1:20) อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00 ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก	102
ค3 ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ (1:20) อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก	103
ค4 ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ (1:20) อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.33 ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก	104
ง1 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์ ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0	106
ง2 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์ ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.1	106
ง3 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์ ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.2	107
ง4 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์ ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.3	107
ง5 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์ ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.4	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

- ง6 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลิเมอร์
ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67,
1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5

108

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างจีโอโพลีเมอร์	6
2	โครงสร้างจีโอโพลีเมอร์แบบ poly(sialate- siloxo) และการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Al^{+} และ K^{+}	7
3	ความสามารถในการละลายของโลหะที่ pH ต่างๆ	18
4	แผนการทดลอง	30
5	การชะละลายโลหะหนักจากจีโอโพลีเมอร์	33
6	ลักษณะของตะกอนเปียกจากโรงชุบเพชรเกษม	36
7	ลักษณะของตะกอนที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 2 มิลลิเมตร และล้างตะแกรงขนาดรูเปิด 600 ไมครอน	37
8	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอยผสมกับสารละลาย $Na_2O.SiO_3/NaOH$ อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน	42
9	ผลของอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3/NaOH$ ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอย ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน	42
10	ภาพถ่ายจีโอโพลีเมอร์เมื่อก่อตัว และแกะออกจากแบบแล้ว ที่อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3/NaOH$ เท่ากับ 1.00 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5	45
11	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3/NaOH$ เท่ากับ 0.67	46
12	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3/NaOH$ เท่ากับ 1.00	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50	47
14	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.33	47
15	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33	48
16	โลหะหนักจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67	51
17	โลหะหนักจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00	52
18	โลหะหนักจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50	53
19	โลหะหนักจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.33	54
20	โลหะหนัก Cd จากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์อายุ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	โลหะหนัก Pb จากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์อายุ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 (a) กรดอะซิกติก (b) กรดไนตริก	58
22	โลหะหนัก Cr จากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์อายุ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 (a) กรดอะซิกติก (b) กรดไนตริก	59
23	ภาพถ่ายจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 ด้วยกล้อง SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า	61
24	ภาพถ่ายจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 ด้วยกล้อง SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า	62
ภาพผนวกที่		
ก1	ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของโรงชุมชนเพชรม	73

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

กก.	กิโลกรัม
กก./ตร.ซม.	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
มก./ล.	มิลลิกรัมต่อลิตร
มก./ก.	มิลลิกรัมต่อกรัม
มม.	มิลลิเมตร
FA	फैลาอย
HS	กากตะกอนโลหะหนัก
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
M	โมลาร์
Mpa	เมกกะปาสคาล
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$	โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์
rpm	รอบต่อนาที

การเก็บกักโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์

Heavy Metal Containment in Geopolymer

คำนำ

ปัจจุบันของเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ได้แก่ กากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย เถ้าที่เกิดจากเตาเผา หรือกากของเสียที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น หากกำจัดไม่ถูกวิธีโลหะหนักจะปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการสะสมในห่วงโซ่อาหารและก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ได้ ทางเลือกหนึ่งของการกำจัดกากของเสียเหล่านี้ คือใช้เป็นมวลผสมในการทำคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันมากในการก่อสร้าง โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีผลต่อการทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก โดยในปี พ.ศ. 2548 มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมซีเมนต์ถึง 298 ล้านตัน (Marland *et. al.*, 2007) ดังนั้นจึงควรพัฒนาวัสดุชนิดอื่นๆ มาทดแทน เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยใช้การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) กับสารอัลคาไลที่เป็นด่างสูง (alkali activator) และใช้ความร้อนในการกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (polymerization) กลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในโครงสร้างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุที่ใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุพอซโซลาน (pozzolanic materials) ซึ่งมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าลอย (fly ash) เถ้าแกลบ (rice husk ash) และดินขาว (metakaolin) เป็นต้น

จีโอโพลิเมอร์สามารถเก็บกักโลหะหนักได้ เนื่องจากโลหะหนักถูกจับยึดไว้ภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ และเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) ระหว่างโลหะหนักกับ จีโอโพลิเมอร์ นอกจากนี้ความเป็นด่างจะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักในของเสีย เกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีการละลายน้ำต่ำ

การนำกากตะกอนโลหะหนักมาเป็นวัสดุผสมในการทำอีโพลิเมอร์นั้น อาจทำให้ความ
คงทนแข็งแรงของอีโพลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป และสารโลหะหนักในอีโพลิเมอร์อาจเกิด
อันตรายต่อผู้ที่สัมผัสได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาลักษณะเชิงกลของอีโพลิเมอร์และ
ปริมาณโลหะหนักที่ปล่อยออกมาจากอีโพลิเมอร์ที่ใช้ถั่วลันเตาเป็นวัสดุพื้นฐาน เพื่อการนำ
อีโพลิเมอร์ไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้อย่างปลอดภัย และเป็นการนำของเสียไปใช้ประโยชน์
ทำให้ลดการกำจัดปริมาณกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย

วัตถุประสงค์

1. หาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารละลายด่างโซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์และใช้ในการเก็บกักโลหะหนัก
2. หาความสามารถของจีโอโพลิเมอร์ในการเก็บกักโลหะหนัก
3. หาผลของชนิดของกรดที่มีผลต่อปริมาณโลหะหนักจากการชะละลาย

ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุหลักในการผสมจีโอโพลิเมอร์ในงานวิจัยนี้คือเถ้าลอยจากเตาเผาของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เช่น ปริมาณซิลิกา อะลูมินา ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งคงตัว ของแข็งระเหยได้ และปริมาณโลหะหนัก
2. ตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ตะกอนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงชุมชนเกษตรกรรม ตะกอนที่ได้นำมาอบให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 2 มิลลิเมตร และค้ำตะแกรงขนาดรูเปิด 600 ไมครอน วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี เช่น ปริมาณซิลิกา อะลูมินา ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งคงตัว ของแข็งระเหยได้ และปริมาณโลหะหนัก
3. สารละลายด่าง (alkali activator) ที่ใช้เตรียมจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
4. การทดสอบการชะละลายปรับปรุงจากวิธีมาตรฐาน Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) โดยเปรียบเทียบการใช้สารชะละลายกรดอะซิติกและกรดไนตริก

การตรวจเอกสาร

1. จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) กับ alkali activator เช่น โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ความร้อนในการกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน วัสดุที่ใช้ผสมเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) สารปอซโซลานที่นิยมนำใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์กันมากได้แก่เถ้าลอย (fly ash) นอกจากนี้ยังมีดินขาว (metakaolin) เถ้าแกลบ (rice husk ash) และเถ้าตะกรัน (ground blast furnace slag)

จีโอโพลิเมอร์เป็นที่รู้จักกันมานานแล้วใน Soviet Union และประเทศในยุโรปตะวันออกพบเป็นครั้งแรกในประเทศยูเครน แต่เรียกว่า ดิน-ซีเมนต์ (soil-cement) ในปี ค.ศ. 1970 Glukhovsky ได้ตั้งสมมติฐานว่าความคงทนที่เหนือกว่าของคอนกรีตในสมัยโบราณ เป็นผลมาจากการอยู่ร่วมกันของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate: C-S-H) กับองค์ประกอบบางอย่างของอัลคาไลน์ อลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (alkaline aluminosilicate hydrates) และค้นพบว่า calcium silicate hydrate, calcium aluminosilicate hydrates และ sodium aluminosilicate hydrates เป็นสารที่ก่อให้เกิดวัสดุที่มีความแข็งแรงได้

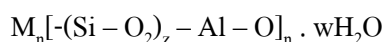
ในปี ค.ศ. 1976 Davidovits ได้ทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหล่านี้ และได้ตั้งชื่อว่า “Geopolymer” โดย Davidovits และผู้ร่วมงานได้เผยแพร่เอกสารและจดสิทธิบัตรหลายชิ้น และได้สาธิตให้เห็นประโยชน์การนำมาใช้งาน

จากการคว่ำการศึกษาในเมืองไทยพบว่าการศึกษาเรื่องจีโอโพลิเมอร์ เริ่มอย่างจริงจังประมาณปี พ.ศ. 2547 โดยในปี พ.ศ. 2548 ในการประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 1 ถนนคึกฤทธิ์ ริมน้ำเจ้าพระยา จินดาประเสริฐ (2548) ได้นำเสนอผลงานการศึกษาเบื้องต้นของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะคัดขนาด พบว่าเถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ส่วน อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2548) เสนอผลงาน เรื่อง การศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผา โดย

ผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งอุณหภูมิและช่วงเวลาในการเผาดินขาวที่เหมาะสมคือ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จีโอโพลิเมอร์ที่มีดินขาวเผาไม่เกิน 30% โดยน้ำหนักจะให้กำลังอัดที่ใช้ได้ดีในช่วง 300-500 กก./ตร.ซม. สัดส่วนของ alkali activator โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 / \text{NaOH}$) โดยน้ำหนัก ที่เหมาะสมคือ 0.67-1.0 อุณหภูมิในการบ่มในตู้อบที่ 75 °C จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดดีกว่าที่อุณหภูมิอื่น และในการประชุมวิชาการนานาชาติ International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2549 Yodmune and Yodsudjai (2006) ได้เสนองานวิจัยการเกิดสนิมเหล็กของแท่งเหล็กในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุพื้นฐาน โดยที่กำลังรับแรงอัดเท่ากัน แท่งเหล็กในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีอัตราการเกิดสนิมช้ากว่าแท่งเหล็กในคอนกรีตธรรมดา และที่กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยจะมีความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้น

1.1 กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (polymer) โดยวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง หลังจากนั้นโซเดียมซิลิเกตจะเข้าไปเป็นตัวทำให้รวมตัวกันในลักษณะของโครงสร้างแบบสามเหลี่ยม เกิดพันธะ Si-O-Al ลักษณะการเกิดโมเลกุลลูกโซ่ของจีโอโพลิเมอร์มีสูตรโมเลกุลดังนี้ (Davidovits, 1999)



โดย M = ธาตุอัลคาไล

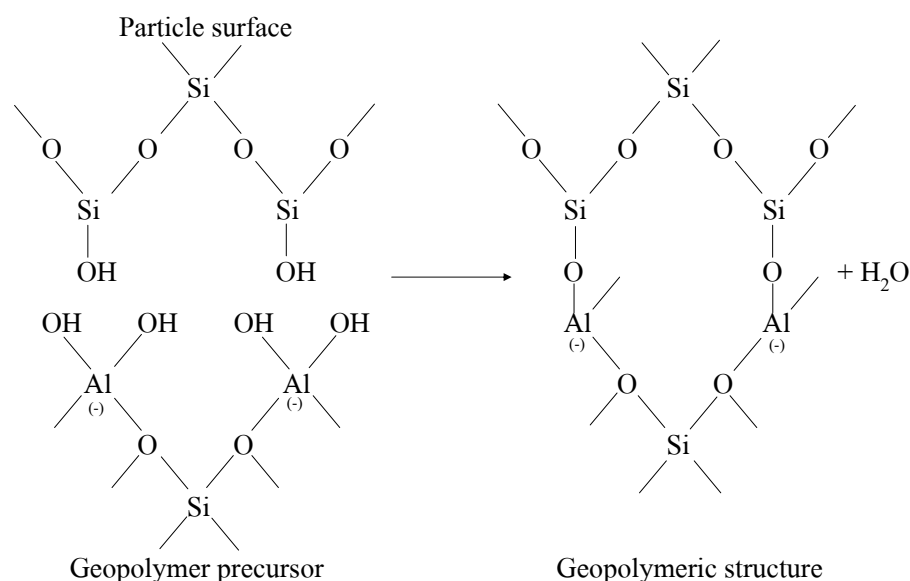
- = พันธะ (bond)

Z = จำนวนโมเลกุลของ Si - O₂ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

n = ปริมาณโมเลกุลของการทำโมเลกุลลูกโซ่ (degree of polymerization)

w = จำนวนโมเลกุลของน้ำ

Van Jaarsveld *et. al.* (1997) เสนอกลไกและโครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอลูมินา ดังภาพที่ 1

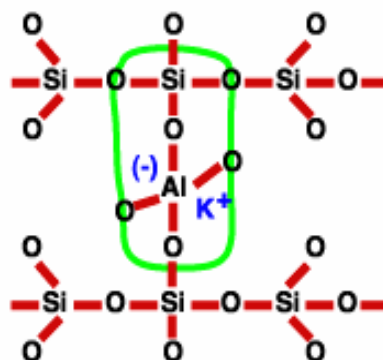
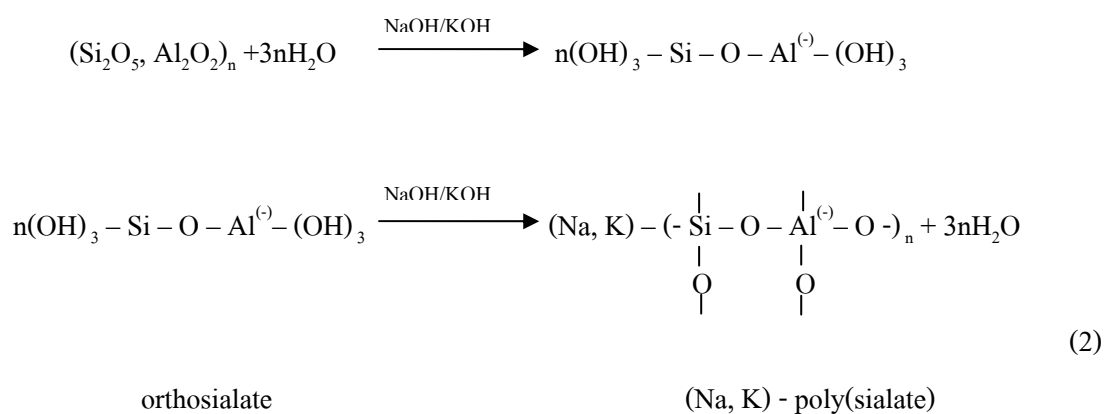
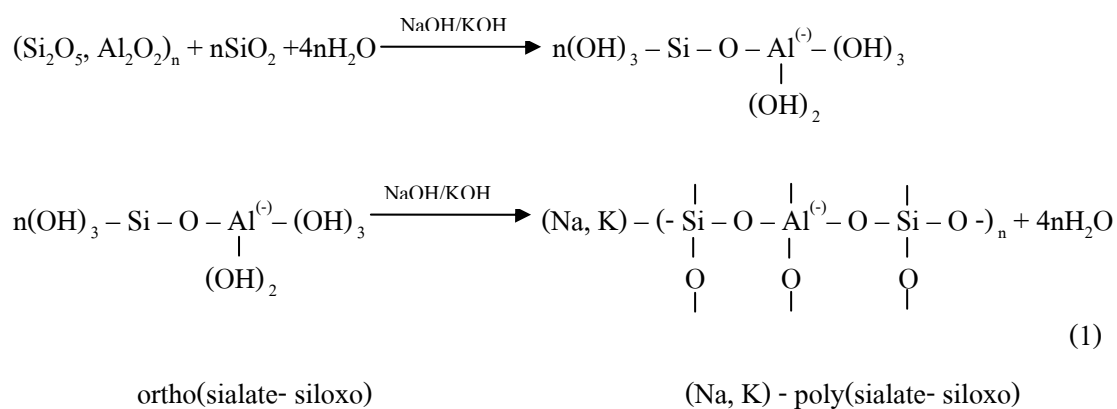


ภาพที่ 1 โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์

ที่มา: Van Jaarsveld *et. al.* (1997)

ซิลิกอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 4A เลขอะตอม 14 วาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 เกิดพันธะ co-ordinated กับออกซิเจนในลักษณะ tetrahedral โดยซิลิกา 1 อะตอมจับกับออกซิเจน 4 อะตอม ส่วนอะลูมิเนียมเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3A มีเลขอะตอม 13 วาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 สามารถเกิดพันธะไอออนิกกับออกซิเจน 3 อะตอม และเกิดพันธะ co-ordinated กับออกซิเจน 4 อะตอม การเกิดพันธะ co-ordinated ทำให้อะลูมิเนียมแสดงประจุลบ ดังนั้นไอออนของ Na⁺ หรือ K⁺ ในสารละลายต่าง ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการทำจีโอโพลิเมอร์ จะไปเกาะกับอะลูมิเนียมซึ่งมีประจุลบ ดังภาพที่ 2 ทำให้ประจุใน matrix ของจีโอโพลิเมอร์มีความสมดุล (Van Jaarsveld *et. al.*, 1997)

ถ้าซิลิกาทำปฏิกิริยากับอะลูมินาในอัตราส่วน 1:1 จะเรียกโครงสร้างเป็น poly (sialate) และซิลิกาทำปฏิกิริยากับอะลูมินาในอัตราส่วน 2:1 เรียกโครงสร้างเป็น poly(sialate- siloxo) จีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดดีจะมีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2:1 Davidovits (1994) เสนอกลไกของการเกิดโครงสร้าง poly(sialate- siloxo) และ poly (sialate) ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 ส่วนภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์แบบ poly(sialate- siloxo)



ภาพที่ 2 โครงสร้างจีโอโพลีเมอร์แบบ poly(sialate- siloxo) และการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Al และ K^+

1.2 การใช้ประโยชน์วัสดุจีโอโพลิเมอร์

จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่คล้ายกับคอนกรีตและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีความคงทนแข็งแรง สามารถขึ้นรูปและคงตัวได้เร็ว ทนต่อการกัดกร่อนของกรด และมีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำ (Van Jaarsveld *et al.*, 1997) จึงมีการนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์มาใช้ในการปิดผิวหน้าของหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยหรือใช้เป็นวัสดุรองพื้นหลุมฝังกลบ ทำพื้นทางเดิน และใช้ในการเก็บกักโลหะหนัก เช่น สารหนู ตะกั่ว และปรอท ในของเสียที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ หรือใช้ในการเก็บกักของเสียจากแร่ใยหิน ของเสียจากสารกัมมันตภาพรังสี เป็นต้น

1.3 การเก็บกักโลหะหนักในปูนซีเมนต์และวัสดุพอลิเมอร์

ของเสียอันตรายต่าง ๆ เช่น ดินที่ปนเปื้อนโลหะอันตราย ของเสียจากเหมืองแร่ และกากตะกอนโลหะหนัก มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบอยู่ จึงน่าจะสมารถนำของเสียเหล่านี้มาเป็นวัสดุผสมในการทำจีโอโพลิเมอร์ได้ การทำให้ของเสียที่เป็นอันตรายแข็งตัวเป็นก้อนนั้น จะเป็นการทำลายฤทธิ์และลดความเป็นพิษลง กลไกการเก็บกักโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะคล้ายกับกลไกของการเก็บกักโลหะหนักในซีเมนต์

Lagrega, *et. al.*, (2001) และกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2548) เสนอแนวทางในการเก็บกักโลหะหนักในซีเมนต์และวัสดุพอลิเมอร์ ดังนี้

1.3.1 เป็นการเจือจาง (Dilution) ความเป็นพิษลง เนื่องจากการเติมวัสดุประสานลงในของเสีย

1.3.2 โลหะหนักถูกจับยึดไว้ในของเหลวและถูกเก็บกักไว้ในโครงสร้างของซีเมนต์และวัสดุพอลิเมอร์

1.3.3 เกิดปฏิกิริยาการดูดซับผิว (Adsorption) ระหว่างโลหะหนักกับซีเมนต์และวัสดุพอลิเมอร์

1.3.4 ความแตกต่างในซีเมนต์และวัสดุป่อชโซลาน มีผลทำให้เกิดตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีการละลายต่ำ

1.3.5 การทำให้เป็นก้อนเป็นการลดพื้นที่ผิวของเสีย ทำให้การระลายน้อยลงเนื่องจากของเสียมมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำน้อยลง

2. วัสดุเถ้าลอย

2.1 แหล่งกำเนิดและปริมาณเถ้าลอยในประเทศไทย

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาถ่านหินเพื่อให้เกิดพลังงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) ที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 2,000 Mw ต่อวัน และใช้ถ่านหินลิกไนต์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 30,000-40,000 ตันต่อวัน ทำให้เกิดเถ้าลอยลิกไนต์ประมาณปีละ 2.4 ล้านตัน

ถ่านหินลิกไนต์จะถูกนำไปย่อย และนำเข้าสู่เตาเผาเป็นเชื้อเพลิงต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำไปหมุนใบพัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับขี้เถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์แยกตามสภาพต่างๆ ได้ 3 ส่วน คือ เถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นขี้เถ้าที่มีขนาดใหญ่ขนาดทั่วไปประมาณ 0.5- 10.0 มิลลิเมตร เถ้าตะก้น (Slag ash) เป็นขี้เถ้าที่หลอมละลายรวมตัวเกาะเป็นตะก้นที่บริเวณผนังของเตา มีปริมาณน้อยมาก และเถ้าลอย (fly ash) เป็นขี้เถ้าที่มีขนาดเล็กละเอียด ขนาดตั้งแต่ 0.001 – 1.0 มิลลิเมตร ลอยปะปนไปกับก๊าซร้อนจากปล่องควันและถูกจับโดยเครื่องดักจับฝุ่น (electrostatic precipitator) มีปริมาณร้อยละ 80 ของขี้เถ้าทั้งหมด

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น คุณสมบัติของถ่านหินลิกไนต์จากแต่ละแหล่ง ลักษณะการเผาไหม้ของถ่านหิน และประสิทธิภาพของเครื่องดักจับขี้เถ้า โดยทั่วไปเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่ 0.001 – 1.0 มิลลิเมตร แต่ที่พบในโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีขนาดอยู่

ในช่วง 0.03 – 0.42 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.23-2.48 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539)

2.3 คุณสมบัติทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอย ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , SO_3 , และ C ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของถ่านหิน ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการนำเถ้าลอยไปใช้ เพราะยากต่อการควบคุมคุณภาพ เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาถ่านหิน โดยถ่านหินที่ใช้กันในแถบยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่นเป็นพวก Bituminous) ซึ่งเป็นถ่านหินชั้นดีให้ความร้อนสูง ต่างจากถ่านหินลิกไนต์ ในประเทศไทยที่ให้ความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้แตกต่างกันไปด้วย เถ้าลอยทั่วไปมีค่าผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 66 – 92 สำหรับเถ้าลอยในประเทศไทยจากแหล่งแม่เมาะ มีปริมาณสารประกอบดังกล่าวอยู่ในช่วงร้อยละ 72-80 และมี CaO ประมาณ 12% (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2542)

2.4 ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอย

เถ้าลอยถือว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ในภาคผนวกที่ 2 พ้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยกำหนดให้เถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหิน (coal fly ash) มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย

นฤมิตร (2538) ศึกษาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยลิกไนต์ และในน้ำที่ใช้แช่เถ้าลอยลิกไนต์ พบปริมาณและความเข้มข้นโลหะหนักดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยลิกไนต์และปริมาณโลหะหนักในน้ำที่แช่เถ้าลอยลิกไนต์

โลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยลิกไนต์ (ppm)	ปริมาณโลหะหนักในน้ำ ที่แช่เถ้าลอยลิกไนต์ (ppm)
As	213	0.13
Cr	66.5	0.25
Ni	53.5	0.06
Co	33.7	0.003

ที่มา: นฤมิต (2538)

2.5 การนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน องค์ประกอบหลักในเถ้าลอยส่วนใหญ่เป็น Oxide เช่น SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO เมื่อผสมกับน้ำ CaO ส่วนที่เป็น Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 เกิดเป็นสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate และ Calcium Aluminate Hydrate ซึ่งมีคุณสมบัติยึดประสาน (Cementitious) จึงมีการนำเถ้าลอยมาใช้ผสมในงานคอนกรีตเพื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์ มนตรี (2542) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะกับอุณหภูมิที่มีต่อการพัฒนากำลังอัด และความทนทานของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 20% ให้ผลดีด้านกำลังอัดสูงสุด และเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคละเอียดจะให้กำลังอัดและความทนทานดีกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า

ดังนั้น เถ้าลอยจึงน่าจะนำมาเป็นวัสดุพื้นฐานในการผสมทำจีโอโพลิเมอร์ โดยในปี ค.ศ. 2004 Hardjito *et. al.* ใช้จีโอโพลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยเป็นวัสดุพื้นฐานมาเป็นสารเชื่อมประสานแทนซีเมนต์ในการทำคอนกรีต โดยคอนกรีตจากจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตได้มีคุณสมบัติและความแข็งแรงคล้ายกับคอนกรีตจากซีเมนต์

3. โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ สมบัติของโลหะหนักก็นำไฟฟ้า และนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ โลหะหนักมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า จึงสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ ดังนั้นเมื่อโลหะหนักเกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม โดยการปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร จะเกิดการสะสมและถ่ายทอดสู่มนุษย์ได้

โลหะหนักที่มุ่งเน้นในการศึกษาวิจัยนี้ ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม เนื่องจากกากตะกอนโลหะหนักที่นำมาใช้ในงานวิจัย เป็นกากตะกอนโลหะหนักที่ได้จากโรงชุบโลหะ น้ำเสีย และกากตะกอนจากระบบบำบัดของโรงชุบจึงมีโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้ปนเปื้อนอยู่ โลหะหนักที่ทำการศึกษามีสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

3.1 แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียมเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มของธาตุทรานสิชันหมู่ 2B มีจุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 765 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 8.65 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส มีเลขมวลอะตอม 48 น้ำหนักอะตอม 112.41 วาเลนซ์ 0,2 มีคุณสมบัติอ่อน ดัดได้ง่าย สีขาว และตีแผ่ได้ เสถียรในอากาศที่แห้ง แต่ในอากาศชื้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิว ไม่ละลายในด่าง แต่สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิด และกรดอินทรีย์บางชนิด โดยละลายในกรดไนตริกได้ดีที่สุด

ในธรรมชาติจะพบแคดเมียมในปริมาณน้อยมาก ประมาณ 0.1 ถึง 0.2 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ โดยพบอยู่ในรูปของสินแร่ greenockite (CdS) ประมาณ 77 % นอกนั้นปะปนอยู่กับสินแร่อื่น ๆ เช่น สังกะสี และตะกั่ว เป็นต้น

3.1.1 การนำไปใช้ประโยชน์

ก. ด้านเกษตรกรรม นำแคดเมียมมาใช้เป็นองค์ประกอบของสารกำจัดวัชพืชและสารกำจัดเชื้อรา รวมทั้งใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต

ข. แคดเมียมใช้ประโยชน์กันมากคือใช้เป็นตัวเคลือบผิวของโลหะอื่น ๆ เช่น เหล็กและเหล็กกล้าโดยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) เพราะทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เกาะกับผิวหน้าของวัตถุที่จะชุบได้แน่นและเรียบสม่ำเสมอ โลหะที่ชุบแคดเมียมแล้วนำไปทำน็อต ตะปู ชิ้นส่วนของแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์และเครื่องบิน

ค. แคดเมียมใช้เป็นส่วนประกอบของสีในอุตสาหกรรมทำสีทาสีบ้าน สีชุบโลหะ เพื่อป้องกันการกัดกร่อน สีย้อมในเซรามิก เป็นต้น

ง. แคดเมียมยังใช้ทำโลหะผสม (alloy) โดยนำไปผสมกับโลหะอื่น ๆ เช่น ผสมกับบิสมัท ตะกั่วและดีบุก ซึ่งโลหะผสมชนิดนี้มีสมบัติพิเศษ คือ มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะที่ใช้ จึงนำไปใช้ในระบบการดับเพลิง โลหะผสมของแคดเมียมกับนิกเกิลและทองแดง หรือเงิน นิยมนำไปทำอัลลอยด์ที่ใช้ทำฝาประคบเพลลาอีกด้วย

3.1.2 ความเป็นพิษและผลกระทบจากการปนเปื้อนของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม

ก. แคดเมียมสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมทั้งจากธรรมชาติ ได้แก่ การระเบิดของภูเขาไฟ การพังทลายหรือสึกกร่อนของเปลือกโลก จากการเกษตรโดยการใช้สารปราบศัตรูพืช แต่ส่วนใหญ่แคดเมียมมาจากการใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การทำเหมืองแร่สังกะสี และเหมืองขุดเจาะน้ำมัน ถ้าธรรมชาติ ซึ่งจะก่อให้เกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมสู่บรรยากาศ เมื่อคนและสัตว์ บริโภคพืชจะได้รับแคดเมียมเข้าไปสะสมไว้ และสามารถถ่ายทอด สะสม ได้โดยกระบวนการห่วงโซ่อาหาร

ข. Svehla (1996) กล่าวว่าสารประกอบของแคดเมียมทุกชนิดเป็นพิษ โดยที่แคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางระบบทางเดินอาหาร และระบบทางเดินหายใจ เมื่อเข้าสู่

ร่างกายแล้วจะสะสมอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย โดยเฉพาะที่ตับและไต ปริมาณการสะสมตามอายุ

ค. ความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมทำให้เกิดอาการปวดหัว ปวดท้องอย่างแรง อาเจียน ท้องเดิน หมดสติ และอาจตายได้ภายใน 24 ชั่วโมง สำหรับความเป็นพิษเรื้อรังจะก่อให้เกิดผลเสียโดยตรงกับการสร้างกระดูก โดยจะไปลดการสะสมของธาตุแคลเซียมขณะที่มีการสร้างและซ่อมแซมกระดูก โดยแคดเมียมจะเป็นตัวการทำให้เอ็นไซม์หุ้มกระดูกประสิทธิภาพ จึงทำให้กระดูกผุกร่อนเสียรูป และทำให้เจ็บปวดมาก ดังตัวอย่าง โรคิไต-อิไต (Itai-Itai) ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเกิดจากชาวญี่ปุ่นรับประทานปลาดิบที่จับจากแหล่งน้ำบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยแคดเมียมลงไป

3.2 ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่ว เป็นธาตุในหมู่ 4A มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.2 วาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 และ 4 มีไอโซโทปที่เสถียร 4 ไอโซโทป เป็น end product จากการสลายตัวของ uranium (238) thorium (232) และ actinium (227) ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ตะกั่วเป็นธาตุหนัก สีเทาอ่อน ความถ่วงจำเพาะ 11.33 จุดหลอมเหลว 327.4 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,755 องศาเซลเซียส ละลายได้ในกรดในกรดเจือจาง ไม่ละลายน้ำ ตะกั่วหลอมเหลวได้ง่าย สามารถทำให้อ่อนและดัดแปลงให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ตามต้องการ กลายเป็นไอได้ดีที่อุณหภูมิสูงๆ ตะกั่วมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ได้แก่ +1, +2 และ +4 แต่ตะกั่วส่วนมากจะอยู่ในสภาวะ +2 ซึ่งจัดว่า เสถียรที่สุด

ตะกั่วในธรรมชาติ เมื่อสลายตัวจะถูกออกซิไดส์อย่างช้าๆ ให้อยู่ในรูปคาร์บอเนตหรือถูกตรึงโดยแร่ดินเหนียว (Clay) ออกไซด์ของเหล็กและอลูมินัม และอินทรีย์วัตถุ โดยทั่วไปตะกั่วอยู่ในรูป Pb^{2+} มากกว่า Pb^{4+} และมีคุณสมบัติคล้ายกลุ่มแอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) ดังนั้นจึงสามารถเข้าแทนที่ K, Ba, Sr และแม้แต่ Ca ในแร่และในตำแหน่งที่ไอออนของธาตุเหล่านี้ถูกดูดซับ

3.2.1 การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์

ปัจจุบันตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ดังนี้

ก. ตะกั่วออกไซด์ (Lead Oxide) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสี อุตสาหกรรมผลิตหม้อแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมผลิตยาง

ข. ตะกั่วแดง (Red oxide of Lead) ใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อป้องกันสนิมหรือเคลือบรถยนต์

ค. ตะกั่วคาร์บอเนต (Lead Carbonate) ตะกั่วซัลเฟต (Lead Sulfate) และตะกั่วโครเมต (Lead Chromate) ใช้ในวงการอุตสาหกรรมผลิตสีผสมในผงฝุ่นสีขาว สีน้ำมัน หมึกพิมพ์ และสีพลาสติก เป็นต้น

ง. ตะกั่วอะซิเตต (Lead Acetate, $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) เป็นเกลือของตะกั่วที่ละลายในน้ำได้ดี ใช้ในทางอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอาง ครีมใส่ผม เป็นต้น

จ. ตะกั่วไนเตรต (Lead Nitrate, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาง และพลาสติก

ฉ. ตะกั่วอะซิเนต (Lead Acenat, $\text{PbO}.\text{As}_2\text{O}_5$) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืช

ช. ตะกั่วสเตียเรต (Lead Stearate, $\text{Pb}(\text{C}_{10}\text{H}_{19}\text{O}_2)$) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแลคเกอร์ น้ำมันหล่อลื่น และจารบี เป็นต้น

3.2.2 ความเป็นพิษและผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม

ก. ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ได้แก่ ระบบทางเดินหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และทางผิวหนัง เมื่อเข้าสู่กระแสเลือดแล้วจะสามารถพบได้ทุกส่วนของร่างกาย และส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในกระดูกร้อยละ 95 อาการของความเป็นพิษของสารตะกั่วในระยะยาว ได้แก่ อาการของโรคไตอักเสบ (Nephritis) และหากมีปริมาณตะกั่วในเลือดสูงถึง 80 ไมโครกรัม จะส่งผลถึง สมอ ดับพิการ และอาจถึงแก่ชีวิตได้ง่าย

ข. ตะกั่วในร่างกายมนุษย์จะเป็นตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เพราะสามารถเข้าไปรวมในโครงสร้างของเอนไซม์ได้โดยไม่ยาก เนื่องจากสามารถรวมตัวกับไขมันได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกลุ่ม sulfidehydryl (-SH) เป็นตัวยับยั้งการสังเคราะห์เม็ดเลือดแดงและการใช้ธาตุเหล็กทำให้เป็นโรคโลหิตจาง เป็นสารก่อมะเร็ง

ค. ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีความเข้มข้นของตะกั่วระหว่าง 1-10 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปริมาณตะกั่วในน้ำจากแม่น้ำที่ไม่มีการปนเปื้อนมลสาร และแม่น้ำที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่วมีปริมาณเฉลี่ย 3 และ 120 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปลาเป็นพวกที่มีความไวต่อสารพิษมากที่สุด ในน้ำที่มีตะกั่วเพียง 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ปลาก็ไม่สามารถทนอยู่ได้ ในขณะที่สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังอื่นๆ ยังสามารถทนอยู่ได้เป็นปกติ

3.3 โครเมียม (Chromium)

โครเมียมเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 6B ในตารางธาตุ จัดเป็นธาตุทรานสิชัน มีเลขมวลอะตอม 24 เลขอะตอม 51.996 มีจุดหลอมเหลว 1,900 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,642 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส โครเมียมมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ได้แก่ +2, +3 และ +6 รูปที่เสถียรคือ +3 และ +6

การปนเปื้อนของโครเมียมนั้นเกิดจากการกระทำของมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ โดยโครเมียมในธรรมชาติ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+3}) แต่กิจกรรมทางอุตสาหกรรมต่างๆ จะมีการปล่อยเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+6}) ปนเปื้อนไปยังสิ่งแวดล้อม เช่นเหมืองแร่ แหล่งอุตสาหกรรมอิฐทนไฟ อุตสาหกรรมฟอกหนังและอุตสาหกรรมชุบโลหะ

3.3.1 การนำโครเมียมมาใช้ประโยชน์

ก. อุตสาหกรรมโลหะใช้โครเมียมเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ เช่น ด้านทานแรงกระแทก ด้านทานการกัดกร่อน ด้านทานการเกิดออกไซด์ให้กับโลหะ

ข. โครเมียมในรูปโครไมต์ใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า ใช้ในการทำเตาเผาซีเมนต์ เป็นต้น

ค. ผลโดยตรงวัสดุสารประกอบสำหรับชุบโลหะด้วยโครเมียม และใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี ใช้เป็นสารฟอกหนัง สีทาอาคาร สีย้อมผ้า เป็นต้น

3.3.2 ความเป็นพิษและผลกระทบจากการปนเปื้อนของโครเมียมสู่สิ่งแวดล้อม

ก. สารประกอบโครเมียม Cr^{+6} จะมีความเป็นพิษสูงกว่าสารประกอบโครเมียม Cr^{+3} ถึง 100 เท่า โดย Cr^{+6} เป็นสารที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองและมีฤทธิ์ก่อมะเร็ง สามารถดูดซึมทางร่างกายได้โดยทางเดินอาหาร ผิวหนัง และทางเดินหายใจ สำหรับสารโครเมตเป็นทั้งสารก่อการกลายพันธุ์และสารก่อมะเร็ง เพราะจะไปรบกวนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอในเซลล์

ข. พิษของโครเมียมจะทำอันตรายกับคนได้ขึ้นอยู่กับอนุมูลของโครเมียม Cr^{+6} ที่ร่างกายรับเข้าไปเล็กน้อยก็สามารถทำให้โปรตีนในร่างกายตกตะกอนและเกิดการระคายเคืองที่ไต ทำให้ไตอักเสบจนถึงแก่ความตาย

ค. การสูดดมฝุ่นที่มีโครเมียม Cr^{+6} เข้าไป จะมีผลให้ระบบทางเดินหายใจทำงานผิดปกติ ผนังกันจมูกถูกทำลายและก่อให้เกิดโรคมะเร็งปอด

ง. Cr^{+6} ที่ซึมผ่านสู่ร่างกายทางผิวหนังจะถูกรีดิวส์เป็น Cr^{+3} ในชั้นคอเรียม (Corium) ของผิวหนัง ซึ่ง Cr^{+3} นี้จะทำปฏิกิริยากับโปรตีนในร่างกายเกิดเป็นสารแอนติเจน-แอนติบอดีเชิงซ้อน (antigen-antibody complex) ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง

4. การตกตะกอนโลหะหนัก

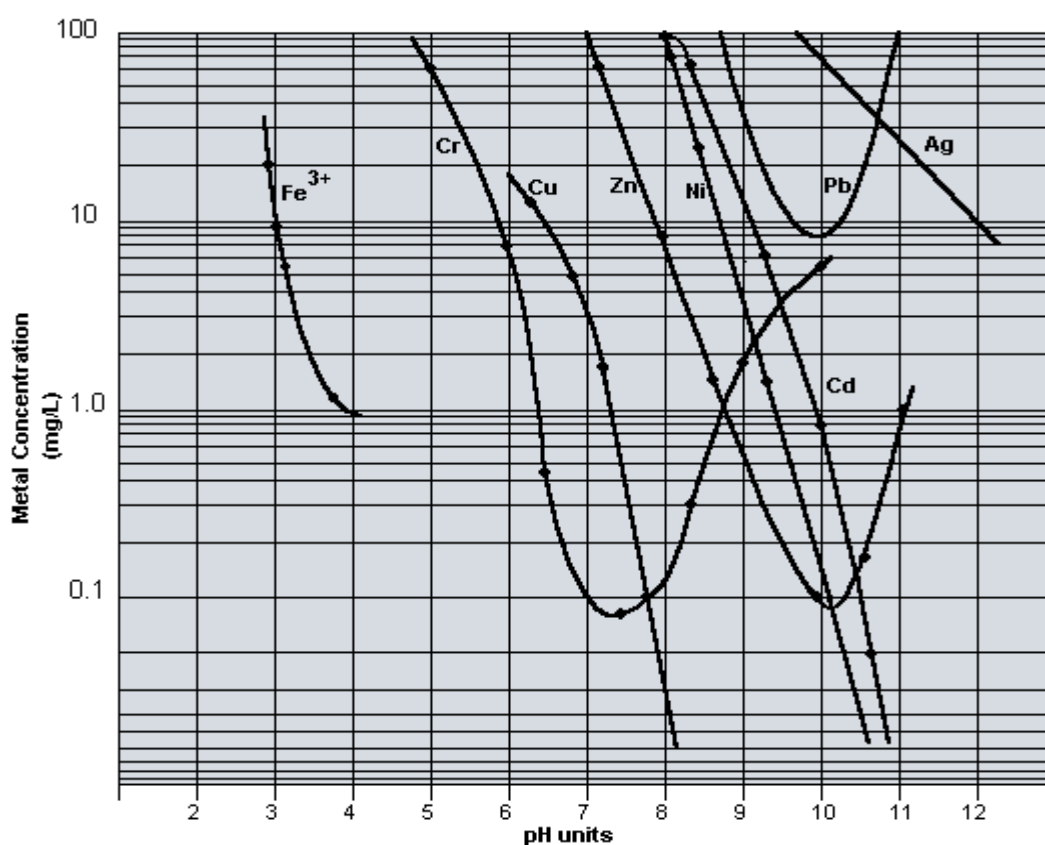
การตกตะกอนโลหะหนักเกิดจากการตกตะกอน (precipitation) ทางเคมีในน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ การตกตะกอนเป็นกระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี ที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้มาอยู่ในสถานะของแข็ง ซึ่งสามารถแยกออกจากสารละลายได้ การตกตะกอนโลหะหนัก สามารถทำได้ในรูปต่างๆ ดังนี้

1. ไฮดรอกไซด์ $(\text{OH})^-$ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์
2. คาร์บอเนต $(\text{CO}_3)^{2-}$ โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต

3. ซัลไฟด์ (S^{2-}) โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์

โลหะหนักจะตกตะกอนได้ที่ pH ต่างๆ กัน ภาพที่ 3 แสดงความสามารถในการละลายของโลหะหนักที่ pH ต่างๆ

ลักษณะของตะกอนโลหะหนักโดยทั่วไปจะมีลักษณะคล้ายโคลน (slurry) หรือสลัดจ์ (sludge) ซึ่งเป็นตะกอนที่ยากต่อการแยกน้ำออก (dewatering) เนื่องจากตะกอนส่วนมากมีลักษณะคล้ายวุ้น (gelatinous sludge) เพราะมีโมเลกุลของน้ำหุ้มอยู่โดยรอบอนุภาคตะกอน (Lanouette, 1977)



ภาพที่ 3 ความสามารถในการละลายของโลหะที่ pH ต่างๆ

ที่มา: Hoffland Environmental, Inc (2004)

กากตะกอนโลหะหนักถือว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ในภาคผนวกที่ 2 ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยกำหนดให้กากตะกอนที่มีสารอันตรายจากการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยวิธีอื่นๆ (sludges containing dangerous substances from other treatment of industrial wastewater) มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย

กากตะกอนโลหะหนักในการศึกษานี้ได้จากโรงชุบเพชรเกษม ซึ่งดำเนินการอุตสาหกรรมชุบชิ้นงานโลหะ โดยระบบบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมีของโรงงานสามารถบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 5,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน สำหรับกากตะกอนโลหะหนักที่เกิดจากระบบบำบัดเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ โดยทางโรงงานจะเก็บรวบรวมไว้แล้วส่งให้บริษัท เจนโก้ จำกัด รับไปต่อไป

5. การทดสอบการชะละลาย

การเก็บกักของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนนั้น ของเสียที่นำมาเก็บกักอาจเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นจึงต้องทดสอบการปนเปื้อนของของเสียในน้ำชะก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป การทดสอบการชะละลาย เป็นการทดสอบโดยใช้สารชะละลาย (leachant) ไปชะละลายของเสียที่นำมาเก็บกัก สารชะละลายที่เกิดการปนเปื้อนเรียกว่า leachate จากนั้นจึงนำน้ำ leachate ไปทดสอบหาปริมาณสารที่ปนเปื้อนต่อไป กระบวนการที่ของเสียที่อยู่ในรูปของแข็งถูกชะออกมาอยู่ในรูปของของเหลว เรียกว่าการสกัดหรือการชะละลาย (Lagrega, *et. al.*, 2001.)

US.EPA (1992) ได้กำหนดวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตาม SW-846, Appendix II-Method 1311 ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการทดสอบการชะละลายของเสียที่นำไปฝังกลบยังหลุมฝังกลบ โดยใช้หาสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ถูกชะออกจากของเสียในสถานะของเหลว ของแข็ง และในสถานะอื่นๆ โดย TCLP เป็นวิธีที่ใช้เวลาในการทดสอบการชะละลายน้อยกว่า 24 ชั่วโมง ดังมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1. เลือกสารชะละลายให้เหมาะกับตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างมาทดสอบ pH ใช้ผงตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มม. ปริมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร

กวนด้วยแมกนีติกบาร์เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปวัด pH ถ้าน้ำกลั่นที่แช่ตัวอย่างมี pH น้อยกว่า 5.0 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 1 ถ้ามี pH มากกว่า 5.0 ให้เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล 3.5 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา นำไปให้ความร้อนที่ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที รอให้เย็นแล้วนำไปวัด pH ถ้ามี pH น้อยกว่า 5.0 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 1 ถ้ามี pH มากกว่า 5.0 ให้ใช้สารละลายชนิดที่ 2

2. เตรียมสารละลาย เมื่อได้สารละลายที่เหมาะสมกับตัวอย่างแล้วจึงเตรียมสารละลายโดยมีวิธีการเตรียม ดังนี้

- สารละลายชนิดที่ 1 เตรียมโดยเติมกรดอะซิติก 5.7 มิลลิลิตร และ โหเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล 64.3 มิลลิลิตร ลงใน volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น pH ของสารละลายที่ได้ควรอยู่ในช่วง 4.93 ± 0.05
- สารละลายชนิดที่ 2 เตรียมโดยเติมกรดอะซิติก 5.7 มิลลิลิตร ลงใน volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น pH ของสารละลายที่ได้ควรอยู่ในช่วง 2.88 ± 0.05

3. นำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 9.5 มิลลิเมตรมาแช่ในสารละลายที่อัตราส่วนผงตัวอย่างต่อสารละลายเท่ากับ 1:20 ปิดฝาภาชนะที่ทำการละลาย จากนั้นเขย่าที่อัตรา 30 ± 2 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง

4. กรองน้ำชะละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรองขนาดรูเปิด 0.45 ไมครอน แล้วปรับ pH ให้มีค่าต่ำกว่า 2.0 ด้วยกรดไนตริก เก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 °C จนกว่าจะนำของเหลวที่ได้ ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆ

สำหรับในประเทศไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ได้กำหนดวิธีการทดสอบการชะละลายของของเสียอันตราย โดยใช้วิธีการสกัดสาร Waste Extraction Test (WET) ดังมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1. บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตร (เบอร์

2. ให้ใช้ สารละลาย 0.2 M sodium citrate ที่ $\text{pH } 5.0 \pm 0.1$ เป็นน้ำสกัดที่ใช้ในวิธี WET โดยเตรียมจากการนำสารละลาย citric acid ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับ pH ให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลาย 4.0 N NaOH

3. นำ 50 กรัมของตัวอย่างใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน

4. เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปใส่ในภาชนะด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไป และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว

5. และนำไปเขย่าโดยใช้ table shaker หรือ overhead stirrer หรือ rotary extractor ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

6. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่าน glass fiber filter เส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6-0.8 ไมครอน

7. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (metal elements) เท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองลงในขวดโพลีเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริกจนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสม เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)

8. นำของเหลวที่ได้ ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง

6. เกณฑ์มาตรฐานและคุณสมบัติของของเสียที่ทำให้แข็งตัวเป็นก้อน

US.EPA (1999) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปทิ้งโดยการฝังกลบ หรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยการทดสอบของเสียดังกล่าวด้วย วิธีการชะละลาย (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Extract

Solution) มาตรฐานของ EPA ได้กำหนดค่าความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด หรือค่า Regulatory level in TCLP extract ดังมีรายละเอียดในตารางที่ 2 หากค่าของสารอันตรายในน้ำสกัด มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบจัดว่าอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นของเสียอันตราย

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับ ลักษณะ และคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตราย (ในภาคผนวกที่ 2) ท้ายประกาศกระทรวงฯ เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยกำหนดให้สิ่ง ปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์น้ำ สกัดแล้ว ถ้าหากมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของ สารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/l) มากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่ กำหนด (ตารางที่ 2) ตัวอย่างที่นำมาทำการชะละลายจัดว่าอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นของเสียอันตราย

ตารางที่ 2 มาตรฐานความเข้มข้นของ Cd, Pb และ Cr ในน้ำสกัด (Extract Solution) สำหรับของ เสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว

Heavy metal	Regulatory level in TCLP extract (mg/l)	Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) (mg/l)
Cadmium	1.0	1.0
Chromium	5.0	5.0
Lead	5.0	5.0

ที่มา: US. EPA (1999) และ กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2548)

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ได้ออกประกาศกรม โรงงานฯ เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 สรุปมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ได้ดังนี้

1. สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นกากตะกอน หรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว แมงกานีส เป็นต้น ก่อนนำไปทิ้งต้องทำลายฤทธิ์และ/หรือทำ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วให้เป็นก้อนก่อนนำไปทิ้งหรือฝัง วิธีการทำลายฤทธิ์ทำได้โดยใช้

สารละลายต่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกันจนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอช (pH) ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เปื้อนกากตะกอนหรือฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วย แคดเมียม (Cd) จะต้องทำให้เป็นก้อนก่อนด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์

2. สิ่งปลูกสร้างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (solidification) จะต้องมีความสมบัติดังต่อไปนี้

- น้ำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า 1×10^{-6} เซนติเมตร/วินาที
- รับแรงอัด (compressive strength test) ได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
- มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตัน/ลูกบาศก์เมตร
- มีลักษณะแข็งคล้ายหินไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

6. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chindaprasirt *et al.* (2006) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้า ด้วยทรายและเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปางในสัดส่วนทรายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 2.75 ใช้ alkali activator เป็นสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10, 15 และ 20 M สัดส่วนสารละลายผสมเท่ากับ 0.67, 1, 1.5 และ 3 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ได้มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 10 – 65 MPa สัดส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูง ได้แก่ 0.67 และ 1.0 โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 10 – 20 M ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน

การนำจีโอโพลิเมอร์ไปใช้ในงานก่อสร้างนอกจากต้องการข้อมูลของคุณสมบัติด้านความแข็งแรงที่เพียงพอแล้ว ยังขึ้นอยู่กับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและทางเศรษฐศาสตร์ โดยจีโอโพลิเมอร์มีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงกว่ามอร์ต้าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อย (Chindaprasirt *et al.*, 2006) แต่การใช้ปูนซีเมนต์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า เมื่อคิดเป็นมูลค่า ทำให้มอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์มีราคาใกล้เคียงกับมอร์ต้าปูนซีเมนต์ ค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ต้าจากปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์ (ปริญญา, 2550) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับจีโอโพลีเมอร์

สารในการผลิตมอร์ตาร์ 1 ลบ.ม.	มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์		จีโอโพลีเมอร์	
	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)
ปูนซีเมนต์ (140 บาท/กก.)	600	1,680	-	-
สารปอชโซลาน เช่น เถ้าลอยและ เถ้าแกลบ (100-500 บาท/1000 กก.)	-	-	600	60-300
น้ำ (20 บาท/1000 กก.)	300	6	100	2
ทราย (300บาท/1000 กก.)	1,500	450	1,500	450
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (18 บาท/กก.)	-	-	50	800
โซเดียมซิลิเกต (7.50 บาท/กก.)	-	-	100	750
ความร้อนในการบ่ม (100 บาท)	-	-		100
รวม	2,400	2,136	2,350	2,162-2,402
ค่าการปล่อยก๊าซ CO ₂	600	336	-	-

ที่มา: ปรินญา (2550)

Van Jaarsveld *et al.* (1997) ศึกษาทฤษฎีในการนำจีโอโพลีเมอร์มาใช้ในการเก็บกักโลหะที่มีความเป็นพิษ เพื่อการนำจีโอโพลีเมอร์มาใช้ประโยชน์ และลดปริมาณของเสียที่มีโลหะอันตรายจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่นำไปกำจัดที่หลุมฝังกลบ ของเสียต่าง ๆ เช่น เถ้าลอย ดินที่ปนเปื้อนโลหะอันตราย ของเสียจากเหมืองแร่หรือแม้แต่เศษวัสดุก่อสร้างมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบอยู่ซึ่งซิลิกาและอะลูมินานี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการทำจีโอโพลีเมอร์ได้ โดยจีโอโพลีเมอร์มีค่าความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ 10^{-9} เซนติเมตร/วินาที ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ 10^{-10} เซนติเมตร/วินาที (Davidovits, 1994) การละลายในสารละลายกรดซัลฟูริก ของจีโอโพลีเมอร์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ 7% และ 95% ตามลำดับ (Davidovits *et al.*, 1990) Comrie (1998) ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักต่าง ๆ ในของเสียจากเหมืองแร่ Kam-Kotia เปรียบเทียบกับการชะละลายเมื่อนำของเสียมาทำจีโอโพลีเมอร์ พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายออกมาจากจีโอโพลีเมอร์มีปริมาณน้อยกว่าโลหะหนักที่ชะละลายออกจากของเสียโดยตรง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายจากของเสียจากเหมืองแร่ที่ไม่ผ่านการบำบัดและที่เก็บกักในจีโอโพลีเมอร์

Heavy metals	As (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Ti (ppm)
Untreated tailings	42	9726	1858	510	5	20
Geopolymerised tailings	2	123	1115	4	3	7

ที่มา : Comrie (1998)

Phair *et al.* (2004) ศึกษาการเก็บกักโลหะหนักตะกั่วและทองแดงในจีโอโพลีเมอร์ โดยนำ Kaolinite, Metakaolin, และ K-Feldspar มาผสมกับเถ้าลอยในการทำจีโอโพลีเมอร์ ศึกษาสมบัติของวัสดุที่นำมาผสมในจีโอโพลีเมอร์ เช่น ขนาด พื้นที่ผิว ความหนาแน่น ปริมาณแคลเซียม และปริมาณไอออนบวก (cations) เป็นต้น Pb และ Cu ที่นำมาผสมในจีโอโพลีเมอร์ได้จากสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ และ $Cu(NO_3)_2$ จากการศึกษาพบว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ผสม Kaolinite ให้กำลังรับแรงอัดมากที่สุด และเก็บกัก Cu ได้ดีที่สุด รองลงมา ได้แก่ Metakaolin และ K-Feldspar ส่วนจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยล้วนให้กำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด และเก็บกัก Cu ได้น้อยที่สุด ส่วน Pb จะถูกเก็บกักไว้ในจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยล้วนได้ดีที่สุด เนื่องจากเถ้าลอยมีปริมาณ cations มากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเก็บกัก Pb ในจีโอโพลีเมอร์จะขึ้นกับปริมาณไอออนบวกของวัสดุพื้นฐาน ส่วนการเก็บกัก Cu จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของวัสดุพื้นฐาน และ Pb จะถูกเก็บกักไว้ในโครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์ได้ดีกว่า Cu ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Van Jaarsveld *et al.* (1995) ที่พบว่าการเก็บกักโลหะหนักในโครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์นั้นไม่ได้ขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่นำมาผสมเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นกับปริมาณโลหะที่นำมาผสมในจีโอโพลีเมอร์ พันธะ และการดูดซับผิวของโลหะที่อยู่ในโครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์อีกด้วย ส่วนสารละลาย alkali activator ที่เหมาะสมในการนำมาเป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาการผสมจีโอโพลีเมอร์เพื่อเก็บกักโลหะหนัก คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

1. อุปกรณ์

1.1 เครื่องแก้วสำหรับการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ Beaker, Volumetric flask, Elmeier flask และ Pipette

1.2 เยื่อกรอง ชนิด Cellulose Acetate Filter ขนาดรูเปิด 0.45 ไมครอน

1.3 เครื่องวัด pH meter ของ Denver Instrument รุ่น Model 215

1.4 ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum Filtration Set)

1.5 Oven binder รุ่น ED53/E52

1.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก พร้อมสารดูดความชื้น

1.7 เครื่องบดสารเคมี

1.8 Sieve ขนาดรูเปิด 600 ไมครอน 2 มิลลิเมตร และ 9.51 มิลลิเมตร

1.9 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo AG 204

1.10 เครื่องผสม Hobart mixer

1.11 แบบหล่อ ลูกบาศก์ขนาด 38x38x38 มิลลิเมตร

1.12 เวอร์เนีย

1.13 เกรียง

1.14 เครื่องทดสอบกำลังของวัสดุ (Versa Tester) ของ Soil test

1.15 เครื่องเขย่า (Platform Shaker) ของ New Brunswick

1.16 Atomic Absorption Spectrophotometer ของ Perkin Elmer รุ่น Analyst 100

2. สารเคมี

2.1 Sodium hydroxide 10 M

2.2 Sodium silicate มีองค์ประกอบของ Na_2O 15.32%, SiO_2 32.87% และน้ำ 51.81% โดยมวล

2.3 Acetic acid 0.1 M

2.4 Nitric acid 0.1 M

2.5 Conc. Nitric acid

2.6 Hydrogen peroxide 30%

2.7 สารละลายมาตรฐาน Cd, Pb และ Cr

2.8 น้ำกลั่น

3. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 ถ้ำลอยจากเตาเผาของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.2 กากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษม นำกากตะกอนโลหะหนักที่ได้มาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างแห้งสนิท ลดขนาดของตะกอนโลหะหนักโดยใช้โม่ร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 2 มิลลิเมตร และค้ำตะแกรงขนาดรูเปิด 600 ไมครอน

วิธีการ

1. หาคูณสมบัติของกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษมและถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

1.1 หาคูณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ pH, ปริมาณความชื้น, ปริมาณของแข็งระเหยได้ และปริมาณของแข็งที่เหลือจากการเผาที่ 550 องศาเซลเซียส ตาม Method 209 ของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th ed. (2004)

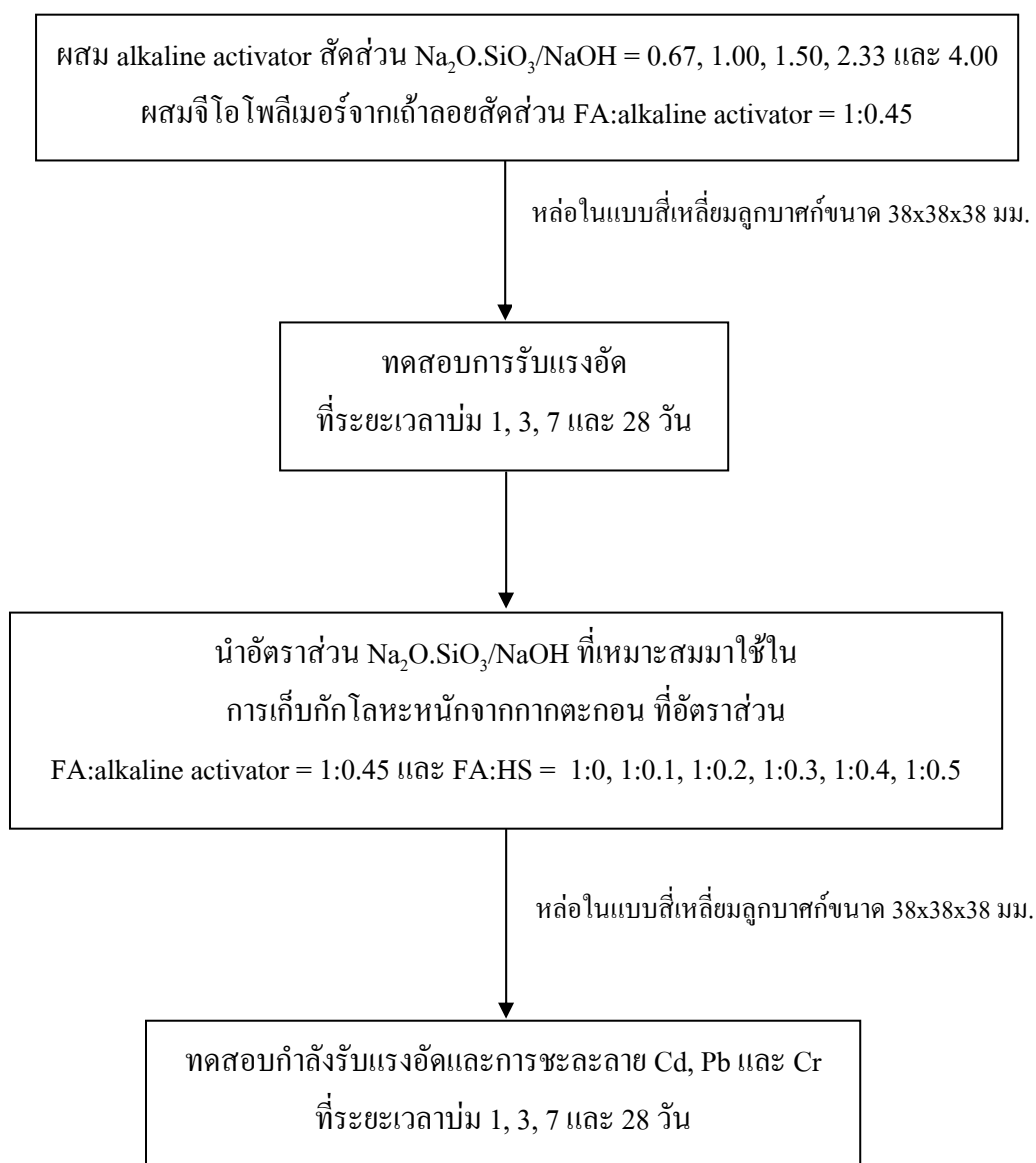
1.2 หาคูณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนโลหะหนักและถ้ำลอย ได้แก่

1.2.1 หาดังค์ประกอบออกไซด์ในกากตะกอนโลหะหนัก โดยวิธี XRF analysis (X-Ray Fluorescence) ทำการตรวจวัดโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2.2 หาปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนโลหะหนักกับถ้ำลอย โดยวิธีการย่อย (Digest) โดยใช้วิธีทดสอบตาม Method 3030 ของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th ed. แล้วนำไปหาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

1.2.3 หาปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนโลหะหนักกับถ้ำลอย โดยวิธีการชะละลาย ปรับปรุงจากวิธีมาตรฐาน Toxicity Characteristic Leaching Procedure (US.EPA, 1992) วิธีมาตรฐาน TCLP กำหนดให้ใช้กรดอะซิติก 0.1 M เป็นสารชะละลาย แต่ในการทดลองนี้ใช้กรดอะซิติก 0.1 M และกรดไนตริก 0.1 M เป็นสารชะละลาย เพื่อเปรียบเทียบความแรงของกรดในการชะละลายโลหะหนัก

หลังจากหาคูณสมบัติของกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษมและถ้ำลอยแล้ว จากนั้นจะผสมจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอยโดยใช้สารละลายด่างกระตุ้น (alkaline activator) เป็นสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สัดส่วนต่างๆ จากนั้นจะเลือกสัดส่วน alkaline activator ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูง ไปใช้เก็บกักกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโลหะต่อไป แผนการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 ดังมีรายละเอียดดังข้อ 2



ภาพที่ 4 แผนการทดลอง

2. หาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารละลายต่างโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

ในการทดลองนี้เป็นการเตรียมจีโอโพลิเมอร์โดยใช้วัสดุหลักเป็นเถ้าลอยผสมกับสารละลายต่าง (alkaline activator) ที่สัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA:alkaline activator) คงที่เท่ากับ 1:0.45 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นแล้วสามารถรับแรงอัดได้สูง หลังจากผสมจีโอโพลิเมอร์แล้ว จะนำก้อนจีโอโพลิเมอร์ที่ได้ไปวัดกำลังรับแรงอัด เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทดลองดังนี้

2.1 เตรียมสารละลาย alkaline activator โดยใช้สัดส่วนผสมโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}_3, \text{SiO}/\text{NaOH}$) เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50, 2.33 และ 4.00 โดยน้ำหนัก แล้วผสมทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง

2.2 วิธีการผสมจีโอโพลิเมอร์ ผสมส่วนผสมในเครื่องผสม Hobart mixer ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

2.2.1 เติมสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าลอย ลงในเครื่องผสม

2.2.2 ใช้ใบพายของเครื่องกวน ผสมเถ้าลอยและสารละลายอย่างช้าๆ ให้ผสมทั่วกัน 30 วินาที

2.2.3 เปิดเครื่องกวนผสม โดยทำการกวนเร็ว 1 นาที และกวนช้า 2 นาที

2.2.4 เทจีโอโพลิเมอร์ลงในแบบ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วแกะแบบออก

2.2.5 หุ้มก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันความชื้นระเหย และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

2.3 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน

หลังจากทดสอบกำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์แล้ว จะพิจารณาสัดส่วนของสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูง ไปเป็นอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองเก็บกักโลหะหนักด้วยจีโอโพลีเมอร์ต่อไป

3. หาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเก็บกักตะกอนโลหะหนักโดยใช้จีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอย

เมื่อได้อัตราส่วนของสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 แล้ว นำอัตราส่วนนั้นมาใช้ทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ FA:HS ในการเก็บกักตะกอนโลหะหนักของจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอย โดยใช้อัตราส่วนระหว่างถ้ำลอยต่อสารละลายต่าง (FA:alkaline activator) คงที่เท่ากับ 1:0.45 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น

3.1 เตรียมสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 M โดยใช้สัดส่วนที่ได้จากการทดลองที่ 2 ผสมทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง

3.2 ผสมจีโอโพลีเมอร์โดยใช้ปริมาณสารละลายต่าง ถ้ำลอย และกากตะกอนโลหะหนัก ดังแสดงในตารางที่ 5 สำหรับสาเหตุที่ใส่กากตะกอนโลหะหนักลงในจีโอโพลีเมอร์จนถึงสัดส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5 นั้น เนื่องจากถ้าใส่กากตะกอนโลหะหนักในสัดส่วนที่มากกว่านี้จีโอโพลีเมอร์จะมีความเหนียวและก่อตัวเร็ว ทำให้ไม่สามารถเทจีโอโพลีเมอร์ลงในแบบหล่อได้

3.3 วิธีการผสมจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอยและกากตะกอนโลหะหนัก ด้วยเครื่อง Hobart mixer มีขั้นตอนดังนี้

3.3.1 เติมสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์กับถ้ำลอย ลงในเครื่องผสม

3.3.2 ใช้ใบพายของเครื่องกวนผสมถ้ำลอยและสารละลายอย่างช้าๆ ให้ผสมทั่วกัน 30 วินาที

3.3.3 เปิดเครื่องกวนผสม กวนช้าเป็นเวลา 1 นาที เติมตะกอนโลหะหนัก กวนช้า 2 นาทีและกวนเร็วอีก 1 นาที

3.3.4 เทจีโอโพลีเมอร์ลงในแบบ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วทำการแกะแบบออก

3.3.5 หุ้มก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์ด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันความชื้นระเหย และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

3.4 ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 618 และการชะละลายโลหะหนักในจีโอโพลีเมอร์โดยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน

4. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์

การทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ใช้แบบหล่อขนาด 38x38x38 มิลลิเมตร เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดสอบที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน การทดสอบทำโดยชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของก้อนตัวอย่างด้วยเวอร์เนีย จากนั้นวางก้อนตัวอย่างกึ่งกลางแท่นทดสอบ ให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกดให้น้ำหนักกดด้วยอัตราสม่ำเสมอจนก้อนตัวอย่างแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ คำนวณกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างโดยใช้สูตร

$$\text{กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)} = \frac{\text{น้ำหนักที่กดได้ (กก.)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดก้อนตัวอย่าง}}$$

ตารางที่ 5 ปริมาณสารละลายและวัสดุที่ใช้ในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ เพื่อเก็บกักกากตะกอน
โลหะหนัก

FA:alkaline activator	Alkaline activator				FA:HS	Solid	
	Na ₂ O.SiO ₃ / NaOH	Na ₂ O.SiO ₃ (g)	NaOH (g)	Na ₂ O.SiO ₃ + NaOH (g)		FA (g)	HS (g)
1:0.45	0.67	216	324	540	1:0	1200	0
					1:0.1	1200	120
					1:0.2	1200	240
					1:0.3	1200	360
					1:0.4	1200	480
					1:0.5	1200	600
1:0.45	1.00	270	270	540	1:0	1200	0
					1:0.1	1200	120
					1:0.2	1200	240
					1:0.3	1200	360
					1:0.4	1200	480
					1:0.5	1200	600
1:0.45	1.50	324	216	540	1:0	1200	0
					1:0.1	1200	120
					1:0.2	1200	240
					1:0.3	1200	360
					1:0.4	1200	480
					1:0.5	1200	600
1:0.45	2.33	378	162	540	1:0	1200	0
					1:0.1	1200	120
					1:0.2	1200	240
					1:0.3	1200	360
					1:0.4	1200	480
					1:0.5	1200	600

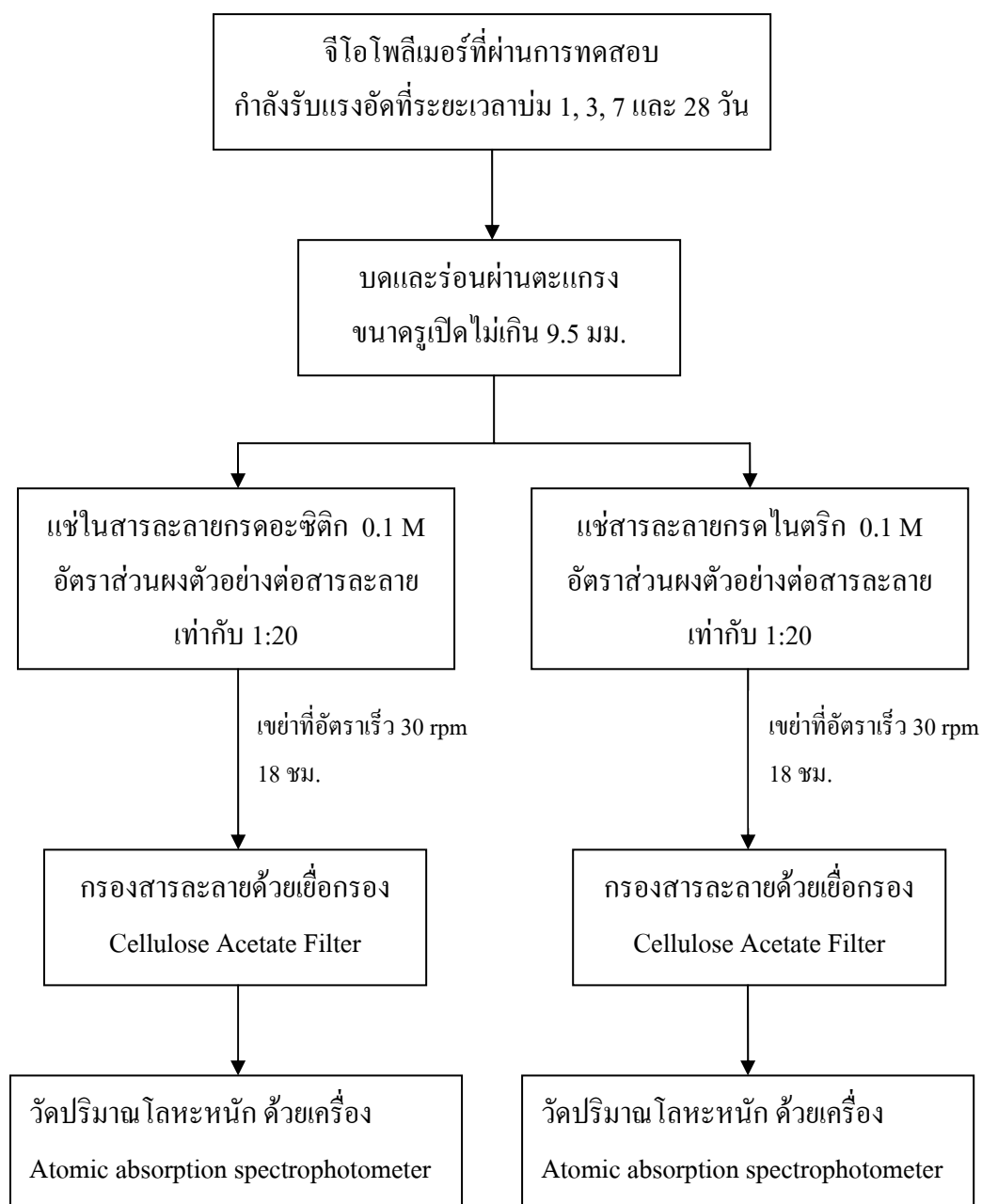
5. การทดสอบการชะละลายโลหะหนัก

ทดสอบการชะละลายโลหะหนักแคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม จากจีโอโพลิเมอร์ โดยนำจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการทดสอบการรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน มาทดสอบการชะละลายโลหะหนัก ตามวิธีมาตรฐาน Toxicity Characteristic Leaching Procedure (US.EPA, 1990) ขั้นตอนการชะละลายดังแสดงในภาพที่ 5 โดยนำก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ มาบดแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 9.51 มิลลิเมตร แบ่งผงตัวอย่างไปแช่ในกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.1 M และกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 M โดยอัตราส่วนระหว่างผงตัวอย่างและสารละลายเท่ากับ 1:20 โดยมวล นำไปเขย่าด้วยเครื่อง Platform Shaker ที่อัตราเร็ว 30 rpm เป็นเวลา 18 ชม. นำสารละลายตัวอย่างไปกรองด้วยเยื่อกรอง ชนิด Cellulose Acetate Filter ขนาดรูเปิด 0.45 ไมครอน จากนั้นนำไปหาปริมาณ Cd, Pb และ Cr ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

หลังจากหาปริมาณโลหะหนักแคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม ในจีโอโพลิเมอร์จากการชะละลายด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริกแล้ว จึงเปรียบเทียบความแรงของกรดอะซิติกและกรดไนตริกที่มีผลต่อการชะละลายโลหะหนัก โดยนำค่าการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr ด้วยกรดทั้งสองชนิดมาวิเคราะห์ผลตามวิธี Two sample T-test (Independent-Samples) ด้วยโปรแกรม SPSS

6. ประเมินค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนักด้วยจีโอโพลิเมอร์

คำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนักด้วยจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 5 วิธีการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากจีโอโพลิเมอร์

ผลและวิจารณ์

ผล

1. สมบัติของกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษม

1.1 สมบัติทางกายภาพของกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษม

กากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษม มีลักษณะเป็นก้อนดินชื้นและนิ่ม คล้ายดินเหนียว มีสีเหลือง ไม่มีกลิ่นเหม็น ภาพที่ 6 แสดงลักษณะของตะกอนเปียก ในการทดลองใช้ตะกอนแห้ง ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง แล้วร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 2 มิลลิเมตร และล้างตะแกรงขนาดรูเปิด 600 ไมครอน ภาพที่ 7 แสดงลักษณะของตะกอนที่ผ่านการอบและคัดขนาดแล้ว



ภาพที่ 6 ลักษณะของตะกอนเปียกจากโรงชุบเพชรเกษม



ภาพที่ 7 ลักษณะของตะกอนที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง
ขนาดรูเปิด 2 มิลลิเมตร และล้างตะแกรงขนาดรูเปิด 600 ไมครอน

จากการวิเคราะห์เบื้องต้น พบว่า กากตะกอนโลหะหนักของโรงชุบเพชรเกษมมีสภาพ
ค่อนข้างเป็นผงและมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณความชื้นสูงถึง 71.72% ตะกอนที่เป็น
ของแข็งทั้งหมดมีเพียง 28.28% โดยที่ของแข็งส่วนใหญ่เป็นสารคงตัว หรือกากตะกอนโลหะหนัก
มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์มากกว่าสารอินทรีย์ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 pH, ปริมาณความชื้น, ปริมาณของแข็งระเหยได้ และปริมาณของแข็งที่เหลือจากการเผา
ที่ 550 องศาเซลเซียส ของกากตะกอนโลหะหนัก

คุณลักษณะ	ค่าเฉลี่ย
pH	8.81
ปริมาณความชื้น	71.72%
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	28.28%
ปริมาณของแข็งระเหยได้	6.08%
ปริมาณของแข็งคงที่	22.20%

1.2 สมบัติทางเคมีของกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบเพชรเกษมและถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

1.2.1 องค์ประกอบออกไซด์ของถ้ำลอยและกากตะกอนโลหะหนัก

การวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของถ้ำลอย (FA) และกากตะกอนโลหะหนัก (HS) ด้วยเครื่อง XRF ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่าถ้ำลอยมีปริมาณองค์ประกอบออกไซด์เกือบทุกชนิดมากกว่าตะกอนโลหะหนัก โดยเฉพาะปริมาณซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามมาตรฐาน ASTM C 618-91 ซึ่งได้กำหนดค่าถ้ำที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ จะมีสมบัติเป็นปอซโซลานเมื่อ ผลรวมของปริมาณซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 ถ้ำลอยแม่เมาะที่นำมาใช้ในงานนี้มีผลรวมของปริมาณซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ของถ้ำลอยอยู่ที่ร้อยละ 74 จึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน ส่วนกากตะกอนโลหะหนักไม่มีสมบัติเป็นปอซโซลานโดยองค์ประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่ของกากตะกอนโลหะหนักเป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

1.2.2 ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยและกากตะกอนโลหะหนัก

การหาปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยและตะกอนโลหะหนักได้ใช้วิธีทดสอบ 2 วิธี ได้แก่การหาองค์ประกอบของโลหะหนักที่มีอยู่ในตะกอนด้วยวิธีการย่อยตะกอนตาม Method 3030 ของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th ed. และหาปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำชะด้วยวิธีชะละลายตามมาตรฐาน TCLP

ก. ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีการย่อยตะกอน

จากการนำถ้ำลอยและกากตะกอนโลหะหนักมาย่อย เพื่อหาองค์ประกอบโลหะ Cd, Pb และ Cr ที่มีอยู่ พบว่าถ้ำลอยมีปริมาณโลหะทั้ง 3 ชนิด ต่ำกว่ากากตะกอนโลหะหนัก ทั้งนี้ Cr เป็นโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอนโลหะหนักในปริมาณสูงสุด ในบรรดาโลหะหนักที่ทำการศึกษา ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 องค์ประกอบออกไซด์ของแก้วลอยและตะกอนโลหะหนัก

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	0.68
อื่นๆ*	1.81	41.98

หมายเหตุ * = ออกไซด์ของธาตุอื่น เช่น Y₂O, ZrO และ SrO

ตารางที่ 8 ปริมาณโลหะหนักในแก้วลอยและตะกอนโลหะหนักโดยวิธีการย่อยตะกอน

Heavy metals	Cd (mg/g)	Pb (mg/g)	Cr (mg/g)
FA	0.08	0.94	0.005
HS	0.13	1.02	19.60

ข. ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีการชะละลาย

ในการศึกษาครั้งนี้ ทดสอบการชะละลายโดยวิธีที่ปรับปรุงจาก TCLP ของ US.EPA โดยใช้ทั้ง กรดอะซิติกตามวิธีมาตรฐาน TCLP และกรดไนตริกเป็นสารชะละลาย เพื่อเปรียบเทียบผลของกรดในการชะละลายด้วย ผลการชะละลายดังแสดงในตารางที่ 9 จากมาตรฐาน US.EPA ซึ่งได้กำหนดปริมาณ Cd, Pb และ Cr ในน้ำสกัดให้มีค่าน้อยกว่า 1.0, 5.0 และ 5.0 มก./ล. ตามลำดับ จากการชะละลายด้วยกรดอะซิติกตามวิธีมาตรฐาน TCLP พบว่า Cd และ Pb ในเถ้าลอยและกากตะกอนโลหะหนักมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ส่วน Cr ที่ชะละลายจากกากตะกอนโลหะหนักมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน และไม่พบ Cr ที่ถูกชะละลายจากเถ้าลอย

กรดไนตริกสามารถชะละลาย Cd, Pb และ Cr ได้มากกว่ากรดอะซิติก ดังนั้น ความแรงของกรดจึงมีผลต่อการชะละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด

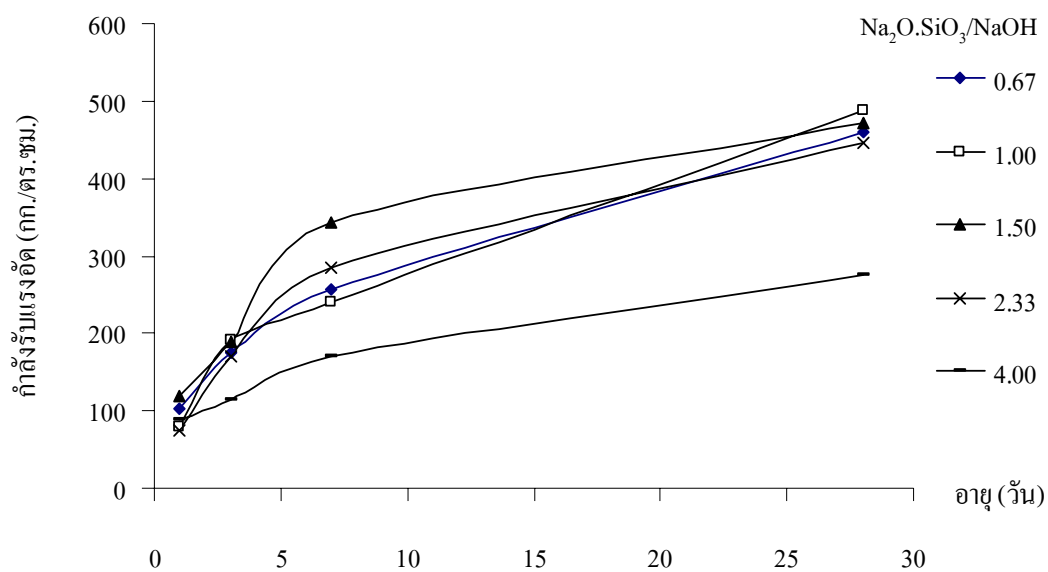
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักจากการชะละลายกับวิธีย่อยตะกอน (ตารางที่ 8) พบว่า Cd ที่พบในปริมาณน้อยมากจากการย่อยตะกอนจะถูกชะละลายออกมาน้อย สำหรับ Pb ในเถ้าลอยและกากตะกอนโลหะหนักจากการย่อยตะกอนมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทดสอบการชะละลาย พบว่า Pb ในเถ้าลอยจะถูกชะออกมาได้มากกว่ากากตะกอนโลหะหนัก และกรดไนตริกสามารถชะละลาย Pb ออกมาได้มากกว่ากรดอะซิติก สำหรับโลหะหนัก Cr จะไม่ถูกชะละลายออกมาจากเถ้าลอย แต่ในกากตะกอนโลหะหนัก Cr จะถูกชะละลายออกมามากเนื่องจากในกากตะกอนโลหะหนักมี Cr เป็นองค์ประกอบอยู่มาก และจากภาพที่ 3 โลหะหนัก Cr จะสามารถละลายในสารละลายที่มี pH ต่ำกว่า 4.5 ได้ดีกว่า Cd และ Pb ดังนั้น Cr จึงละลายได้ดีในสารชะละลาย (สารชะละลายกรดอะซิติก 0.1 M มีค่า pH เท่ากับ 2.8 และกรดไนตริก 0.1 M มีค่า pH เท่ากับ 0.85)

ตารางที่ 9 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายจากเถ้าลอย และตะกอนโลหะหนัก ด้วยกรดอะซิติก และกรดไนตริก

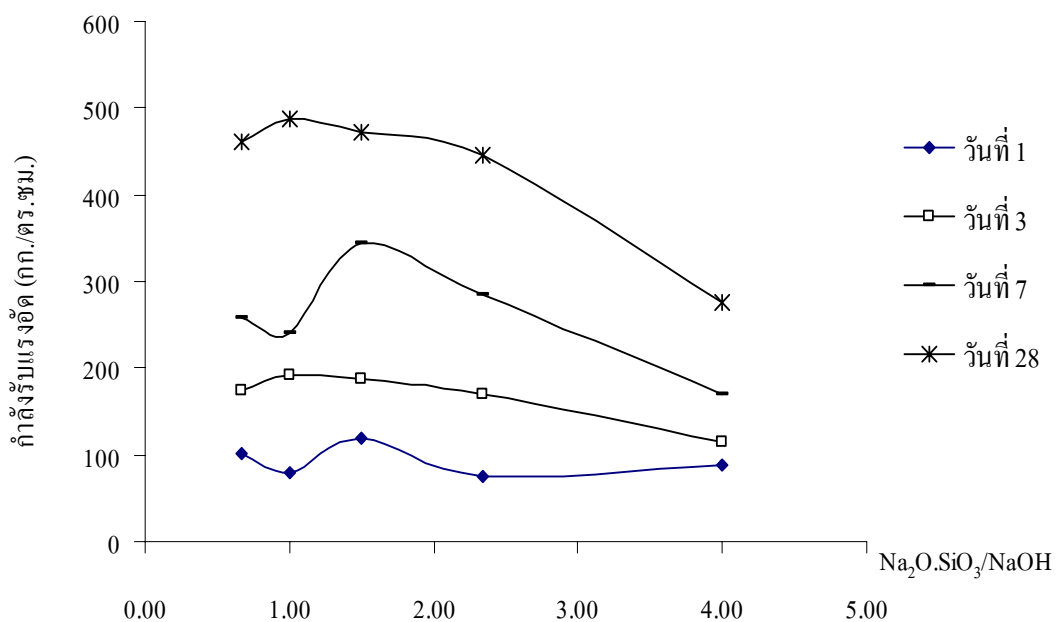
Heavy metals	Cd		Pb		Cr	
	mg/l _{TCLP}	mg/g	mg/l _{TCLP}	mg/g	mg/l _{TCLP}	mg/g
US.EPA Std.	1.00	-	5.00	-	5.00	-
FA (Acetic)	0.08	0.0016	0.14	0.0028	-	-
HS (Acetic)	0.09	0.0018	0.005	0.0001	8.02	0.160
FA (Nitric)	0.09	0.0019	0.26	0.0051	-	-
HS (Nitric)	0.09	0.0019	0.04	0.0008	25.14	0.502

2. อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายต่างโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

ในเบื้องต้นได้ทำการทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$) โดยนำก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อสารละลายต่างที่จะใช้เป็น activator (FA:alkaline activator) เท่ากับ 1:0.45 โดยแปรผัน alkaline activator ที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ต่างๆ กัน แล้วนำก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ได้มาทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาการบ่มดังแสดงในภาพที่ 8 ส่วนภาพที่ 9 แสดงผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน



ภาพที่ 8 กำลังรับแรงอัดของอีโพอซีโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมกับสารละลาย $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน



ภาพที่ 9 ผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของอีโพอซีโพลีเมอร์จากเถ้าลอย ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน

จากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยที่เตรียมจากสัดส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ ต่างๆ กัน มีพฤติกรรมการพัฒนากำลังรับแรงอัดเหมือนกัน โดยที่สัดส่วน 0.67-2.33 ได้กำลังรับแรงอัดในช่วงใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีความสามารถรับกำลังอัดเกาะกลุ่มกันอยู่ในช่วง 446-487 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ที่อัตราส่วนสารละลายผสม $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 4.00 ได้กำลังรับแรงอัดต่ำและความสามารถในการพัฒนากำลังรับแรงอัดช้ากว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 9 เห็นได้ว่า สัดส่วน activator ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลให้กำลังรับแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน สัดส่วนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.67-2.33 โดยที่สัดส่วนสารละลายผสม $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด จึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et. al.*, 2006 ซึ่งพบว่าที่สัดส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ในช่วง 0.67-1.0 จีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยจะมีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดีที่สุด

ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนของสารละลายผสม $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ คือ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 ไปเป็นอัตราส่วนผสมของสารละลายที่ใช้ในการเก็บกักโลหะหนักต่อไป

3. ลักษณะสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ผสมกากตะกอนโลหะหนัก

การทดลองนี้เป็นการผสมจีโอโพลีเมอร์ โดยเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปในจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุหลัก และใช้อัตราส่วนสารละลายผสม $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ จากผลการทดลองที่ 2 คือ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33 มาเป็นสารละลายผสมในการทำจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วนเถ้าลอยต่อกากตะกอนโลหะหนัก (FA:HS) ที่ทดลองเท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 โดยจีโอโพลีเมอร์ที่ใส่กากตะกอนโลหะหนักมีลักษณะปรากฏดังภาพที่ 10 จากนั้นนำก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์ที่ได้มาทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุพื้นฐานเพียงชนิดเดียวมีลักษณะผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีเทาดำ ส่วนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักที่อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.1 พื้นผิวมีรูซึ่งเกิดจากฟองอากาศปรากฏอยู่ ที่อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.2 และ 1:0.3 พบรูซึ่งเกิดจากฟองอากาศและเริ่มมีลายแตกปรากฏอยู่บนพื้นผิว และที่

อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.4 และ 1:0.5 พบรูซึ่งเกิดจากฟองอากาศและมีลักษณะของรอยแตกปรากฏอยู่บนพื้นผิวจีโอโพลีเมอร์

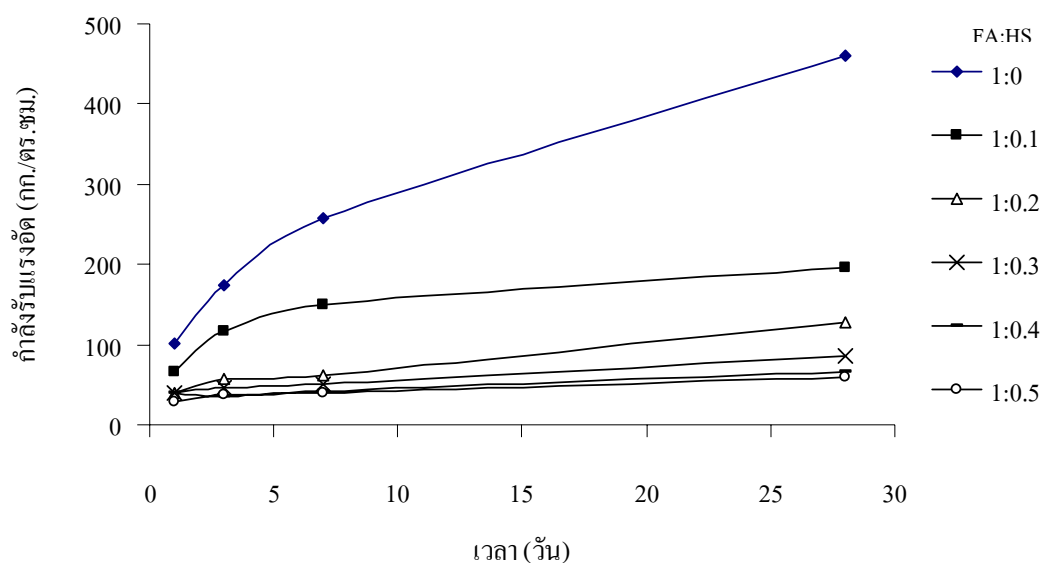
3.1 ผลของกากตะกอนโลหะหนักที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่เก็บกักโลหะหนัก แสดงในภาพที่ 11-14 จะเห็นได้ว่าจีโอโพลีเมอร์จากเถาลอยล่วนมีแนวโน้มในการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอีกหลังจากช่วง 7-28 วัน ส่วนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักมีพฤติกรรมการพัฒนากำลังรับแรงอัดแตกต่างจากจีโอโพลีเมอร์จากเถาลอยล่วน โดยในช่วง 3-7 วัน กำลังรับแรงอัดมีค่าเข้าสู่จุดสูงสุดแล้ว ดังนั้น กากตะกอนโลหะหนักจึงมีผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ลดลงในทุกกรณี โดยเมื่อสัดส่วนของตะกอนโลหะหนักเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดยังมีค่าลดลง เนื่องจากจีโอโพลีเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอลูมินา เมื่อเติมกากตะกอนโลหะหนักที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาน้อย (ตารางที่ 7) จึงเป็นการเพิ่มสารที่ไม่เกี่ยวข้องในการเกิดโพลีเมอร์ ทำให้จีโอโพลีเมอร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง อย่างไรก็ตามจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมตะกอนโลหะหนักมีกำลังรับแรงอัดในช่วง 31-235 กก./ตร.ซม. ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม จากมาตรฐานตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดการตั้งปฏิภูมหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 ซึ่งได้กำหนดสิ่งปฏิภูมที่ทำให้เป็นก้อน ต้องมีกำลังรับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 14 กก./ตร.-ซม. ดังนั้น ก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์ที่นำมาเก็บกักโลหะหนักในทุกๆ สัดส่วนจึงมีความแข็งแรงพอที่จะนำไปทิ้งยังหลุมฝังกลบได้

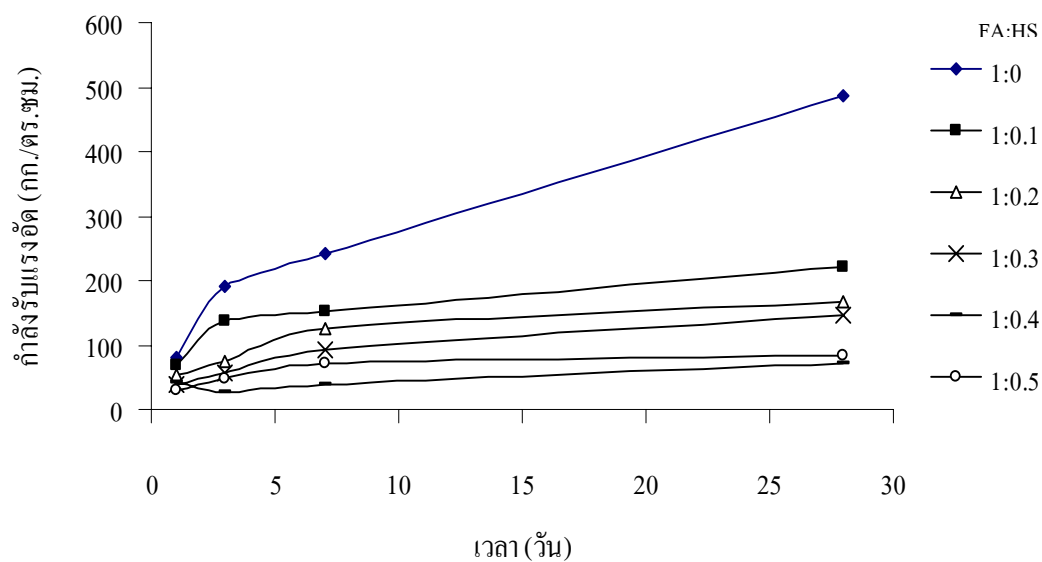


ภาพที่ 10 ภาพถ่ายอีโพอซีโพลีเมอร์เมื่อก่อตัว และแกะออกจากแบบแล้ว ที่อัตราส่วน

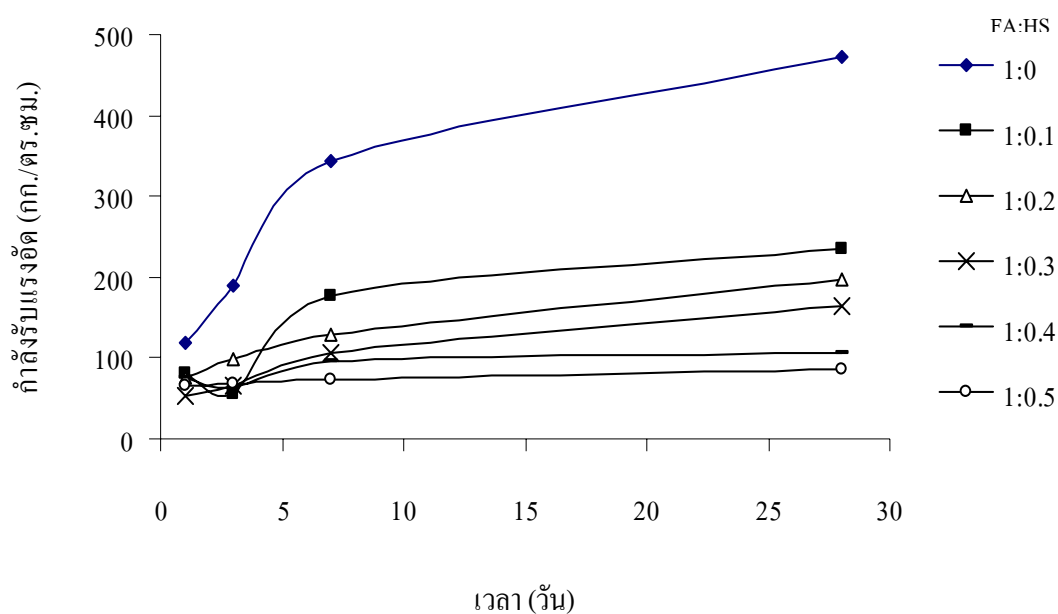
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5



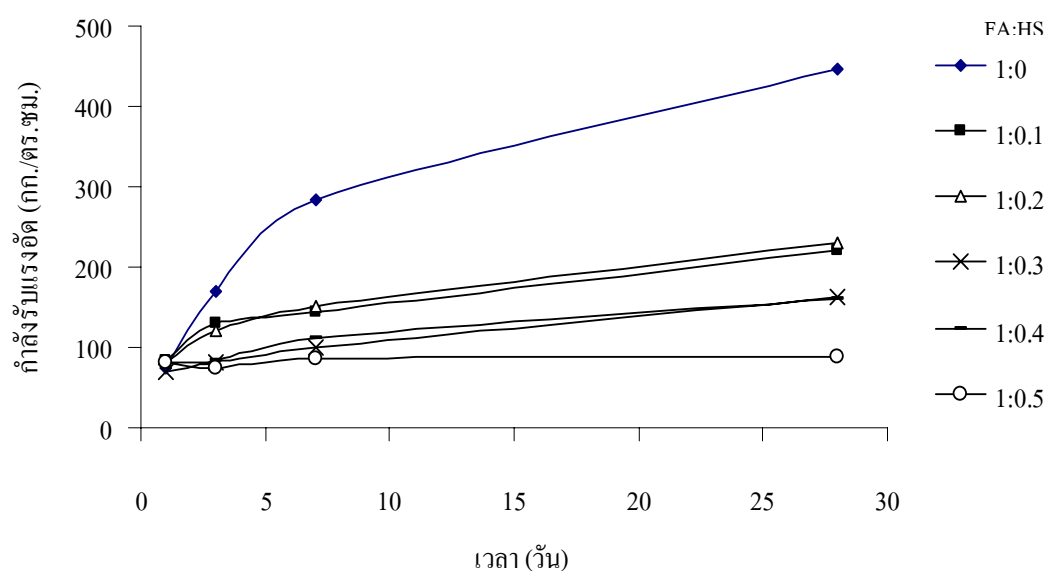
ภาพที่ 11 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67



ภาพที่ 12 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00

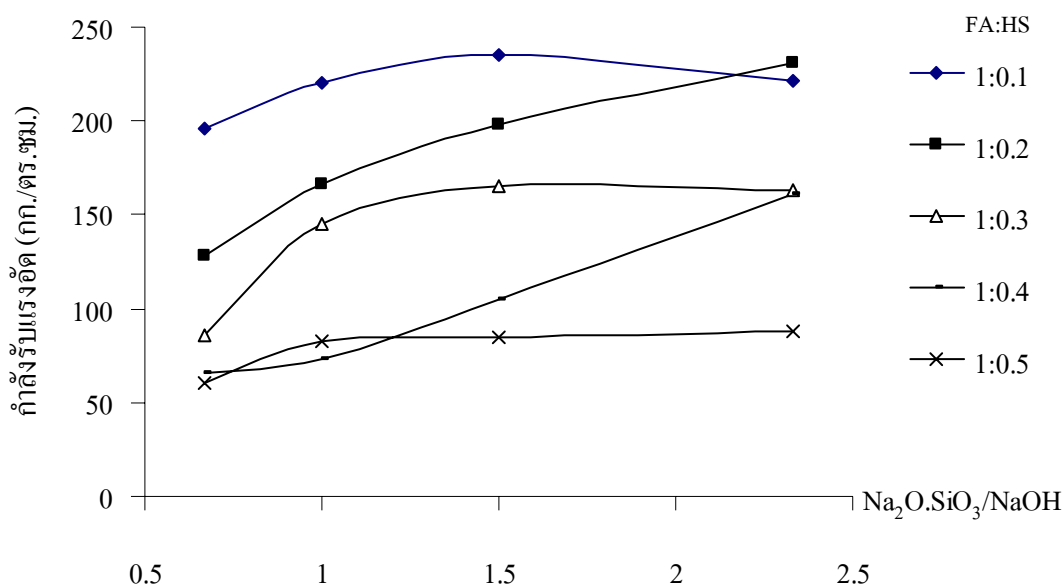


ภาพที่ 13 กำลังรับแรงอัดของอีพอกซีเรซินอัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50



ภาพที่ 14 กำลังรับแรงอัดของอีพอกซีเรซินอัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.33
3.2 ผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังรับแรงอัด

เมื่อพิจารณาผลของการแปรผันอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนัก พบว่าที่สัดส่วนสารละลายต่างเท่ากับ 0.67 ทุกสัดส่วนการผสม FA:HS ให้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าสัดส่วนอื่น ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ผสมกากตะกอนโลหะหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

4. ความสามารถในการกักกักตะกอนโลหะหนักโดยจีโอโพลีเมอร์

4.1 ปริมาณโลหะหนักจากจีโอโพลีเมอร์ผสมแก้ลอย

ผลของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr ดังแสดงในภาพที่ 16-19 ส่วนตารางที่ 10 แสดงปริมาณโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากการชะละลายต่อน้ำหนักจีโอโพลีเมอร์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน จากภาพที่ 16-19 จะเห็นได้ว่าจีโอโพลีเมอร์ที่เดิมกากตะกอนโลหะหนักที่สัดส่วน FA:HS ตั้งแต่ 1:0.1-1:0.5 ให้ค่าการชะละลายโลหะหนักในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยระยะเวลาการบ่มและสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ไม่มีผลต่อการชะละลาย Cd จีโอโพลีเมอร์สามารถเก็บกัก Cd ไว้ได้ เนื่องจาก Cd ที่ชะละลายจากก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์ผสมกากตะกอนโลหะหนักในทุกๆ

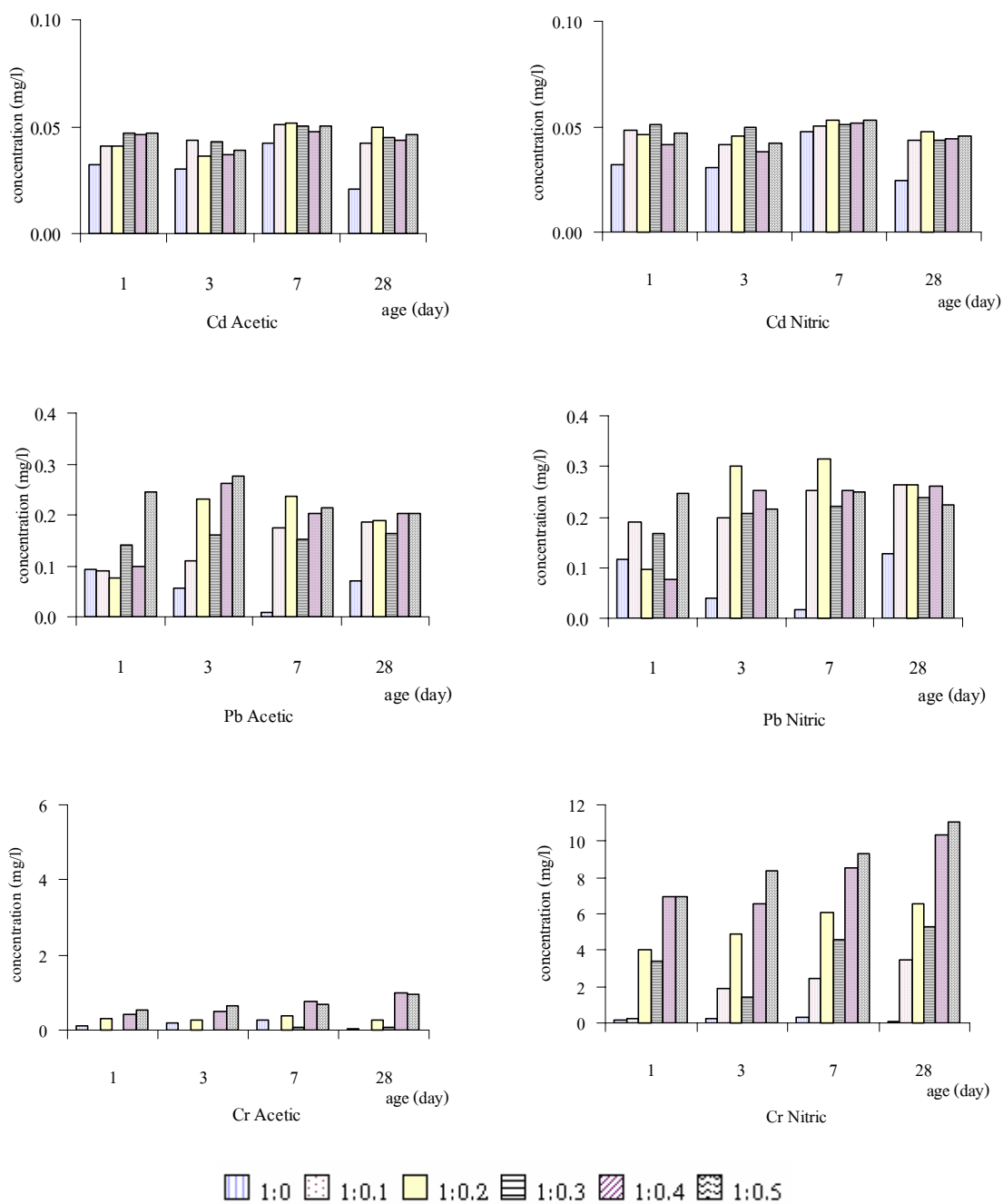
สัดส่วน มีปริมาณน้อยกว่า Cd ที่ชะละลายจากเถ้าลอยและตะกอนโลหะหนัก นอกจากนี้การที่ Cd ถูกชะละลายออกมาน้อย ยังมีสาเหตุมาจากในเถ้าลอยและกากตะกอนโลหะหนักมีการปนเปื้อนของ Cd ต่ำ ประมาณ 0.08-0.09 มก./ล. หรือ 0.016-0.019 มก./ก. (ตารางที่ 9) ในขณะที่ Cd ที่ชะละลายออกจากก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มีปริมาณ 0.0001-0.0001 มก./ก. (ตารางที่ 10) เมื่อเปรียบเทียบความแรงของกรดในการชะละลาย พบว่าปริมาณ Cd ที่ถูกชะละลายออกจากจีโอโพลีเมอร์ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริกในทุกอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน จากการทดลองทางสถิติโดยใช้ t-test พบว่าจีโอโพลีเมอร์ในทุกๆ สัดส่วน FA:HS ให้ค่าการชะละลายด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริกไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ปริมาณ Pb จากจีโอโพลีเมอร์ จากภาพที่ 16-19 เห็นได้ว่าระยะเวลาการบ่มและสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ไม่มีผลต่อการชะละลาย เนื่องจากที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ และอัตราส่วน FA:HS ในทุกๆ สัดส่วน Pb ถูกชะละลายออกมาในปริมาณใกล้เคียงกัน โดยจีโอโพลีเมอร์ที่สัดส่วน FA:HS = 1:0 มีปริมาณ Pb น้อยกว่าจีโอโพลีเมอร์ที่สัดส่วน FA:HS = 1:0.1-1:0.5 โดย Pb ที่ถูกชะออกจากเถ้าลอยและตะกอนโลหะหนักจากตารางที่ 9 (0.0001-0.0051 มก./ก.) และ Pb ที่ชะละลายจากก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์จากตารางที่ 10 (0.0011-0.0071 มก./ก.) มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าจีโอโพลีเมอร์สามารถเก็บกัก Pb ได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบความแรงของกรดในการชะละลาย พบว่า กรดไนตริกสามารถชะละลาย Pb จากจีโอโพลีเมอร์ได้มากกว่ากรดอะซิติกเล็กน้อย แต่จากการทดลองทางสถิติโดยใช้ t-test พบว่ากรดอะซิติกและกรดไนตริกให้ค่าการชะละลายโลหะหนัก Pb ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

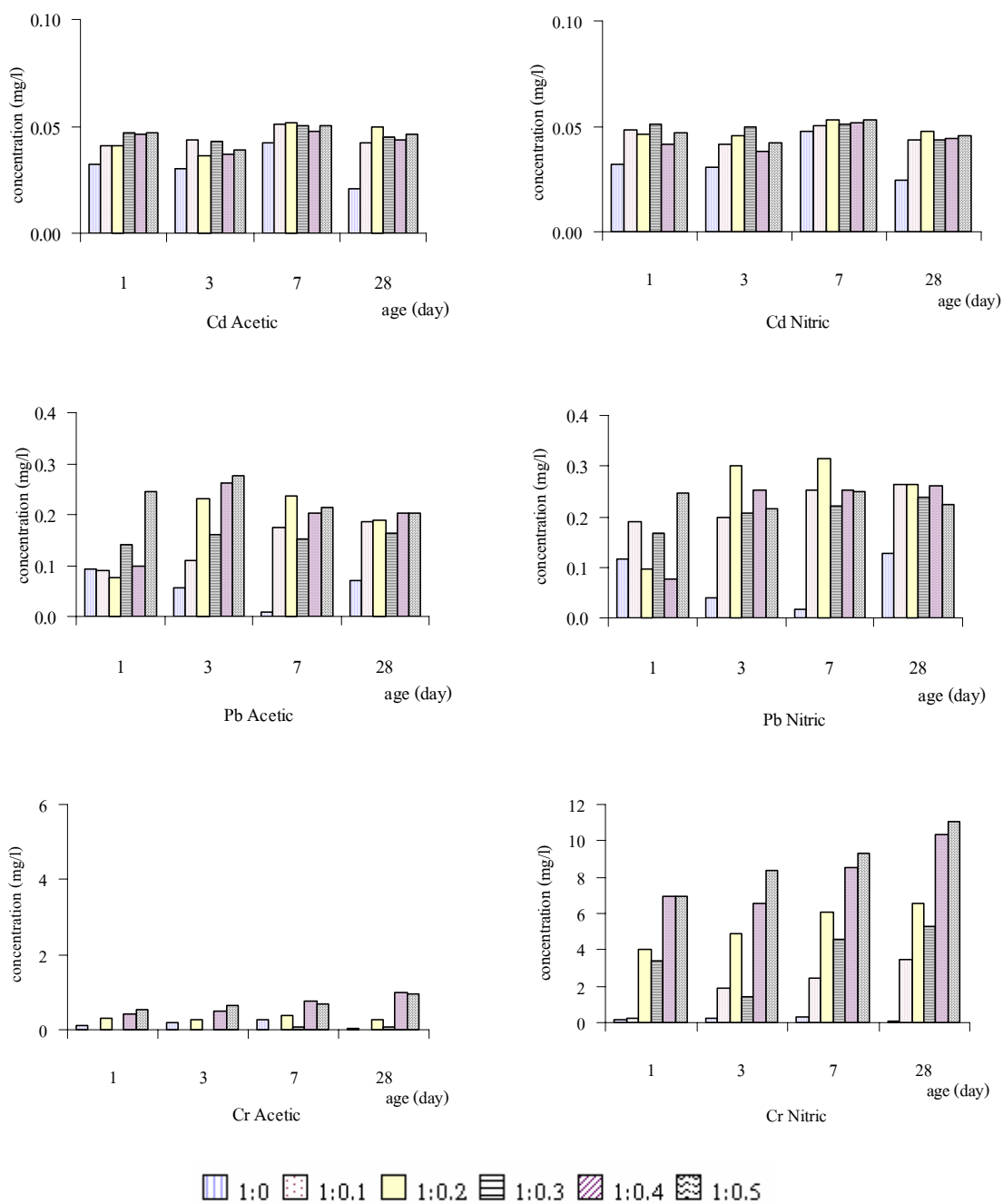
จากภาพที่ 16-19 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการบ่มมีผลต่อการชะละลาย Cr เนื่องจากที่ระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น Cr จะถูกชะละลายออกมาเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.4 และ 1:0.5 มีปริมาณ Cr ที่ถูกชะละลายมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ โดยจีโอโพลีเมอร์สามารถเก็บกัก Cr ได้ เห็นได้จากการลดลงของปริมาณ Cr ที่ชะละลายจากตะกอนโลหะหนักในตารางที่ 9 ซึ่งพบปริมาณ Cr จากการชะละลายจากตะกอนโลหะหนักด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริกมีค่าอยู่ในช่วง 8-25 มก./ล. และ 0.16-0.5 มก./ก. ส่วน Cr ที่ชะละลายจากก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์ในทุกๆ สัดส่วน มีค่าอยู่ในช่วง 0.0000-0.2584 มก./ก. (ตารางที่ 10) เมื่อเปรียบเทียบความแรงของกรดในการชะละลาย พบว่ากรดไนตริกสามารถชะละลาย Cr จากจีโอโพลีเมอร์ได้มากกว่ากรดอะซิติกประมาณ 10 เท่า จากการทดลองทางสถิติโดยใช้ t-test พบว่ากรดอะซิติกและกรดไนตริกให้ค่าการชะละลายโลหะหนัก Cr แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ Cd, Pb และ Cr ที่ถูกชะละลายจากจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนโลหะหนักในทุกๆ อัตราส่วน (ภาพที่ 16-19 และตารางที่ 10) พบว่า Cr ถูกชะละลายออกมามากที่สุด เนื่องจากในตะกอนโลหะหนักมี Cr เป็นองค์ประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อผสมตะกอนโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น Cr จึงถูกชะละลายออกมาเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Van Jaarsveld *et al.* (1995) ที่พบว่าการเก็บกักโลหะหนักในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นั้นขึ้นกับปริมาณโลหะที่นำมาผสมในจีโอโพลิเมอร์ และจากความเป็นต่างของจีโอโพลิเมอร์ ทำให้โครเมียมอยู่ในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งไม่เสถียรจึงแตกตัวกลายเป็นไอออนเชิงซ้อน ทำให้โครเมียมถูกชะละลายออกมามาก

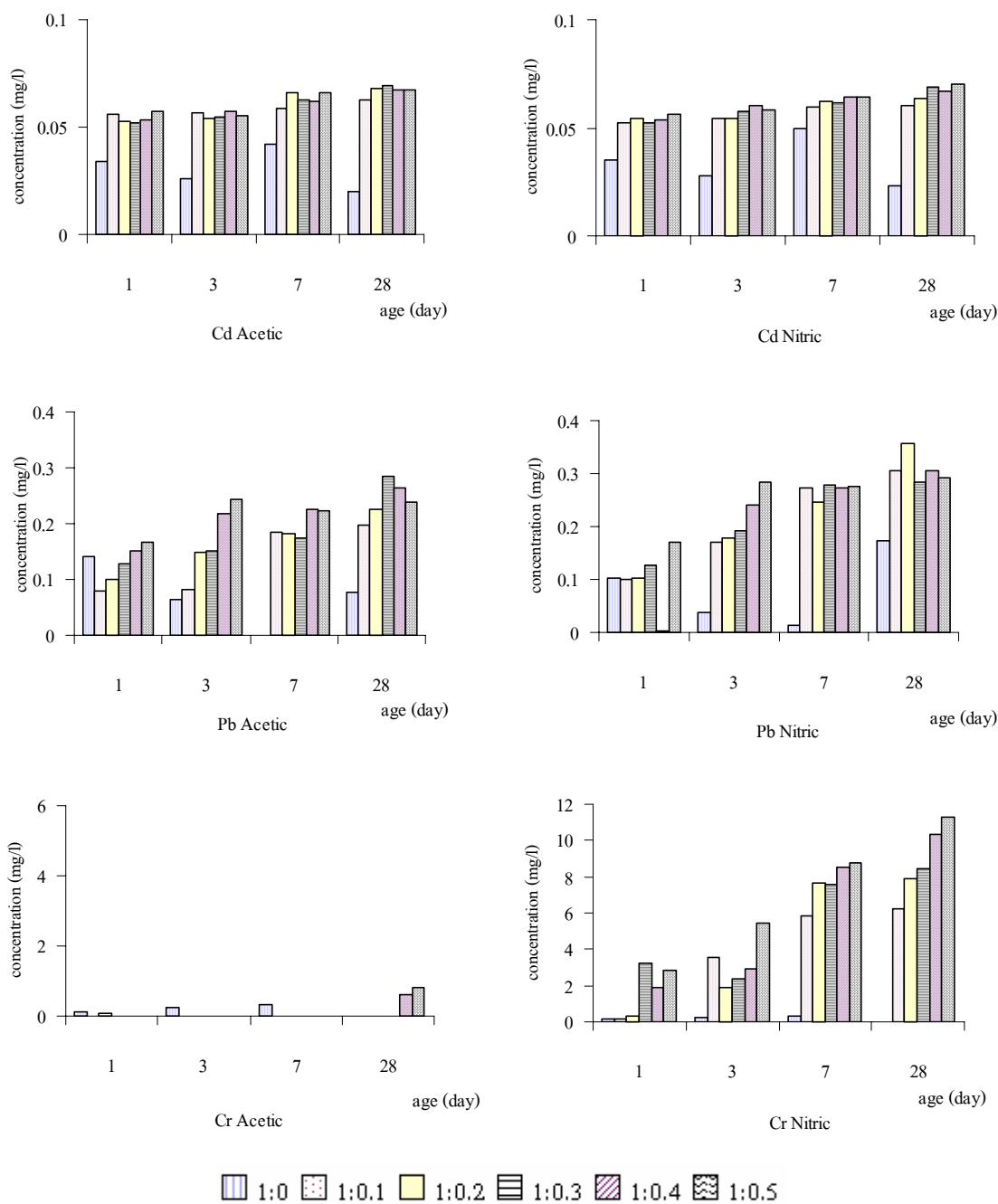
จากมาตรฐาน US.EPA และมาตรฐานตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้กำหนดปริมาณ Cd, Pb และ Cr ในน้ำสกัดให้มีค่าน้อยกว่า 1.0, 5.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และจากมาตรฐาน TCLP ที่ได้กำหนดให้ใช้กรดอะซิติกเป็นสารชะละลายเพียงอย่างเดียว ดังนั้นปริมาณ Cd, Pb และ Cr ที่ชะละลายจากจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนโลหะหนักในทุกๆ อัตราส่วนมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด



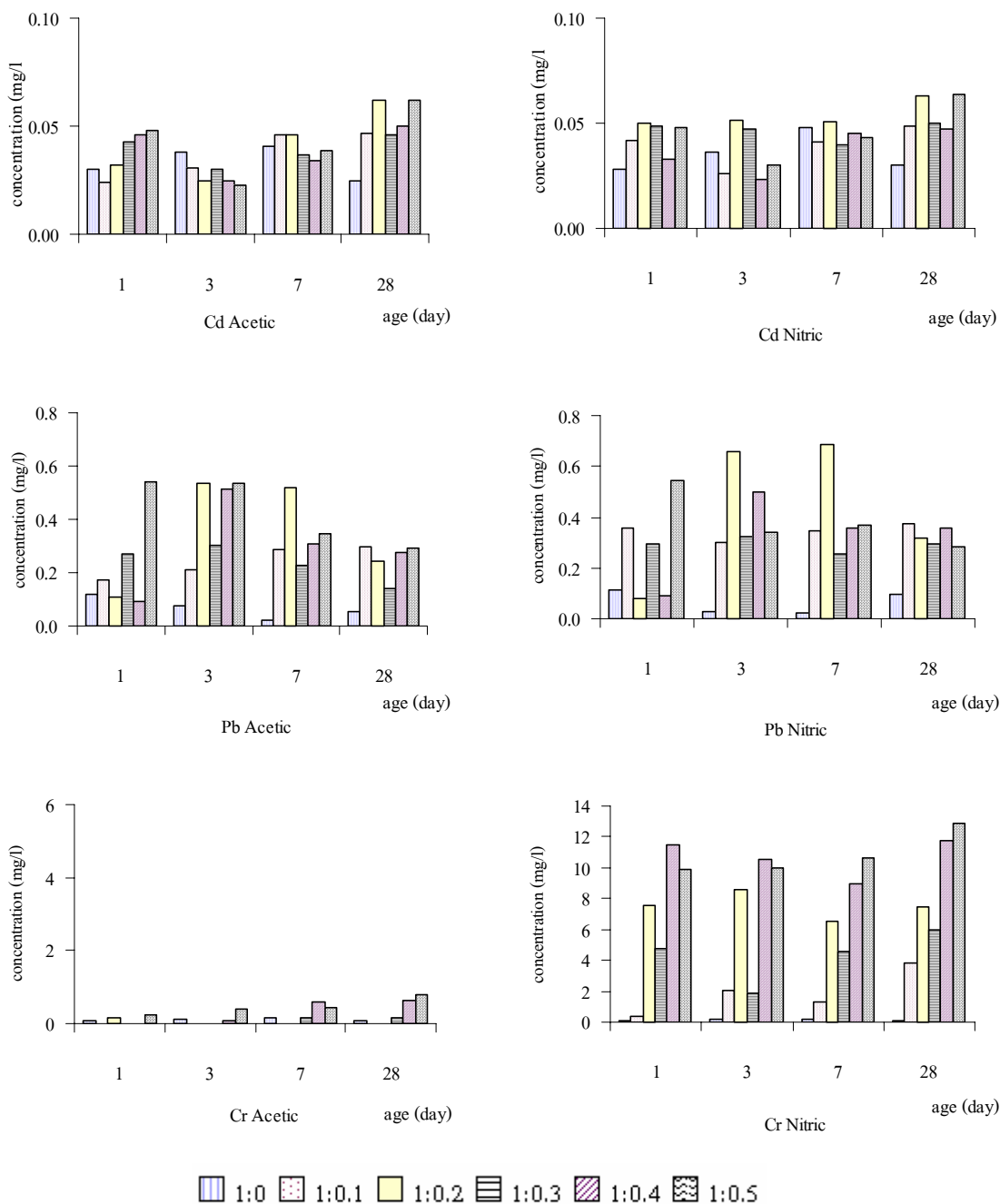
ภาพที่ 16 โลหะหนักจากการชะละลายจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67



ภาพที่ 17 โลหะหนักจากการชะละลายไอโพลีเมอร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00



ภาพที่ 18 โลหะหนักจากการชะละลายจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50



ภาพที่ 19 โลหะหนักจากการชะละลายไอโซพอลิเมอร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 2.33

ตารางที่ 10 ปริมาณ Cd, Pb และ Cr จากการชะละลายต่อน้ำหนักจีโอโพลิเมอร์ (mg/g_{geopolymer})

อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2 , 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5

ที่ระยะเวลาการป้อน 28 วัน

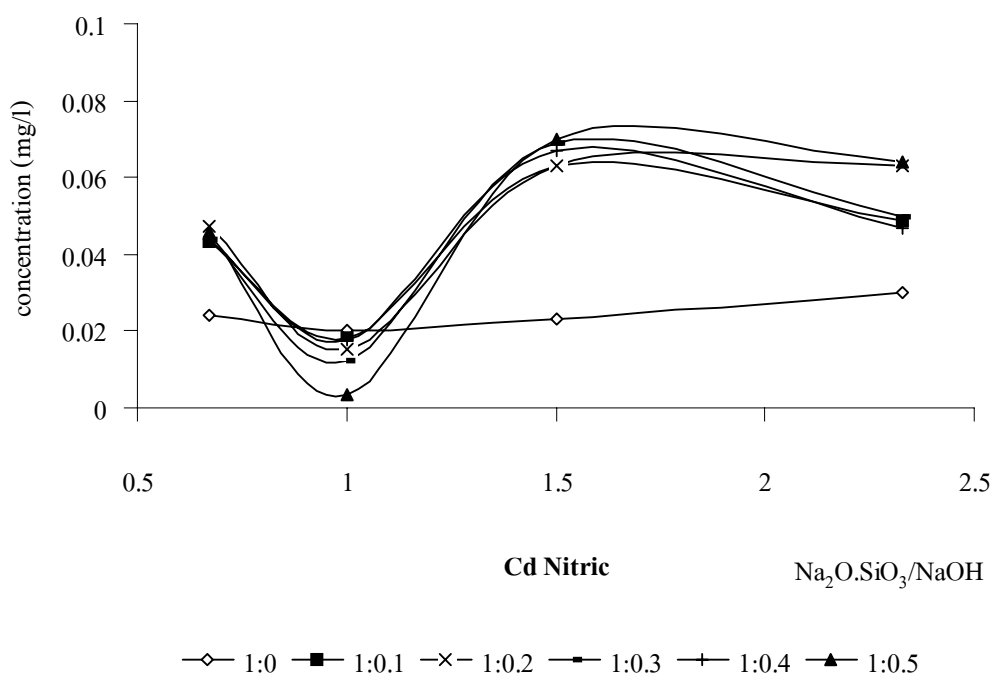
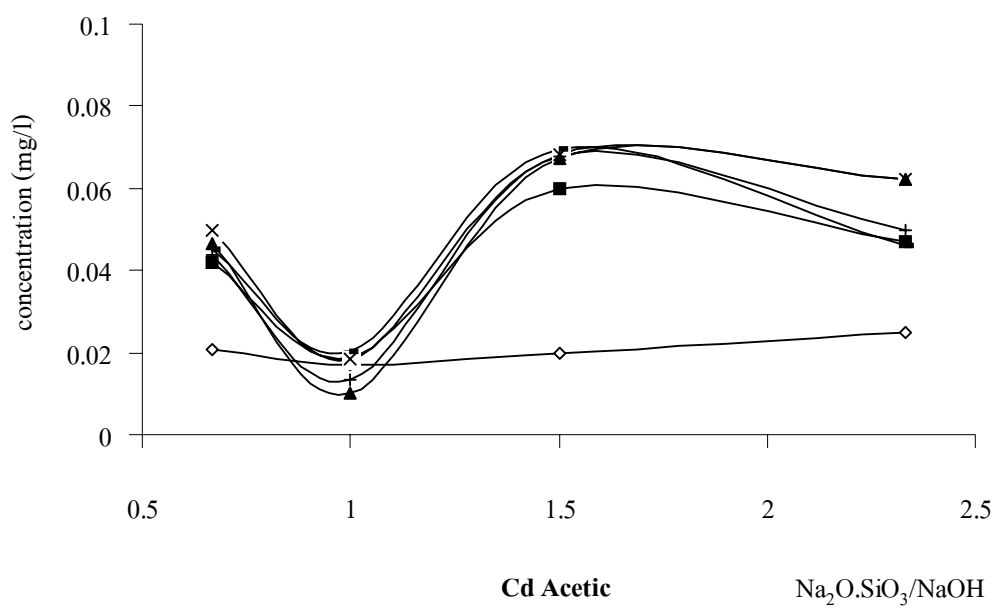
Heavy metal	FA:HS	ปริมาณโลหะหนักจากการชะละลาย (mg/g _{geopolymer})							
		Na ₂ O.SiO ₃ /NaOH							
		0.67		1.00		1.50		2.33	
		Acetic	Nitric	Acetic	Nitric	Acetic	Nitric	Acetic	Nitric
Cd	1:0	0.0004	0.0005	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0006
	1:0.1	0.0008	0.0009	0.0004	0.0004	0.0012	0.0013	0.0009	0.0010
	1:0.2	0.0010	0.0010	0.0004	0.0003	0.0014	0.0013	0.0012	0.0013
	1:0.3	0.0009	0.0009	0.0004	0.0002	0.0014	0.0014	0.0009	0.0010
	1:0.4	0.0009	0.0009	0.0003	0.0004	0.0014	0.0013	0.0010	0.0009
	1:0.5	0.0009	0.0009	0.0002	0.0001	0.0013	0.0014	0.0012	0.0013
Pb	1:0	0.0014	0.0026	0.0016	0.0023	0.0016	0.0034	0.0011	0.0019
	1:0.1	0.0038	0.0054	0.0013	0.0024	0.0039	0.0061	0.0059	0.0074
	1:0.2	0.0038	0.0054	0.0019	0.0024	0.0045	0.0071	0.0049	0.0063
	1:0.3	0.0033	0.0048	0.0013	0.0026	0.0057	0.0057	0.0028	0.0059
	1:0.4	0.0041	0.0053	0.0014	0.0025	0.0053	0.0061	0.0055	0.0071
	1:0.5	0.0041	0.0046	0.0016	0.0021	0.0048	0.0058	0.0058	0.0056
Cr	1:0	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	0.0000
	1:0.1	0.0000	0.0698	0.0000	0.0061	0.0000	0.1245	0.0000	0.0761
	1:0.2	0.0050	0.1324	0.0015	0.0847	0.0000	0.1578	0.0000	0.1498
	1:0.3	0.0012	0.1074	0.0007	0.0300	0.0000	0.1692	0.0029	0.1191
	1:0.4	0.0200	0.2096	0.0174	0.1778	0.0126	0.2076	0.0126	0.2358
	1:0.5	0.0194	0.2213	0.0187	0.1799	0.0161	0.2256	0.0161	0.2584

4.2 ผลของการใช้กรดอะซิติกและกรดไนตริกในการชะละลาย

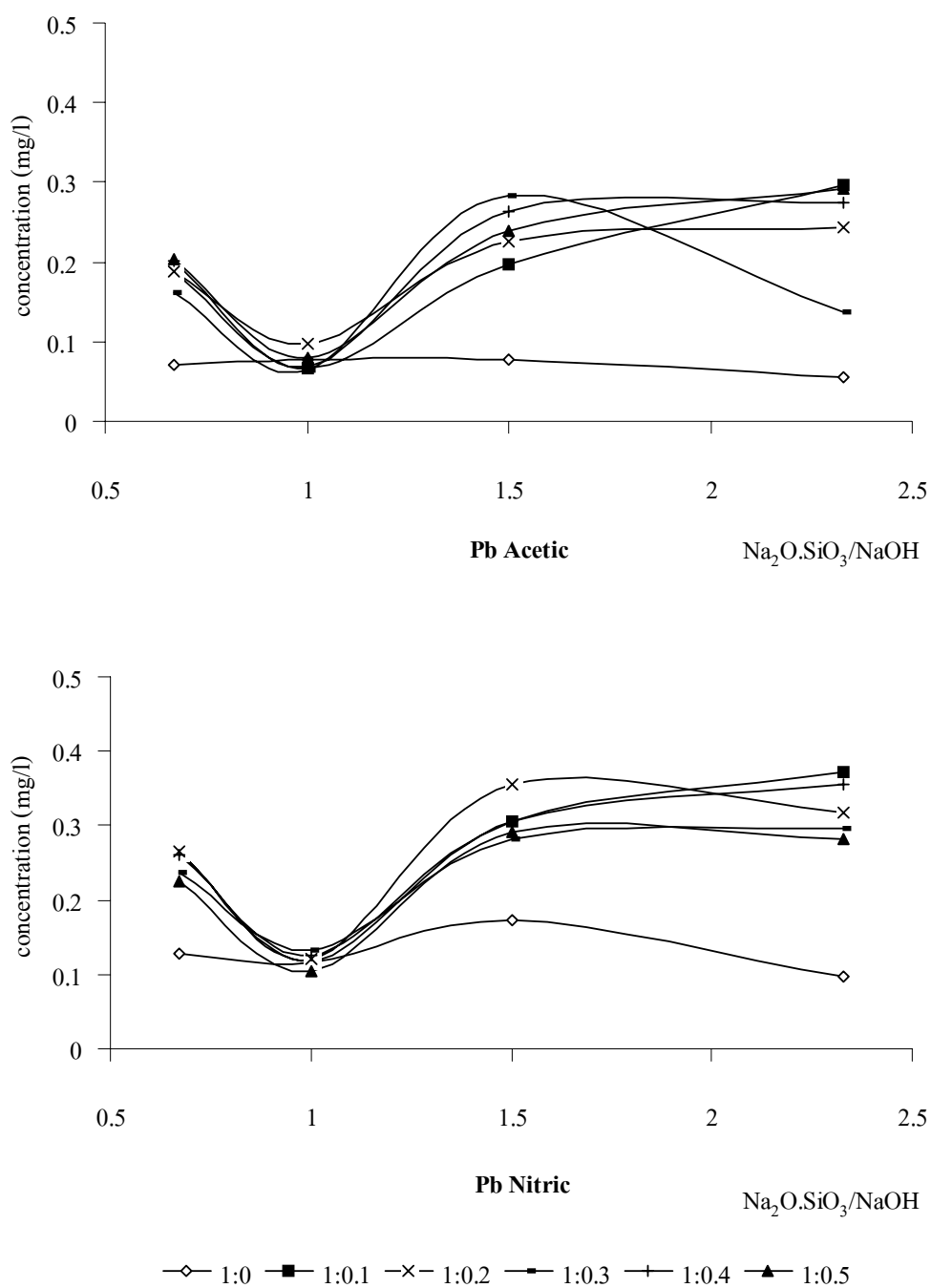
จากการใช้สารชะละลายกรดอะซิติก 0.1 M มีค่า pH เท่ากับ 2.8 และกรดไนตริก 0.1 M มีค่า pH เท่ากับ 0.85 เพื่อเปรียบเทียบความแรงของกรดในการชะละลายพบว่าความรุนแรงของกรดมีผลต่อการชะละลายโลหะหนัก Cr แต่ไม่มีผลกับโลหะหนัก Cd และ Pb โดยกรดไนตริกที่เป็นกรดแก่สามารถแตกตัวได้ 100% จึงมีความแรงและมี pH สูงกว่า สามารถชะละลายโลหะหนัก Cr ออกจากจีโอโพลิเมอร์ได้มากกว่ากรดอะซิติกซึ่งเป็นกรดอ่อน ซึ่งถือว่าแตกตัวได้น้อยกว่ามาก (ค่า $K_a = 1.75 \times 10^{-5}$) โดยจากการทดสอบทางสถิติโดยใช้ t-test พบว่ากรดอะซิติกและกรดไนตริกให้ค่าการชะละลายโลหะหนัก Cr แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

4.3 ผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 / \text{NaOH}$ ต่อการชะละลายโลหะหนักจากจีโอโพลิเมอร์

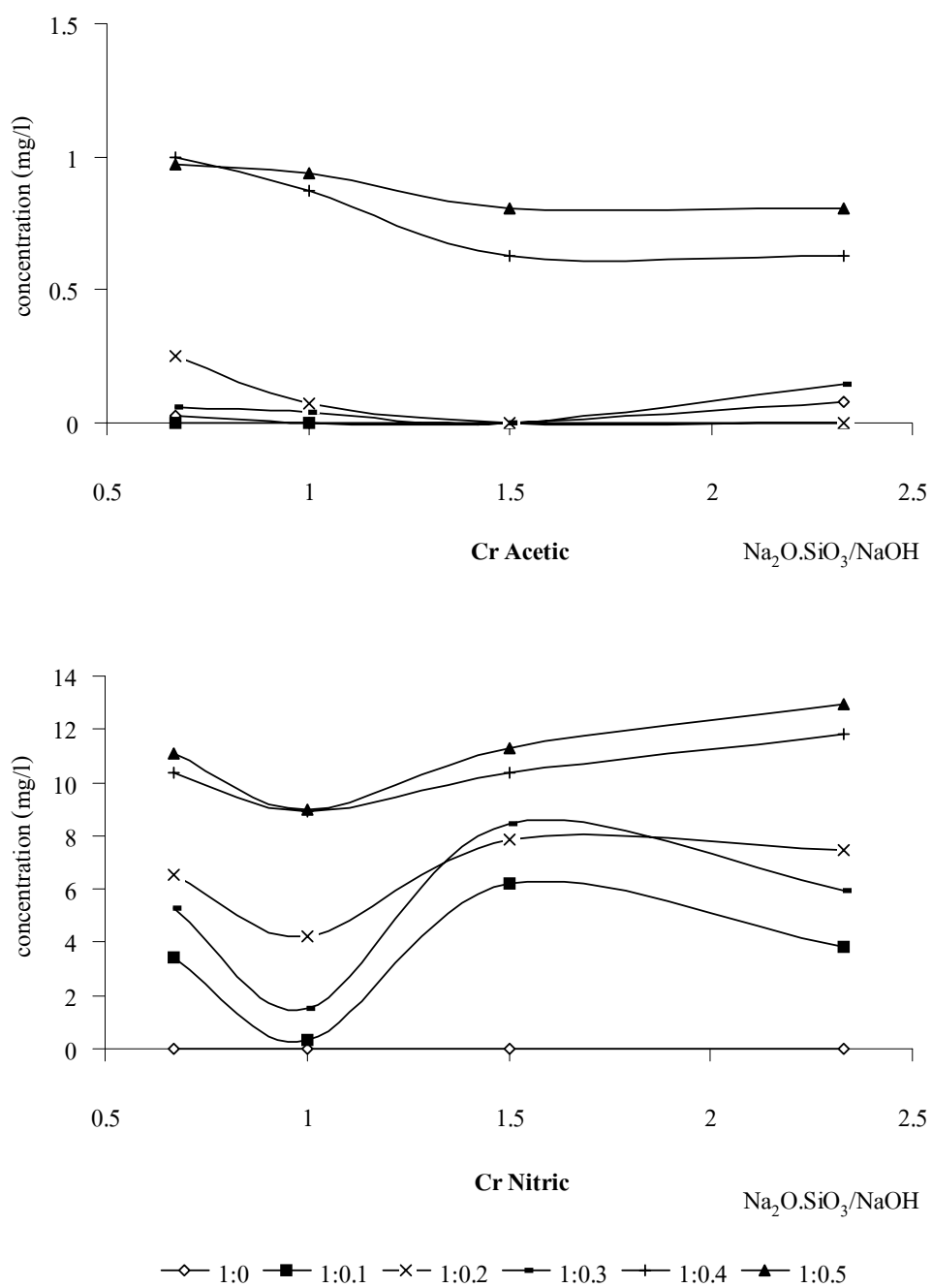
เมื่อนำผลการชะละลายจากตัวอย่างต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มาเปรียบเทียบ โดยพิจารณาจากการแปรผันอัตราส่วนของสารละลายผสมโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 20-22



ภาพที่ 20 โดหะหนัก Cd จากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์อายุ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33



ภาพที่ 21 โลหะหนัก Pb จากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์อายุ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 อัตราส่วน Na₂O.SiO₃/NaOH เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33



ภาพที่ 22 โลหะหนัก Cr จากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์อายุ 28 วัน อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 อัตราส่วน Na₂O.SiO₃/NaOH เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 2.33

จากภาพที่ 20-22 พบว่าสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ไม่มีผลต่อโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เนื่องจากในแต่ละอัตราส่วนมี Cd, Pb และ Cr ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่ในจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนัก ที่อัตราส่วนสารละลายผสม $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00 ให้ค่าการชะละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด น้อยกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ส่วนอัตราส่วนสารละลายผสม $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.50 และ 2.33 ปริมาณโลหะหนักมีค่าเพิ่มขึ้นและมีความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดในปริมาณใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัด (ภาพที่ 15) และการชะละลายโลหะหนักจากจีโอโพลิเมอร์ พบว่ากำลังรับแรงอัดไม่มีผลต่อการชะละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ 0.67-2.33 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่การชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr มีค่าแตกต่างกัน

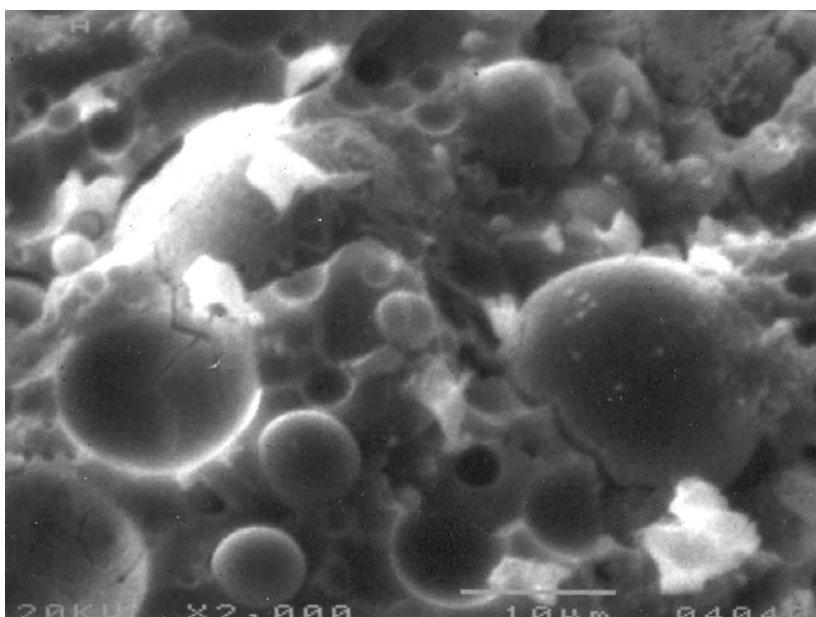
ดังนั้นสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ จึงมีผลต่อการเก็บกักโลหะหนักจากกากตะกอนโลหะหนัก โดยปริมาณ Na^+ , OH^- , และ SiO_2 จากสารละลาย $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ และ NaOH มีความสำคัญในการเก็บกักโลหะหนัก ซึ่งตรงกับการศึกษาของ (Phair *et al.*, 2004) ที่พบว่าปริมาณไอออนบวกในจีโอโพลิเมอร์มีผลต่อการเก็บกักโลหะหนัก โดยปริมาณไอออนต่างๆ จะมีความสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) และการเกิดโลหะไฮดรอกไซด์ ถ้าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ มีค่ามากไปหรือน้อยไปจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีประสิทธิภาพในการเก็บกักโลหะหนักลดลง

สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00 จึงเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้เป็นสารละลายผสมเพื่อใช้เก็บกักโลหะหนักด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดยสามารถเก็บกักโลหะหนักได้ถึงอัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5 และจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0-1:0.2 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 86-487 กก./ตร.ซม. และมีค่าการชะละลายโลหะหนักไม่เกินตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ ดังนั้นจึงสามารถนำจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0-1:0.2 ไปใช้ปูพื้นทางเดินหรือใช้ประโยชน์กับงานที่ต้องการความสามารถในการรับแรงอัดที่อยู่ในช่วงนี้ได้

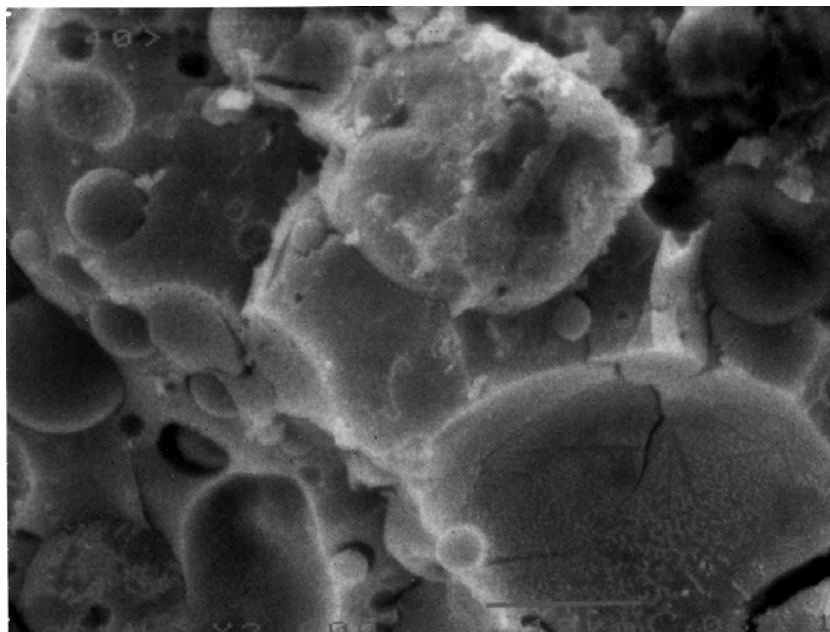
5. ลักษณะปรากฏของจีโอโพลิเมอร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ภาพถ่ายลักษณะภายในของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมกากตะกอนโลหะหนัก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 23-24

จากภาพที่ 23-24 จะเห็นได้ว่าลักษณะปรากฏส่วนใหญ่จะเห็นเป็นเม็ดเถ้าลอยที่มีลักษณะกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 ไมครอน ภาพถ่ายจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยล้วนจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าจีโอโพลิเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5 และไม่เห็นการเกิดลักษณะอื่นๆ เมื่อใส่กากตะกอนโลหะหนักลงไปในจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 23 ภาพถ่ายจีโอโพลิเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 ด้วยกล้อง SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า



ภาพที่ 24 ภาพถ่ายจีโอโพลีเมอร์อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 / \text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 ด้วยกล้อง SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า

6. ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนักด้วยจีโอโพลีเมอร์

ตารางที่ 11 แสดงรายการคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนัก 1 ตัน ด้วย จีโอโพลีเมอร์ เปรียบเทียบกับการกำจัดกากตะกอนโลหะหนักโดยการส่งให้บริษัท บริหาร และพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) หรือ Genco ซึ่งเป็นบริษัทรับกำจัดของเสียที่ได้รับอนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม รับไปกำจัด การคำนวณราคาของจีโอโพลีเมอร์ทำโดย นำตะกอนเปือกน้ำหนัก 1 ตันมาอบให้แห้งก่อนแล้วจึงนำมาผสมทำจีโอโพลีเมอร์ สำหรับค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้าอ้างอิงจากการคำนวณราคาการผลิตจีโอโพลีเมอร์ของปริญญา (2550) จากการเปรียบเทียบราคาพบว่าการกำจัดกากตะกอนโลหะหนัก 1 ตัน ด้วยจีโอโพลีเมอร์มีราคาสูงกว่าการส่งกากตะกอนโลหะหนักให้ Genco รับไปกำจัดเล็กน้อย

ตารางที่ 11 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนัก

สารในการกำจัด กากตะกอนโลหะหนัก 1 ตัน	จีโอโพลีเมอร์		Genco	
	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)
เถ้าลอยและเถ้าแกลบ	600	300	N.A.	N.A.
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (18 บาท/กก.)	58	1,044	N.A.	N.A.
โซเดียมซัลเฟต (7.50 บาท/กก.)	135	1,013	N.A.	N.A.
น้ำ (20 บาท/1000 กก.)	150	3	N.A.	N.A.
ความร้อนในการอบตะกอน (300 บาท)		300	N.A.	N.A.
รวม	943	2,660	N.A.	2,000-2,500

หมายเหตุ N.A. = ไม่มีข้อมูลเนื่องจาก Genco ให้ราคากำจัดรวมต่อกากตะกอนโลหะหนัก 1 ตัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทดลองและศึกษาการเก็บกักโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr ด้วยจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุพื้นฐาน สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. เถ้าลอยมีการปนเปื้อนของโลหะหนักที่ศึกษา ได้แก่ Cd, Pb และ Cr เท่ากับ 0.08, 0.94 และ 0.05 มก./ก. ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าที่ได้มีปริมาณน้อยกว่ากากตะกอนโลหะหนัก

2. จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยส่วนมีพฤติกรรมการพัฒนากำลังรับแรงอัดและมีความแข็งแรงคล้ายกับซีเมนต์ โดยมีกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อยู่ในช่วง 446-487 กก./ตร.ซม. โดยที่สัดส่วนสารละลายต่าง (alkali activator) โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.67-2.33 ให้กำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกันมาก

3. เมื่อเติมกากตะกอนโลหะหนักมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุพื้นฐานลดลง โดยกำลังรับแรงอัดจะลดลงแปรผันตามสัดส่วนของปริมาณกากตะกอนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น และการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนโลหะหนักจะพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันแรกๆ (3-7 วัน) โดยกำลังรับแรงอัดลดลงมาเหลือในช่วง 60-235 กก./ตร.ซม. อย่างไรก็ตามจากมาตรฐานตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้กำหนดสิ่งปฏิกูลที่ทำให้เป็นก้อน ต้องมีกำลังรับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้น จีโอโพลิเมอร์ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักในทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

4. ความรุนแรงของกรดมีผลต่อการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากเถ้าลอยกากตะกอนโลหะหนัก และก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ โดยกรดไนตริกที่มีความแรงมากกว่า และมี pH ต่ำกว่า สามารถชะละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ได้มากกว่ากรดอะซิติกที่มีความแรงน้อยกว่า และมี pH สูงกว่า

5. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการเก็บกักโลหะหนักด้วยจีโอโพลิเมอร์ จากการทดลองการเก็บกักโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์ พบว่าสามารถใส่ตะกอนโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์ที่มีเกล็ดลอยเป็นวัสดุพื้นฐานได้จนถึงอัตราส่วน FA:HS 1:0.5 และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 / \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมคือ 1.00 โดยกำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม และจากการทดสอบการชะละลายด้วยกรดอะซิติก โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure พบว่าจีโอโพลิเมอร์สามารถเก็บกักโลหะหนักแคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม โดยให้ค่าการชะละลายต่ำกว่าค่ามาตรฐาน US.EPA และมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์จึงสามารถนำมาใช้ในการเก็บกักโลหะหนักจากกากตะกอนโลหะหนักได้

ข้อเสนอแนะ

1. นำสารปอชโซลานชนิดอื่นๆ และโลหะหนักชนิดอื่น มาทดลองเก็บกักโลหะหนักด้วยจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เกล็ดลอยเป็นวัสดุพื้นฐาน
2. ควรศึกษากลไกและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเก็บกักโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. ตำราระบบการจัดการมลพิษกากอุตสาหกรรม. สถาบัน
สิ่งแวดล้อมไทย, นนทบุรี.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2539. ศึกษาศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์.
รายงานการวิจัย. กองการพิมพ์ฝ่ายประชาสัมพันธ์ กฟผ, นนทบุรี.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2542. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. เอกสารทางวิชาการ.
กองการพิมพ์ฝ่ายประชาสัมพันธ์ กฟผ, นนทบุรี.

นฤมิตร คินีมาน. 2538. การทำกากตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอไดท์ให้เป็น
ก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2550. สารจีโอโพลีเมอร์: วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์.
ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ. 2548. การศึกษาสารจีโอโพลีเมอร์จากเถ้า
ลอยและดินขาวเผา, น. 146-154. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์
แห่งชาติ ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548. การศึกษาเบื้องต้นของจีโอโพลีเมอร์จาก
เถ้าลอยแม่เมาะคัดขนาด, น. 106-109. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์
แห่งชาติ ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

มนตรี นิธิกุล. 2542. ผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะกับคุณสมบัติที่มีต่อการพัฒนากำลังอัด
และความทนทานของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American Public Health Association (APHA). 2004. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. APHA. Washington. D.C.

American Society for Testing and Materials. (ASTM C 618-00). 2001. Standard Specification for coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia

Comrie, D. C. 1988. Preliminary examination of the potential of geopolymers for use in mine tailings management, **CANMET, DSS Contract NO. 234406-9195/01SQ**, Ontario.

Chindaprasirt, P., T. Chareerat and V. Sirivivatnanon. 2006. Workability and strenght of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement & Concrete Composites**. n. p.

Davidovits, J. 1994. Properties of geopolymer cements, pp. 131-149. *In* **International Conference on Alkaline Cements and Concretes .1ed.** SRIBM, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine.

Davidovits, J., D.C. Comrie, J.H. Peterson and D. J. Ritcey, 1990. **Geopolymer Concretes for Environmental protection**, Concrete international, 30 - 40.

Davidovits, J., R. Davidovits and C. James. 1999. Chemistry of geopolymer systems, terminology, pp. 9-40. *In* **Geopolymer '99 International Conference**. France.

Glukhovsky V. D., G. S. Rostovskaja and G. V. Rumyna. 1980. High strenght slag-alkaline cements, pp. 164-168. *In* **Communications of International Congress on the Chemistry of Cement 7. ed.**

Hardjito, D., S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw and B.V. Rangan. 2004. Fly ash-based geopolymer concrete, construction material for sustainable devolment, *In* **Concrete World Conference**. Mumbai, India.

Hoffland Environmental, Inc, 2004. **Hydroxide Precipitation**. Available Source:

<http://www.hoffland.net/src/tks/3.xml>, August 18, 2007.

Lagrega, M. D., P. L. Buckingham and J. C. Evans, 2001. **Hazardous Waste Management**, 2nd ed. McGraw-hill, Boston.

Lanouette, K. H. 1977. Heavy metals removals. **Chem Eng**. 84(21): 73-80.

Marland, G., T.A. Boden, and R. J. Andres. 2007. **Global, Regional, and National CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change**. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, U.S.A.

Phair, J. W., J.S.J. Van Deventer and J.D. Smith. 2004. Effect of Al source and alkali activation on Pb and Cu immobilisation in fly Ash based "geopolymer". **Applied Geochemistry Composites** (19): 423-434.

Svehla, G. 1996. **Vogel's Qualitative Inorganic Analysis**. 7th ed. Longman group Ltd., Singapore

U.S. Environmental Protection Agency. 1992. **Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)**, SW-846, Appendix II-Method 1311.

U.S. Environmental Protection Agency. 1999. Identification and listing of hazardous waste toxicity characteristics, 40 CFR 261.24. **Federal Register**. (18)261: 55-56

Van Jaarsveld, J. G. S., J. S. J. Van Deventer. and L. Lorenzen. 1995. **Factors Affecting The Immobilisation of Metals in Geopolymerised Fly Ash**, Department of Chemical Engineering, University of Stellenbosch, South Africa.

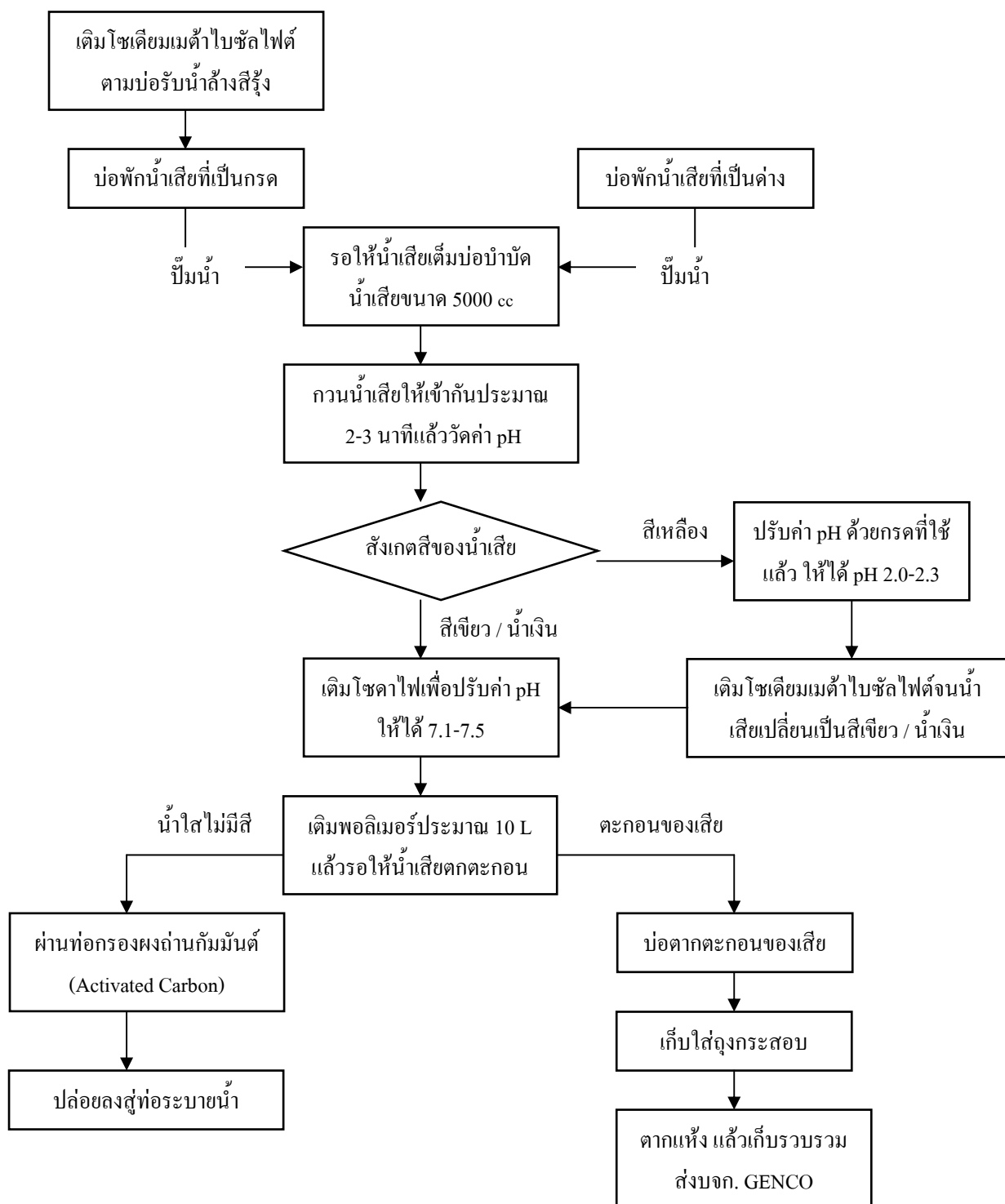
- Van Jaarsveld, J. G. S., J. G. S. Van Deventer and L. Lorenzen. 1997. The Potential use of geopolymeric materials to immobilise Toxic Metals: Part I Theory and Applications. **Minerals Engineering**, 10(7): 659-669.
- Yodmune, S. and W. Yodsudjai. 2006. Study on Corrosion of Steel Bar in Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, pp. 189-194. *In* **International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer 1. ed.** Khon Kean University, Khon Kean, Thailand.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลระบบบำบัดน้ำเสียของโรงชุบเพชรเกษม

โรงชุบเพชรเกษมดำเนินการอุตสาหกรรมชุบชิ้นงานโลหะด้วยสังกะสี โดยระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงงานสามารถบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 5,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน บ่อพักน้ำเสียมีจำนวน 2 บ่อ ได้แก่ บ่อพักน้ำเสียที่มีสมบัติเป็นกรดและบ่อพักน้ำเสียที่มีสมบัติเป็นด่าง ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของโรงชุบเพชรเกษมดังแสดงในภาพที่ 4 สารเคมีที่ใช้สำหรับตกตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}(\text{SO}_3)_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และพอลิเมอร์ (Polymer) อุบลวรรณ (2547) ได้ศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัดของโรงชุบเพชรเกษม พบว่า น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีปริมาณโลหะหนักสังกะสีอยู่ในช่วง 67-591 ppm โลหะหนักแคดเมียมอยู่ในช่วง 0.003-0.007 ppm และพบโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดประมาณ 0.023 ppm ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณโลหะหนักสังกะสีอยู่ในช่วง 15.91-40.22 ppm โลหะหนักตะกั่ว 0.041 ppm ส่วนโลหะหนักแคดเมียมตรวจไม่พบ สำหรับกากตะกอนโลหะหนักที่เกิดจากระบบบำบัดทางโรงงานจะเก็บรวบรวมไว้แล้วส่งให้บริษัท เจนโก้ จำกัด รับไปต่อไป



ภาพผนวกที่ ก1 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลนครพนม

ภาคผนวก ข

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์

[illegible]

ระยะ เวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (กรัม)	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	สูง (ซม.)	พ.ท.หน้าตัด (ตร.ซม.)	แรงกดที่ รับได้ (กก.)	กำลังรับ แรงอัด (กก./ตร.ซม.)
1	1	113.87	3.99	3.9	3.83	15.56	550	35
	2	118.81	4.3	3.94	3.96	16.94	450	27
	3	121.39	3.93	3.88	4.23	15.25	475	31
							เฉลี่ย	31
3	1	125.43	4.15	4	3.96	16.60	750	45
	2	116.18	4.12	3.9	4	16.07	775	48
	3	116.09	3.9	4.05	3.88	15.80	775	49
							เฉลี่ย	47
7	1	112.71	3.9	4	3.83	15.60	1175	75
	2	118	4	3.98	3.85	15.92	1125	71
	3	114.21	4	3.88	3.9	15.52	1100	71
							เฉลี่ย	72
28	1	123.28	4	4.3	3.86	17.20	1400	81
	2	119.58	4.03	4.17	3.82	16.81	1425	85
							เฉลี่ย	83

ภาคผนวก ค

ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายจากจีโอโพลีเมอร์

ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ (1:20) อัตราส่วน
 $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67 ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก

FA:HS	เวลาปฏิกิริยา (วัน)	โลหะหนัก (มก./ล.)					
		Cd		Pb		Cr	
		อะซิติก	ไนตริก	อะซิติก	ไนตริก	อะซิติก	ไนตริก
1:0	1	0.032	0.032	0.093	0.116	0.125	0.144
	3	0.030	0.030	0.055	0.040	0.187	0.210
	7	0.042	0.047	0.007	0.016	0.266	0.287
	28	0.021	0.024	0.071	0.128	0.025	-
1:0.1	1	0.041	0.048	0.092	0.191	-	0.252
	3	0.044	0.041	0.109	0.199	-	1.876
	7	0.051	0.050	0.175	0.252	-	2.464
	28	0.042	0.043	0.187	0.265	-	3.445
1:0.2	1	0.041	0.046	0.075	0.097	0.307	4.038
	3	0.036	0.045	0.232	0.301	0.260	4.863
	7	0.052	0.053	0.237	0.314	0.389	6.084
	28	0.050	0.047	0.189	0.265	0.251	6.539
1:0.3	1	0.047	0.051	0.142	0.167	-	3.424
	3	0.043	0.050	0.160	0.206	-	1.415
	7	0.050	0.051	0.153	0.221	0.067	4.542
	28	0.045	0.044	0.162	0.237	0.060	5.305
1:0.4	1	0.046	0.041	0.099	0.076	0.404	6.916
	3	0.037	0.038	0.263	0.252	0.492	6.564
	7	0.048	0.052	0.202	0.252	0.783	8.566
	28	0.044	0.044	0.202	0.262	0.999	10.353
1:0.5	1	0.047	0.047	0.246	0.248	0.543	6.909
	3	0.039	0.042	0.275	0.217	0.636	8.372
	7	0.050	0.053	0.215	0.250	0.696	9.354
	28	0.046	0.046	0.203	0.225	0.970	11.066

ตารางผนวกที่ ค2 ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ (1:20) อัตราส่วน
 $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00 ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก

FA:HS	เวลาบ่ม (วัน)	โลหะหนัก (มก./ล.)					
		Cd		Pb		Cr	
		อะซิติก	ไนตริก	อะซิติก	ไนตริก	อะซิติก	ไนตริก
1:0	1	0.033	0.032	0.0208	0.132	0.136	0.13
	3	0.026	0.027	0.024	0.052	0.222	0.237
	7	0.043	0.044	0.001	0.013	0.32	0.326
	28	0.017	0.02	0.078	0.115	-	-
1:0.1	1	0.046	0.047	0.023	0.117	-	0.240
	3	0.046	0.041	0.035	0.127	-	0.009
	7	0.047	0.050	0.050	0.138	-	0.315
	28	0.019	0.018	0.067	0.118	-	0.305
1:0.2	1	0.039	0.034	0.018	0.106	0.084	4.212
	3	0.030	0.031	0.011	0.069	0.078	4.094
	7	0.044	0.047	0.010	0.010	0.075	4.059
	28	0.019	0.016	0.100	0.122	0.075	4.236
1:0.3	1	0.047	0.051	0.030	0.081	-	2.248
	3	0.044	0.044	0.025	0.104	-	0.011
	7	0.051	0.051	0.057	0.129	0.051	1.522
	28	0.020	0.012	0.064	0.132	0.037	1.502
1:0.4	1	0.040	0.037	0.051	0.134	0.603	7.384
	3	0.029	0.031	0.060	0.019	0.702	6.201
	7	0.047	0.047	0.069	0.130	0.881	8.255
	28	0.014	0.018	0.068	0.125	0.896	8.890
1:0.5	1	0.035	0.036	0.032	0.030	0.69	8.009
	3	0.039	0.038	0.048	0.023	0.761	9.645
	7	0.046	0.052	0.075	0.109	0.831	8.651
	28	0.010	0.004	0.081	0.104	0.936	9.000

ตารางผนวกที่ ค3 ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ (1:20) อัตราส่วน
 $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก

FA:HS	เวลาบ่ม (วัน)	โลหะหนัก (มก./ล.)					
		Cd		Pb		Cr	
		อะซิติก	ไนตริก	อะซิติก	ไนตริก	อะซิติก	ไนตริก
1:0	1	0.034	0.035	0.142	0.102	0.142	0.178
	3	0.026	0.028	0.064	0.037	0.228	0.235
	7	0.042	0.05	0.001	0.013	0.32	0.32
	28	0.02	0.023	0.078	0.172	-	-
1:0.1	1	0.056	0.053	0.081	0.101	0.018	0.189
	3	0.057	0.054	0.082	0.169	-	3.544
	7	0.059	0.060	0.185	0.274	-	5.804
	28	0.063	0.060	0.197	0.305	-	6.224
1:0.2	1	0.053	0.054	0.101	0.102	0.083	0.311
	3	0.054	0.054	0.150	0.179	-	1.907
	7	0.066	0.062	0.183	0.247	-	7.653
	28	0.068	0.063	0.226	0.356	-	7.890
1:0.3	1	0.052	0.052	0.128	0.128	-	3.248
	3	0.055	0.058	0.152	0.193	-	2.394
	7	0.063	0.061	0.174	0.278	-	7.563
	28	0.070	0.069	0.284	0.283	-	8.46
1:0.4	1	0.054	0.054	0.151	0.004	-	1.915
	3	0.057	0.060	0.219	0.241	-	2.941
	7	0.062	0.065	0.226	0.272	-	8.501
	28	0.068	0.067	0.264	0.305	0.629	10.380
1:0.5	1	0.058	0.057	0.166	0.169	-	2.859
	3	0.055	0.058	0.243	0.285	-	5.461
	7	0.066	0.065	0.224	0.276	-	8.780
	28	0.067	0.070	0.238	0.291	0.803	11.280

ตารางผนวกที่ ค4 ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยจากการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ (1:20) อัตราส่วน
 $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.33 ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก

FA:HS	เวลาบ่ม (วัน)	โลหะหนัก (มก./ล.)					
		Cd		Pb		Cr	
		อะซิติก	ไนตริก	อะซิติก	ไนตริก	อะซิติก	ไนตริก
1:0	1	0.030	0.028	0.117	0.114	0.098	0.125
	3	0.038	0.036	0.078	0.030	0.110	0.157
	7	0.041	0.048	0.020	0.021	0.157	0.215
	28	0.025	0.030	0.056	0.097	0.076	-
1:0.1	1	0.024	0.042	0.171	0.356	-	0.323
	3	0.031	0.026	0.209	0.302	-	2.074
	7	0.046	0.041	0.289	0.344	-	1.272
	28	0.047	0.049	0.297	0.372	-	3.806
1:0.2	1	0.032	0.050	0.107	0.082	0.154	7.591
	3	0.025	0.051	0.535	0.656	-	8.589
	7	0.046	0.051	0.519	0.686	-	6.541
	28	0.062	0.063	0.244	0.317	-	7.490
1:0.3	1	0.043	0.049	0.268	0.293	-	4.777
	3	0.030	0.047	0.302	0.322	-	1.840
	7	0.037	0.040	0.229	0.256	0.151	4.540
	28	0.046	0.050	0.138	0.296	0.144	5.953
1:0.4	1	0.046	0.033	0.094	0.090	0.004	11.450
	3	0.025	0.023	0.511	0.497	0.071	10.550
	7	0.034	0.045	0.310	0.355	0.587	8.941
	28	0.050	0.047	0.275	0.355	0.629	11.790
1:0.5	1	0.048	0.048	0.540	0.544	0.247	9.859
	3	0.023	0.030	0.534	0.342	0.386	10.010
	7	0.039	0.043	0.346	0.366	0.424	10.630
	28	0.062	0.064	0.291	0.281	0.803	12.920

ภาคผนวก ง

การศึกษาค่าความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตามวิธี Two sample T-test (Independent-Samples) ด้วยโปรแกรม SPSS

ตารางผนวกที่ ง1 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์
ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67,
1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0

Heavy metal	Acid	N	Mean	Std. deviation	F.	Sig.	t.
Cd	Acetic	16	0.0313	0.00831	0.121	0.731	-0.679
	Nitric	16	0.0334	0.00930			-0.679
Pb	Acetic	16	0.0566	0.04182	3.289	0.080	-1.093
	Nitric	16	0.0749	0.05215			-1.093
Cr	Acetic	16	0.1508	0.10173	0.640	0.640	-0.250
	Nitric	16	0.1602	0.11298			-0.250

ตารางผนวกที่ ง2 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์
ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67,
1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.1

Heavy metal	Acid	N	Mean	Std. deviation	F.	Sig.	t.
Cd	Acetic	16	0.0444	0.01148	0.015	0.904	-0.322
	Nitric	16	0.0458	0.01160			-0.322
Pb	Acetic	16	0.1406	0.08545	0.384	0.540	-2.729
	Nitric	16	0.2269	0.09330			-2.729
Cr	Acetic	16	0.0011	0.00450	35.717	0.00	-3.928
	Nitric	16	2.0092	2.04476			-3.928

ตารางผนวกที่ ๓3 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลิเมอร์
ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67,
1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.2

Heavy metal	Acid	N	Mean	Std. deviation	F.	Sig.	t.
Cd	Acetic	16	0.0448	0.01434	0.975	0.331	-0.661
	Nitric	16	0.0479	0.01235			-0.661
Pb	Acetic	16	0.1843	0.15644	0.792	0.381	-0.968
	Nitric	16	0.2443	0.19717			-0.968
Cr	Acetic	16	0.1097	0.12608	36.718	0.00	-9.106
	Nitric	16	5.3811	2.31212			-9.106

ตารางผนวกที่ ๓4 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลิเมอร์
ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67,
1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.3

Heavy metal	Acid	N	Mean	Std. deviation	F.	Sig.	t.
Cd	Acetic	16	0.0464	0.01158	0.062	0.805	-0.570
	Nitric	16	0.0488	0.01199			-0.570
Pb	Acetic	16	0.1543	0.08506	0.032	0.860	-1.869
	Nitric	16	0.2079	0.07706			-1.869
Cr	Acetic	16	0.0319	0.05121	35.470	0.00	-6.160
	Nitric	16	3.6715	2.36295			-6.160

ตารางผนวกที่ ๖5 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์
ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67,
1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.4

Heavy metal	Acid	N	Mean	Std. deviation	F.	Sig.	t.
Cd	Acetic	16	0.0438	0.01388	0.009	0.926	-0.013
	Nitric	16	0.0439	0.01393			-0.013
Pb	Acetic	16	0.1915	0.12183	0.519	0.477	-0.419
	Nitric	16	0.2106	0.13544			-0.419
Cr	Acetic	16	0.4783	0.35445	16.456	0.00	-10.89
	Nitric	16	8.0998	2.77607			-10.89

ตารางผนวกที่ ๖6 ความแตกต่างของการชะละลายโลหะหนัก Cd, Pb และ Cr จากจีโอโพลีเมอร์
ด้วยกรดอะซิติกและกรดไนตริก อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67,
1.00, 1.50 และ 2.33 อัตราส่วน FA:HS เท่ากับ 1:0.5

Heavy metal	Acid	N	Mean	Std. deviation	F.	Sig.	t.
Cd	Acetic	16	0.0456	0.01513	0.004	0.0953	-0.262
	Nitric	16	0.0471	0.01593			-0.262
Pb	Acetic	16	0.2348	0.14866	0.062	0.805	-0.004
	Nitric	16	0.2350	0.13133			-0.004
Cr	Acetic	16	0.544	0.33337	11.461	0.002	-13.87
	Nitric	16	8.9251	2.39242			-13.87

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวบุษราภรณ์ ทรัพย์ห่วย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 2 มิถุนายน 2526
สถานที่เกิด	หนองคาย
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-